Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова
Российской академии наук

На правах рукописи

КИНЕВ Николай Вадимович

Сверхпроводниковые генераторы субтерагерцового диапазона с системой излучения в открытое пространство

Специальность 1.3.4 – Радиофизика

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант:
д.ф.-м.н., профессор
КОШЕЛЕЦ Валерий Павлович

Москва – 2026

Оглавление

Введение 7

Глава 1. Обзор литературы. Постановка целей и задач исследования... 22

1.1. Терагерцовый диапазон в современной науке и технике 22

1.2. Современное состояние источников терагерцового и субтерагерцового диапазона 24

1.3. Сверхпроводниковые генераторы на нестационарном эффекте Джозефсона 33

1.3.1. Эффекты Джозефсона и физические эффекты в джозефсоновских контактах 33

1.3.2. Генераторы на основе цепочек джозефсоновских переходов 52

1.3.3. Генераторы на основе распределенного СИС перехода 62

1.3.4. Генераторы не основе естественного массива джозефсоновских переходов в монокристалле высокотемпературного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ 72

1.3.5. Проблемы превышения «щелевой» частоты сверхпроводника и тепловые проблемы 83

1.4. Сверхпроводниковый интегральный приемник субТГц диапазона ... 89

1.5. Выводы и постановка задач исследования 94

Глава 2. Методы экспериментального исследования характеристик сверхпроводниковых генераторов субтерагерцового диапазона 99

2.1. Криогенные системы для охлаждения сверхпроводниковых структур 100

2.1.1. Погружная зонд-вставка в жидкий гелий 100

2.1.2. Охлаждение в вакуумном заливном криостате 102

2.1.3. Охлаждение в вакуумном криорефрижераторе замкнутого цикла 104

2.2. Исследования АЧХ и спектрального состава излучения в терагерцовом диапазоне в широкой полосе анализа 105
2.2.1. Исследования АЧХ при помощи охлаждаемого болометра ИК диапазона на основе кремния 106
2.2.2. Спектральные исследования при помощи широкополосного ТГц Фурье-спектрометра 110
2.3. Спектральные исследования в субТГц диапазоне с высоким разрешением 114
2.3.1. Спектральные исследования при помощи *on-chip* гармонического смесителя и системы ФАПЧ 115
2.3.2. Спектральные исследования при помощи сверхпроводникового интегрального СИС приемника в диапазоне 500-700 ГГц 117
2.3.3. Спектральные исследования при помощи СИС приемника в диапазоне 200-300 ГГц 119
2.4. Исследование сверхпроводниковых структур под воздействием внешнего ТГц сигнала лампы обратной волны 121
2.5. Выводы главы 123

Глава 3. Разработка и исследование субтерагерцового генератора на основе распределенного джозефсоновского перехода с системой излучения в открытое пространство 125
3.1. Конструкция *on-chip* генератора на основе РДП, вольтамперные характеристики и режимы работы 125
3.2. Схема источника на основе РДП с системой излучения в открытое пространство 130
3.2.1. Дизайны генератора с щелевой антенной 133
3.2.2. Дизайн генератора с двойной фидером и щелевой антенной 140
3.2.3. Дизайны генератора с щелевой антенной и гармоническим смесителем 143

3.2.4. Дизайны генератора с щелевой антенной и гармоническим смесителем, встроенными в ТГц линии передачи $NbTiN/SiO_2/Al$ 149
3.2.5. Криогенный модуль генератора 154
3.3. Экспериментальные исследования излучения в широкой полосе при помощи высокочувствительного охлаждаемого ИК болометра 157
3.4. Спектральные исследования излучения с высоким спектральным разрешением 162
3.4.1. Исследование спектральной линии генерации с использованием частотной и фазовой стабилизации 162
3.4.2. Исследование спектральной линии генерации с использованием внешнего спектрометра субТГц диапазона на основе сверхпроводникового интегрального СИС приемника . 173
3.4.3. Сравнение результатов 176
3.5. Оценка выходной мощности излучения генератора 178
3.5.1. Описание метода оценки 179
3.5.2. Результаты 181
3.6. Прямое наблюдение и исследование гармоник джозефсоновской генерации 187
3.6.1. Исследование гармоник при помощи широкополосного Фурье-спектрометра 188
3.6.2. Исследование гармоник при помощи спектрометра высокого разрешения на основе сверхпроводникового интегрального СИС приемника 196
3.7. Сравнение генератора с лабораторными субТГц источниками других типов 198
3.7.1. Общий сравнительный анализ источников 199
3.7.2. Сравнительный анализ спектральных характеристик 207
3.7.3. Сравнительный анализ мощности излучения и её временной стабильности 210

3.7.4. Итоги сравнительного анализа и обсуждение 214
3.8. Вопрос о генерации на частоте выше «щелевой» частоты используемых сверхпроводников 217
3.9. Линии передачи NbTiN/SiO_2/Al на частоте выше 1 ТГц и связанные тепловые эффекты в СИС переходах 221
3.10. Выводы главы 231

Глава 4. Исследование генераторов на основе массивов джозефсоновских контактов с системой излучения в открытое пространство 235
4.1. Исследование ВТСП генераторов на основе $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ 236
4.1.1. Описание конструкции генератора и его вольтамперные характеристики 237
4.1.2. Исследования мощности и частоты излучения в зависимости от температуры образца и режима работы 241
4.1.3. Исследование спектральной линии излучения в зависимости от температуры образца и режима работы 250
4.1.4. Численная модель для объяснения нетривиальных экспериментальных результатов 255
4.1.5. Фазовая синхронизации генератора к опорному сигналу при помощи системы фазовой автоподстройки частоты 263
4.2. Синхронизация двух близко расположенных генераторов $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ 267
4.3. Спектральные исследования генератора на основе цепочек джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb с высоким разрешением... 273
4.3.1. Описание конструкции генератора и его вольтамперные характеристики 275
4.3.2. Спектры излучения генератора 278
4.3.3. Регистрация спектра излучения на второй гармонике 281
4.4. Выводы главы 283

Глава 5. Спектроскопия газовых смесей с использованием сверхпроводниковых генераторов в качестве активного источника субТГц сигнала 287

5.1. Разработка лабораторного стенда для исследования спектров поглощения газов в субТГц диапазоне 288

5.2. Исследование поглощения аммиака и воды с использованием активного источника на основе $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ 293

5.2.1. Генератор $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ как источник узкополосного сигнала 293

5.2.2. Генератор $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ как источник широкополосного сигнала 295

5.2.3. Анализ применимости источника широкополосного сигнала для терагерцовой спектроскопии 299

5.3. Исследование поглощения аммиака и воды с использованием активного источника на основе РДП 302

5.4. Выводы главы 305

Заключение 308

Вопросы авторства, благодарности 314

Список сокращений и условных обозначений 317

Список литературы 322

Список публикаций автора по теме диссертации 341

Введение

Актуальность темы исследования

Субтерагерцовый (субТГц) и терагерцовый (ТГц) диапазоны электромагнитного излучения в настоящий момент активно осваиваются в целом спектре областей науки и техники – системы связи, включая предполагаемые в будущем сети 6G, астрофизические [1-3] и атмосферные исследования [4], системы безопасности [5], биомедицина, молекулярная спектроскопия [6] и фундаментальные исследования материалов в физике, химии, биологии [7-9], построение ТГц изображений [10-11]. Точные границы данных диапазонов строго терминологически не определены и считаются, как правило, 100 ГГц ÷ 1 ТГц для субТГц и 0,3 ÷ 3 ТГц для ТГц области; при этом обозначение верхней границы ТГц диапазона в различных источниках может варьироваться до 30 ТГц, а оба диапазона часто «сливают» в единое понятие терагерцового диапазона, подразумевая область шириной в две декады от 0,1 до 10 ТГц. В диссертации целевой областью исследований является область до 1 ТГц, поэтому терминология субТГц диапазона применительно к объектам исследования будет более предпочтительна в рамках настоящей работы. Данное излучение при сравнительно невысоком уровне мощности (до единиц микроватт) является неразрушающим, неионизирующим и считается безопасным для человека, при этом в ТГц диапазоне лежит огромное число спектральных линий поглощения веществ и материалов, что и является главной причиной его активного освоения последние два десятилетия.

Выбор источников ТГц/субТГц диапазона в настоящий момент достаточно ограничен и лишь незначительно увеличился за последние двадцать лет. Традиционными ТГц источниками являются лампы обратной волны [10,11]: они обладают сравнительно высокой мощностью (до нескольких милливатт) и покрывают диапазон от ~70 ГГц до 1,5 ТГц, при этом являются громоздкими из-за необходимости использовать мощный электро-

либо постоянный магнит и требуют высоковольтный источник питания. Кроме того, они вышли из массового производства более трёх десятилетий назад и не являются коммерчески доступными из-за сложности технологии изготовления замедляющих структур. Достаточно широкополосными являются фото-смесители, работающие на разностной частоте двух лазеров, их рабочий диапазон составляют до 2 ТГц [12-13], однако мощность достаточно низкая, а эффективность преобразования падает экспоненциально с ростом частоты. За последние десять лет приобрели популярность источники на основе квантово-каскадных лазеров, однако их рабочий диапазон только начинается от 1,5 ТГц [14-15], а полоса перестройки составляет, как правило, не более 1%. Наиболее практичными на сегодняшний день являются умножители частоты на основе диодов Шоттки [16-17], которые кратно повышают частоту сигнала из диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) в область ТГц частот, однако мощность значительно падает на частотах выше 1 ТГц, а главная проблема заключается в коммерческой недоступности усилителей мощности в каскадах умножения до 100 ГГц.

Степень разработанности темы исследования

Перспективной альтернативой перечисленным выше типам источников в субТГц диапазоне являются сверхпроводниковые источники, работающие на нестационарном эффекте Джозефсона [18-19]. При приложении постоянного напряжения к джозефсоновскому контакту, в последнем создаются осцилляции электромагнитного поля с частотой f, линейно пропорциональной приложенному напряжению V: $f = (2e/h)\cdot V$, с коэффициентом около 483,6 ГГц/мВ, который определяется константами e (заряд электрона) и h (постоянная Планка). Данный эффект нашел свою нишу именно в субТГц диапазоне, поскольку характерный диапазон рабочих напряжений на джозефсоновских переходах от долей до единиц милливольт естественным образом приводит к генерации именно на субТГц частотах.

В одиночном сосредоточенном джозефсоновском контакте мощность осцилляций достаточно мала (единицы-десятки пиковатт [20]), поэтому работы с целью получения практического генератора достаточной мощности естественным образом разделились на два фронта по созданию распределенных структур: генерация в одиночном переходе большого размера, либо генерация в большом массиве джозефсоновских переходов. Первая концепция была успешно развита и доведена до уровня практического применения в качестве *on-chip* гетеродина в сверхпроводниковом интегральном приемнике [21-23]. Вторая концепция, помимо наиболее очевидного создания цепочек джозефсоновских переходов на чипе [24-26] (от сотен до тысяч переходов в цепочке методами напыления и микро-литографии), также была реализована в распределенных структурах слоистых высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) купратов $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ (BSCCO), в которых на кристаллическом уровне создана естественная система из сверхпроводящих слоев, разделенных изолирующими слоями [27-29]. Несмотря на то, что причины и механизмы синхронизации большого числа переходов в массиве известны и описаны в работах, достаточно нетривиальные зависимости спектральных характеристик от различных параметров в сложной распределенной системе до сих пор остаются предметом дискуссий, а математические модели, способные достоверно учесть все физические процессы, на настоящий момент отсутствуют. Также известно множество работ по генерации и детектированию в ТГц диапазоне на основе ВСТП купратов $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ (напр., [30]), однако их характерная ширина линии излучения составляет более 1 ГГц, что делает их мало пригодными в задачах, где требуется источник когерентного (узкополосного) сигнала. **Данная работа посвящена** разработке и исследованию практических генераторов в субТГц диапазоне на основе как низкотемпературных (ниобий и его соединения), так и высокотемпературных сверхпроводников BSCCO, с выходным излучением в открытое пространство. В рамках работы продемонстрированы конкретные устройства и методы по

регистрации линий поглощения газов при различном давлении с использованием разработанных устройств. Разработанные генераторы с широкой полосой перестройки могут быть применены в любой области, где требуется источник субТГц излучения в открытое пространство, а наличие и габариты криогенной системы не являются принципиальной проблемой. Кроме того, разработанные генераторы могут быть успешно внедрены в «низкотемпературные» исследования в составе уже действующих криогенных систем, где, наоборот, технической проблемой является ввод сигнала от источника, находящегося при комнатной температуре. Работа является существенным шагом в сторону закрытия проблемы так называемого «терагерцового провала» [9], заключающейся в отсутствии широко доступных и недорогих устройств генерации и приёма в ТГц диапазоне.

Объектами исследования в настоящей работе являются:

- генераторы субТГц диапазона на основе распределенных джозефсоновских туннельных переходов Nb/AlO_x/Nb, Nb/AlN/NbN (низкотемпературные сверхпроводники);
- генераторы субТГц диапазона на основе слоистых высокотемпературных сверхпроводников $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ и на основе цепочек джозефсоновских переходов из низкотемпературных сверхпроводников Nb/NbSi/Nb;
- лабораторная система регистрации линий поглощения газов в субТГц диапазоне с активным источником сигнала на основе разработанных генераторов.

Цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка и всестороннее исследование сверхпроводниковых (низкотемпературных и высокотемпературных) генераторов субтерагерцового диапазона, основанных на нестационарном эффекте Джозефсона, излучающих в открытое пространство, для трех существующих в настоящее время конструктивных реализаций – распределённый джозефсоновский переход, массив (цепочка)

специально изготовленных последовательно соединенных джозефсоновских переходов и массив естественно образованных в слоистом монокристалле джозефсоновских переходов, а также демонстрация практического применения разработанных генераторов отдельных конструкций для лабораторной спектроскопии.

Для сокращения принципиальных конструктивных реализаций генератора приняты следующие обозначения: РДП – распределенный джозефсоновский переход; ЦДП – **ц**епочка **д**жозефсоновских **п**ереходов; МДПВ – **м**ассив **д**жозефсоновских **п**ереходов на основе **в**ысокотемпературного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи:**

1. Разработка экспериментальных стендов и методик для проведения комплексных исследований генераторов с сигналом излучения в открытое пространство:

- спектральных исследований излучения в субТГц диапазоне с высоким разрешением, позволяющим точно восстанавливать форму спектральной линии, в узкой полосе анализа (шириной до 4 ГГц);
- спектральных исследований излучения в ТГц диапазоне с низким разрешением (порядка 1 ГГц), позволяющим установить наличие сигнала и определить частоту (набор частот) генерации, в широкой полосе анализа (до 2 ТГц);
- исследований основных параметров генерации (частоты, мощности, ширины спектральной линии) в зависимости от температуры и режима работы для генераторов на основе МДПВ;
- исследований накачки туннельных переходов «сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник» (СИС) мощным сигналом лампы обратной волны на частоте выше 1 ТГц (выше щелевой частоты ниобия);
- спектральных исследований поглощения с использованием газовой ячейки и возможностью задания давления.

2. Разработка практического субТГц источника с излучением в открытое пространство на основе РДП, интегрированного с передающей антенной, с использованием СИС структур $Nb/AlO_x/Nb$ и Nb/AlN/NbN с рабочей температурой 4,2 К. Исследование его ключевых физических характеристик – диапазона перестройки частоты, мощности излучения, спектральных характеристик выходного излучения с высоким разрешением, предельной рабочей частоты генерации. Реализация фазовой синхронизации генератора в разработанном конструктивном исполнении.

3. Прямое наблюдение и экспериментальное исследование гармоник джозефсоновского генератора на основе РДП непосредственно на частоте соответствующей гармоники при настройке генератора на основную частоту.

4. Наблюдение и исследование тепловых процессов, вызванных воздействием на СИС переход сигнала на ТГц частоте, превышающей щелевую частоту сверхпроводящих электродов перехода.

5. Экспериментальное исследование спектральных характеристик джозефсоновского генератора на основе МДПВ в монокристалле BSCCO, излучающего в открытое пространство, в зависимости от режима работы (области рабочих точек ВАХ) и температуры образца в широком диапазоне параметров, позволяющее построить практическую численную модель для описания полученных экспериментальных результатов.

6. Исследование практической возможности взаимной синхронизации двух отдельных генераторов на основе BSCCO, расположенных на одной микросхеме.

7. Экспериментальное исследование спектральных характеристик генератора на основе ЦДП Nb/NbSi/Nb, интегрированного с выходной волноводной линией передачи, с высоким спектральным разрешением.

8. Разработка лабораторной системы детектирования газов методом регистрации линий поглощения в ТГц диапазоне с использованием активного источника на основе РДП. Демонстрация практической работы системы на примере регистрации линий поглощения газов.

9. Разработка лабораторной системы детектирования газов методом регистрации линий поглощения в ТГц диапазоне с использованием активного источника на основе BSCCO. Демонстрация практической работы системы на примере регистрации линий поглощения газов. Исследование возможности спектроскопии газов как при узкополосном сигнале источника, так и при использовании широкополосного сигнала, близкого к шумовому.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в том, что в ней **впервые:**

1. Разработан генератор на основе одиночного распределенного СИС перехода, излучающий когерентный сигнал на субТГц частоте в открытое пространство посредством передающей антенны.

2. Экспериментально измерено излучение на второй и третьей гармониках джозефсоновской генерации непосредственно на частоте соответствующей гармоники при настройке на основную частоту генератора.

3. Экспериментально установлена нетривиальная зависимость ширины спектральной линии генератора на основе BSCCO от температуры, при которой минимум ширины линии излучения наблюдается при температурах, далеких как от нулевой, так и от критической температуры. Полученную экспериментальную зависимость возможно качественно объяснить в рамках численной модели распределенной системы с присутствием в системе "горячего пятна" и градиента двух параметров переходов в массиве – критического тока и сопротивления.

4. Продемонстрирована взаимная синхронизация излучения от двух независимых генераторов на основе BSCCO, имеющих общий электрод из золота.

5. Измерена ширина спектральной линии генератора на основе массива джозефсоновских переходов в диапазоне 190-320 ГГц, охватывающем сразу несколько «ступеней» генерации, со спектральным разрешением много меньше ширины линии исследуемого сигнала.

6. Продемонстрирована возможность применения сверхпроводниковых генераторов в качестве активного источника для спектроскопии газов в субТГц диапазоне частот.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Предложен и экспериментально реализован источник субТГц диапазона частот, излучающего в открытое пространство, на основе нестационарного эффекта Джозефсона в распределённом джозефсоновском СИС переходе $Nb/AlO_x/Nb$ и Nb/AlN/NbN. Разработанный источник может быть универсально применён в любой задаче, где требуется субТГц источник с широкой перестройкой частоты и мощность на уровне от сотен нановатт до единиц микроватт является достаточной. Такими областями применения являются гетеродинный приём, спектроскопия газов, низкотемпературная микроскопия. Разработанный источник с рабочей температурой 4,2 К может быть успешно интегрирован в единую криогенную систему составного устройства, например, для исследования свойств материалов при низких температурах.

2. Непосредственное исследование гармоник джозефсоновской генерации может быть полезным не только для фундаментальных исследований генерации в сверхпроводящих структурах, но и давать более точные сведения в задачах метрологии и разработки стандартов – например, джозефсоновский стандарт напряжения, точность постоянной Джозефсона $2e/h$.

3. Исследование линии излучения генератора на основе BSCCO с высоким спектральным разрешением позволяет строить более точные численные модели многопараметрической системы, включающей массив джозефсоновских переходов, с учетом наличия геометрических резонансов, области «горячего пятна» (в нормальном состоянии), взаимодействия с подложкой и других механизмов. Результаты спектральных исследований и реализация фазовой стабилизации изучения также позволяют определять

возможные области применения как отдельных образцов генератора, так и исследуемого типа генераторов в целом.

4. Демонстрация взаимной синхронизации двух независимых генераторов на основе BSCCO, имеющих общий электрод, открывает потенциальную возможность для увеличения мощности выходного сигнала в узкой полосе путем синхронизации б**о**льшего числа генераторов без существенной деградации характеристик из-за тепловыделения в системе.

5. Демонстрация синхронизации излучения цепочки (отдельных частей цепочки) последовательно соединенных джозефсоновских переходов открывает целый спектр возможностей применений данного типа генераторов в задачах, где требуется высокая стабильность сигнала.

6. Эксперименты по использованию сверхпроводниковых генераторов в качестве активных субТГц источников сигнала для спектроскопии газов открывают большие перспективы для разработки лабораторных и промышленных систем спектроскопии для целого ряда областей – медицинская диагностика, системы безопасности, лабораторный анализ и исследования свойств материалов, мониторинг технологических процессов на производстве и т.д.

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использован широкий спектр методов и подходов. Для охлаждения сверхпроводниковых структур до криогенных температур использованы три различные криогенные системы 4,2 К в зависимости от конкретной задачи эксперимента:

- погружной зонд-вставка в сосуд Дьюара с жидким гелием, находящимся при нормальных условиях;
- вакуумный заливной криостат;
- вакуумный криостат на основе рефрижератора замкнутого цикла.

В вакуумных криостатах предусмотрен резисторный нагреватель для возможности изменения рабочей температуры в диапазоне от 4,2 К до ~90 К.

При проведении спектральных исследований с высоким разрешением использованы два супергетеродинных приёмника на основе СИС смесителя, работающие в различных частотных диапазонах. Для исследований в диапазоне от 480 до 750 ГГц использован интегральный приёмник [31, **A24**], совмещающий источник гетеродина на основе РДП и смесительный элемент на одной микросхеме. Данный приемник использовался для исследования как спектров излучения генераторов, так и спектров поглощения в газовой смеси. Для исследований в диапазоне 190-320 ГГц использован СИС приемник [32,**A2**] с умножителем на основе диода Шоттки в качестве внешнего источника гетеродина. В обоих случаях выходной спектр регистрировался при помощи коммерческого анализатора спектра с широким диапазоном настроек и предельным спектральным разрешением порядка 1 Гц.

При проведении широкополосных спектральных исследований использован лабораторный Фурье-спектрометр на основе оптического интерферометра Майкельсона, с высокочувствительным детектором на основе охлаждаемого до 4,2 К болометра из кремния в отдельном заливном криостате.

При построении численных моделей распределенных структур использовались как специализированные профессиональные пакеты программ по моделированию микроволновых структур, так и универсальные современные программы для численного моделирования на ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту

1. Генераторы на основе эффекта Джозефсона с системой излучения в открытое пространство пригодны для применения в областях, где требуется перестраиваемый источник непрерывного субтерагерцового излучения, в частности – в спектроскопии газов с высоким разрешением.

2. Диапазон рабочих частот перестраиваемого источника излучения в открытое пространство на основе распределенного джозефсоновского перехода $Nb/AlO_x/Nb$ либо Nb/AlN/NbN при использовании различных конструкций антенны составляет от 250 до 750 ГГц. Излучение такого

источника может быть стабилизировано по фазе к внешнему опорному сигналу при помощи системы фазовой автоподстройки частоты. Характерная мощность излучения составляет от долей до единиц микроватт.

3. Мощность излучения генератора на основе распределенного джозефсоновского перехода на второй и третьей гармониках достаточна для непосредственной регистрации спектральной линии соответствующей гармоники. Отношение ширины спектральной линии второй гармоники по отношению к ширине основной составляет около 4, что соответствует теоретическому значению.

4. Излучение от двух генераторов на основе $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$, расположенных на расстоянии порядка 200 мкм и имеющих общий электрод на основе пленки из золота и не связанных через базовый монокристалл, может быть синхронизировано при совпадении частоты их излучения в пределах 10 МГц.

5. Генератор на основе высокотемпературного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ может быть использован в качестве активного источника широкополосного шума для спектроскопии поглощения газов с высоким разрешением. Регистрируемые частота и параметры линии поглощения аммиака, в частности, зависимость ширины линии от давления газа, соответствуют табличным значениям, а экспериментальная оценка коэффициента, характеризующего поглощение в газе, соответствует теоретическим расчетам.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается применением современных экспериментальных методов, непротиворечивостью экспериментальных результатов и их согласием с результатами численного моделирования, с результатами других авторов и научных групп, а также воспроизводимостью результатов как в различных

экспериментах, так и с использованием различных экспериментальных образцов.

Апробация результатов

Результаты исследований, представленные в диссертации, докладывались на более 30 всероссийских и международных конференциях, симпозиумах, семинарах:

- Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (г. Нижний Новгород) – в 2013, 2022 и 2025 годах;
- International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT) – в 2014г. (Россия), 2019г. (Швеция).
- International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) - в 2014 г. (США), в 2019 г. (Франция);
- International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (THz-PLASMA) – в 2014г. (Япония), 2016г. (Китай);
- Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости (г. Москва) – в 2015 году;
- Школа-конференция с международным участием по Оптоэлектронике, фотонике и наноструктурам (г. Санкт-Петербург) – в 2016, 2018 и 2019 годах;
- Всероссийская микроволновая конференция (г. Москва) – в 2016, 2017, 2020, 2024 годах;
- Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (г. Нижний Новгород) – в 2018, 2020, 2021, 2024 и 2026 годах;
- Международная конференция «Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications» (г. Нижний Новгород) – в 2018 году;
- European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS) – в 2019 г. (Великобритания), 2021г. (Россия), 2023г. (Италия);
- URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC) – в 2019г. (Индия);

- Международная научая конференция «Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves» (RSEMW, с. Дивноморское, Россия) – в 2019, 2021, 2023 годах,

- Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наноэлектроника, Нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов) – в 2020г.;

- Научно техническая конференция «Генерация и синтез частот и сигналов» (г. Москва) – 2024 г.

Большинство докладов были представлены диссертантом лично. Результаты по разработке генератора на основе РДП получены в рамках гранта Российского научного фонда (РНФ) (проекты № 17-79-20343, 17-79-20343-П), выполненного под руководством диссертанта. Часть результатов по исследованию генератора на основе BSCCO получены в рамках адресного гранта Президента РФ для молодых учёных **№ СП-1852.2015.3**, а также молодежного гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) **№ 14-02-31374** под руководством диссертанта. Диссертант был удостоен Премии Правительства Москвы молодым ученым в 2018 году за значительный вклад в исследование сверхпроводниковых источников терагерцового излучения и разработку широкодиапазонного перестраиваемого ТГц генератора на основе туннельных наноструктур.

Результаты диссертационной работы вошли в материалы научно-исследовательской работы по грантам:

- РФФИ – проекты № 13-02-00493, **№ 14-02-31374** (диссертант – руководитель), № 14-02-91335, № 17-29-02354, № 17-52-12051, № 19-52-80023;
- Минобрнауки РФ – проекты № 14.607.21.0100, № 14.613.21.0046, № 075-15-2021-667;
- РНФ – проекты **№ 17-79-20343** и **№ 17-79-20343-П** (диссертант – руководитель), № 19-19-00618, № 23-79-00019, № 23-79-10262, № 24-19-00187.

Результаты диссертационной работы также получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2024-538).

Личный вклад автора

Все экспериментальные результаты, представленные в диссертационной работе, получены непосредственно автором лично либо при его определяющем участии. Использованные экспериментальные установки, за исключением блоков измерения вольтамперных характеристик, были собраны автором либо при непосредственном участии автора. Разработка дизайнов (конструкций) генераторов на основе РДП проводилась автором совместно с К. И. Рудаковым под руководством автора (непосредственное численное моделирование проведено К. И. Рудаковым). Экспериментальные исследования генераторов на основе ВТСП структур проводились совместно с коллегами из Нанкинского Университета (Китай) и Университета Тюбингена (Германия), а построение численных моделей – совместно с коллегами из Университета Тюбингена. Спектральные измерения генераторов на основе цепочек СИС контактов проводилось совместно с М. А. Галиным, а отладка криогенной части приемной системы – совместно с А. В. Худченко. Эксперименты по поглощению широкополосного сигнала генератора на основе ВТСП проводилось совместно с Е. А. Собакинской, автор также участвовал в сравнительном анализе экспериментальных и теоретических результатов модели поглощения (определяющий вклад в теоретические расчеты – В. Л. Вакс и Е. А. Собакинская).

Автор принимал участие в написании всех статей по теме диссертации и постановке задачи всех исследований. Обсуждение научных результатов проводилось совместно со всеми соавторами публикаций диссертанта. Более подробное описание вклада в работу отдельных соавторов диссертанта приведено в разделе диссертации «Вопросы авторства, благодарности».

Соответствие направления диссертационного исследования специальности

В диссертационной работе разрабатываются практические устройства для генерации в субТГц диапазоне частот и исследуются как их

характеристики, так и области возможных применений, что соответствует сразу трем направлениям исследования научной специальности 1.3.4 «Радиофизика» в соответствии с паспортом специальности – 1. ...Поиски путей создания высокоэффективных источников когерентного излучения миллиметрового, субмиллиметрового и оптического диапазонов, техническое освоение новых диапазонов частот и мощностей; 2. Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах; 3. Разработка и исследование новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов: резонаторов, волноводов, фильтров и антенных систем в радио, оптическом и ИК – диапазоне.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 46 статей, все из которых (46) входят в рецензируемые научные журналы из перечня ВАК и перечня «Белого списка», из них – 32 в зарубежных научных изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и Scopus, 2 коллективные монографии, 2 патента на изобретение.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 197 наименований. Общий объём диссертации составляет 347 страниц.

Глава 1

Обзор литературы. Постановка целей и задач исследования

1.1. Терагерцовый диапазон в современной науке и технике

В современной радиофизике существует так называемая проблема «терагерцового провала» (пер. с англ. *terahertz gap*), которая заключается в отсутствии практичных, недорогих в изготовлении и относительно простых в использовании источников и приемников ТГц диапазона (0,3 – 10 ТГц) [33-34]. В русскоязычной литературе также встречаются варианты перевода «терагерцовая щель» и «терагерцовая яма», все перечисленные термины равнозначны по смыслу обозначаемой проблемы.

Электромагнитные волны ТГц диапазона пролегают между волнами миллиметрового и инфракрасного (ИК) диапазона. Терагерцовое излучение невидимо невооруженным глазом и в сравнении, например, с рентгеновским излучением является абсолютно безопасным, неразрушающим и неинвазивным. По меркам истории развития науки, терагерцовые технологии – это достаточно молодая область, поэтому усилия многих исследователей по всему миру в настоящее время направлены на создание практических систем, работающих в ТГц диапазоне частот. До того, как в литературе ТГц диапазон начали выделять как отдельную область спектра электромагнитного излучения, его номинально включали в дальний ИК диапазон либо в субмиллиметровый диапазон волн. По мере приближения к терагерцовым частотам значительно падает эффективность как электронных устройств и вакуумных приборов (со стороны СВЧ), так и оптических устройств (со стороны ИК диапазона), основанных на межуровневых переходах в атомах.

На протяжении ушедшего столетия (XX век) ТГц область использовалась преимущественно только в астрономии и, в меньшей степени, лабораторной спектроскопии. Причина этого состоит в том, что подавляющая

часть электромагнитного излучения в космическом пространстве лежит именно в области терагерцовых частот [1-3,32,35]. Межзвёздная материя, молекулярный газ в галактиках, включая Млечный Путь, космическая пыль, реликтовое излучение – все эти объекты имеют выраженный пик излучения в терагерцовом диапазоне. Исследований на этих частотах уже дали и продолжают давать важнейшую информацию для космологии и астрономии, о физике Галактики, галактических объектов и межгалактической среды, Солнечной системы и даже черных дыр [36].

Приемные системы ТГц диапазона также используются в миссиях по исследованию атмосферы Земли [4,37-38], поскольку в атмосфере содержится много веществ, в том числе ответственных за разрушение озонового слоя, молекулы которых имеют линии излучения (колебательные, вращательные переходы) в данной области. Так, например, в рамках международного проекта TELIS (*Terahertz Limb Sounder*) по исследованию атмосферы Земли были проведены три успешных запуска прибора на полигоне *Esrange* в Швеции и один на полигоне *Timmins* в Канаде, во время которых получено большое количестве научной информации, в том числе спектры излучения наиболее важных атмосферных газов (ClO, HCl, изотопы H_2O, NO_2, O_3, BrO и др.) в диапазоне высот 20 - 35 км.

С развитием лазерной терагерцовой спектроскопии с временным разрешением (англ. *TDS – time-domain spectroscopy*) в 1980-х и 1990-х годах ТГц техника быстро расширилась до такой степени, что теперь используется во многих областях – от фундаментальной науки до практических устройств. К областям применений ТГц диапазона, в которых последние два десятка лет активно ведутся либо уже созданы практические устройства, следует также отнести:

- системы безопасности (противодействие терроризму) – выявление взрывчатых, отравляющих и других опасных веществ по спектрам молекул-маркеров, а также построение ТГц изображений через оптически

непрозрачные предметы (покрытия), такие как одежда, упаковка, стенки чемодана [5,7,9,10,11,34];

- охрана окружающей среды - мониторинг и определение состава загрязнения среды обитания продуктами жизнедеятельности на уровне предельно допустимых концентраций [9,34];

- контроль технологических процессов на производстве – определение концентраций газов, выявление утечек и т.д., контроль продукции [9,34];

- медицина – неинвазивная неразрушающая диагностика большого спектра заболеваний методом исследования выдыхаемого воздуха и образцов живых тканей в ТГц диапазоне, контроль дефектов покрытия таблеток, химический анализ лекарственных препаратов [6,34,39,40];

- системы связи, информационно-телекоммуникационные технологии – высокоскоростные системы приема и передачи данных, в том числе 6G и аналогичные [9];

- химия и биология – исследование состава сложных химических соединений, в том числе ДНК, белков и т.д. [8,9,34,40];

- физика и электронная техника, терагерцовая микроскопия – исследование поверхностей и обнаружение дефектов, исследование состава и характеристик объектов и структур, в том числе наноматериалов и наноструктур [7,9,34].

1.2. Современное состояние источников терагерцового и субтерагерцового диапазона

Практически все существующие источники ТГц диапазона изготавливаются в единичных экземплярах, большинство из них являются уникальными лабораторными разработками отдельных научных и производственных групп. Поэтому такие источники слабо доступны для широкого использования и исследования. Коммерчески доступные источники сложны в изготовлении и, как следствие, имеют низкую воспроизводимость

характеристик и высокую стоимость. Так, например, наиболее традиционные лампы обратной волны, работающие в диапазоне выше 300 ГГц, перестали производиться промышленным образом более 3х десятилетий назад из-за высокой сложности изготовления замедляющих систем. При этом, до прекращения производства, единственным в мире серийным производителем ЛОВ было предприятие, находящееся в г. Фрязино, СССР. Кроме того, даже при наличии собственно ЛОВ, для её работы как ТГц источника необходимо встраивание лампы в мощный постоянный либо электромагнит с тонкой геометрической юстировкой, что, как правило, является непростой технической задачей и производится собственными силами. Источники на основе квантово-каскадных лазеров являются штучными экземплярами с уникальными характеристиками из-за низкой воспроизводимости технологии, а источники на основе полупроводниковых умножителей частоты практически недоступны для приобретения на территории РФ по причине недоступности для отечественного рынка усилителей СВЧ сигналов от зарубежных производителей. Фактическая ситуация состоит в том, что ни один из существующих типов ТГц генераторов не рассчитаны на массовое производство и массовое потребление.

Другой стороной проблемы является крайне низкий коэффициент полезного действия (КПД) источников ТГц диапазона – не более 0,1 %, что является прямым следствием малой энергетической эффективности механизмов генерации/преобразования. Так, например, КПД источника на основе ЛОВ диапазона 0,9-1,1 ТГц составляет не более 0,01%: для генерации излучения мощностью ~1-10 мВт требуется питание источника эмиссии электронов (порядка 5 В*1,5А = 7,5 Вт), а также подача напряжения порядка 5кВ на замедляющую систему, что при токе 50 мА приводит к рассеиваемой мощности 250 Вт, т.е. суммарная затрачиваемая мощность составляет ~0,25 кВт, а КПД в описанном случае (при мощности выходного сигнала 10 мВт) составляет 0,004%. Значительно лучше ситуация с эффективностью у квантово-каскадных лазеров (ККЛ), у которых КПД может достигать 0,1%:

профильные специалисты ориентируются на мощность генерации на уровне 1 мВт при рассеиваемой мощности 1 Вт. Однако, в данную оценку не входит мощность, затрачиваемая на охлаждение полупроводниковой структуры (криогенную систему), которое необходимо для достижения генерации, поскольку при комнатной температуре энергетические уровни электронов слишком широкие. Таким образом, если в рассеиваемую мощность ККЛ необходимо добавить мощность, затрачиваемую на охлаждение, КПД источника при таком расчете уменьшится на 1-2 порядка. Похожая ситуация (КПД на уровне 0,1%) наблюдается у умножителей частоты на основе диодов Шоттки: согласно спецификации производителя на коммерческий умножитель с диапазоном выходных частот 220-330 ГГц, при потребляемой мощности 20 Вт выходная мощность сигнала составляет порядка 10 мВт, что должно приводить к КПД на уровне 0,05%. Однако, в данном расчете не учтены затраты не генерацию исходного сигнала СВЧ, подаваемого на вход умножителя (требуется сигнал мощностью порядка 0 dBm = 1 мВт, в рабочем тракте дополнительно установлены усилители СВЧ), поэтому при условии равной потребляемой мощности генератора СВЧ (20 Вт и выше) КПД общего устройства источника оказывается в ~2 или несколько раз меньше.

Ниже обозначены некоторые детали современного статуса узкополосных (по спектральной ширине выходного сигнала), при этом хоть сколько-нибудь перестраиваемых по несущей частоте источников непрерывного излучения в ТГц диапазоне.

Наиболее традиционными устройствами для генерации в ТГц диапазоне являются вакуумные электронные устройства. За много десятков лет они значительно развились и повысили частоты генерации из диапазона СВЧ до ТГц частот, мощность выросла от милливатт до мегаватт. При этом на протяжении долгого времени (до 80-90хх годов прошлого века) они оставались единственным типом генераторов в ТГц диапазоне, обладающим достаточной мощностью для практических задач своего времени. Вакуумные электронные устройства преобразуют накопленную электрическую энергию в

кинетическую энергию пучка ускоренных электронов, которая затем преобразуется в энергию электромагнитного поля с помощью электромагнитных волноводов или резонаторов (область или контур взаимодействия электронов с системой). Существует множество устройств такого типа: лампы бегущей волны, лампы обратной волны, клистроны, магнетроны, гиротроны, и применяются в спутниковой связи, радарах, дистанционном зондировании и обнаружении угроз, приготовлении пищи в домашних условиях, промышленном отоплении, освоении космоса и научных исследованиях [41]. В общем случае, максимально достижимая частота определяется технологиями изготовления и теоретическим соотношением масштабирования вида $P \sim 1/f^2$, где P – мощность, f – рабочая частота генерации [42]. Из-за физических ограничений в управлении плотностью мощности, такие устройства представляют собой единственное практичное решение для высокомощных эффективных источников излучения частотой в субТГц диапазоне. На рисунке 1.1 представлен обзор современного состояния вакуумных электронных устройство по частоте и мощности генерации, взятый из работы [34]. Генераторы и усилители успешно работают в области до 1 ТГц с выходной мощностью от 10 мВт до 1 МВт, подобный разброс рабочих характеристик (9 порядков по мощности) не встречается больше ни в одной из существующих технологий. Возможность достижения исключительно высокой общей эффективности источника за счет рекуперации энергии отработанного электронного пучка доступна только для вакуумных устройств и не достижима в других типах компактных источников ТГц излучения. Разработки в области усилителей и генераторов диапазона 0,1-1,5 ТГц с выходной мощность на уровне единиц Ватт, что достаточно для преодоления затухания в атмосфере, и с размерами не более нескольких дм^3 позволяют создавать новое поколение высокоскоростных гигабитных сетей мобильной связи, радаров высокого разрешения и систем дистанционного зондирования, способных работать даже в условиях тумана, пыли и других взвесей частиц или газа, препятствующих распространению радиоволн.

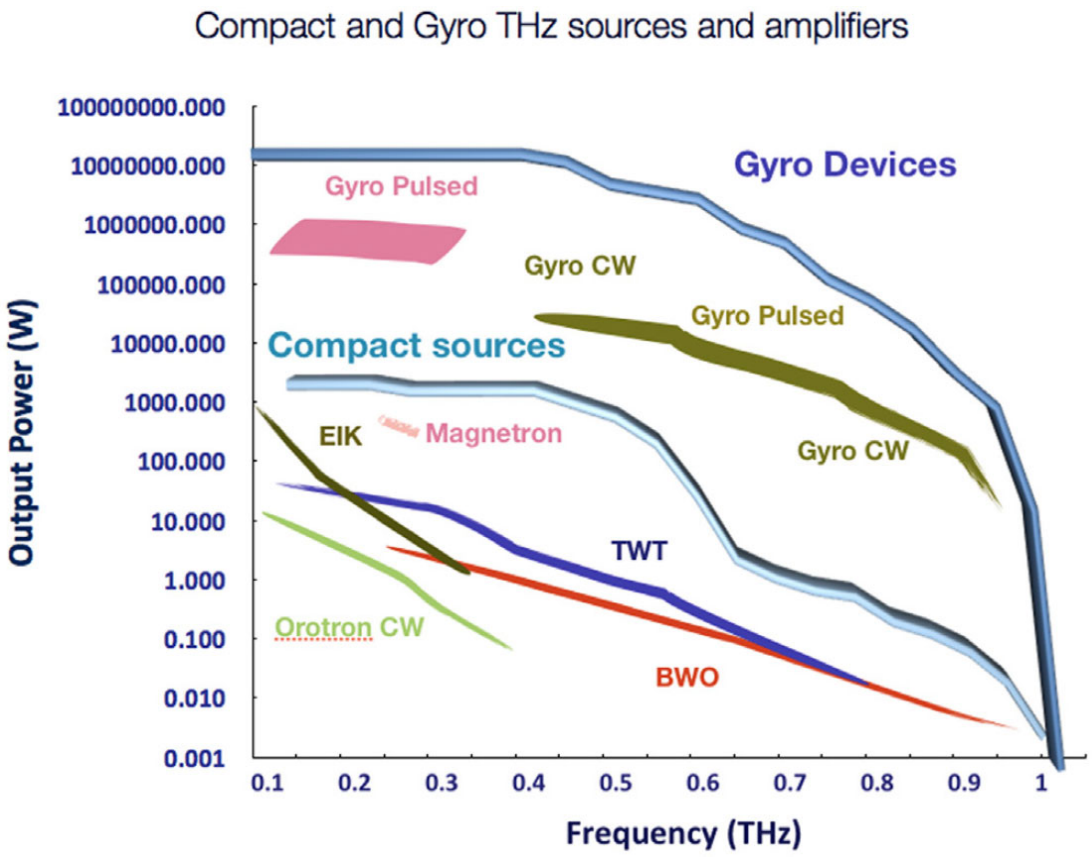


Рисунок 1.1 – Сравнительный обзор различных типов вакуумных электронных устройств субТГц диапазона [34].

Принцип работы источников непрерывного ТГЦ излучения на основе фотосмесителя заключается в смешении сигналов двух лазерных источников на частотах f_1 и f_2, отличающихся на величину f_{THz}: $f_2 = f_1 + f_{THz}$. В данной технологии используются лазеры ИК- и ближнего ИК-диапазона, на основе материалов GaAs, InGaAs, InP, $LiNbO_3$, с характерной длиной волны излучения 1050-1550 нм. ТГц генерация происходит за счет генерации электронов и дырок в полупроводниках с ТГц частотой за счет интерференции лазерных пучков на близко расположенных частотах f_1 и f_2, при вычитании которых (за счёт смешения) получается сигнал на частоте f_{THz}. Физически, в области генерации происходит интерференция пучков, приводящая к модуляции интенсивности на терагерцовой частоте, и, следовательно, генерации носителей заряда. Излучение возникает либо непосредственно вследствие когерентного по фазе ускорения отдельных сгенерированных носителей, как правило в относительно большой области, либо вследствие

коллективного тока этих носителей, сосредоточенных в маленькой области и направленных на антенну – различные случаи представлены на рисунке 1.2 из работы [12]. Описанные случаи в работах по ТГц источникам на фотосмесителях разделились по конструктивной реализации на два фронта, соответственно, – антенный излучатель (англ. *antenna emitter*) и излучатель большой площади (англ. *large area emitter*). Диапазон перестройки источника определяется диапазоном перестройки лазеров и может достигать 2 ТГц в наилучших работах. Наиболее типичные рабочие частоты демонстрируются, как правило, в диапазоне 0,5 - 1 ТГц, а выходная мощность составляет от сотен мкВт до единиц мВт, при этом сильно падает с ростом частоты из-за экспоненциального падения эффективности преобразования. Работы по улучшению характеристик таких источников направлены, в основном, на повышение эффективности преобразования и эффективности антенны [12,13].

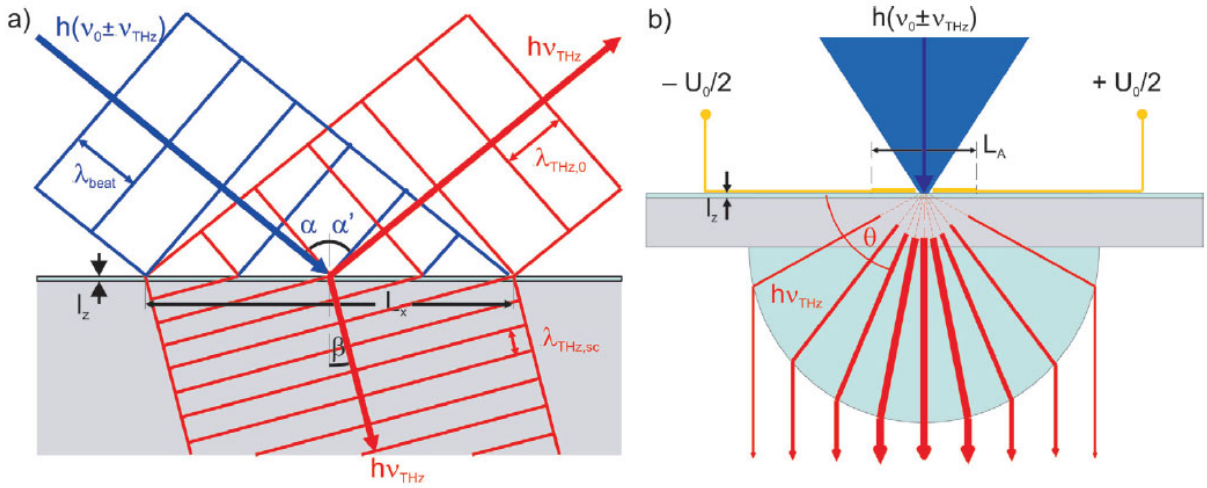


Рисунок 1.2 – Два способа конструктивной реализации ТГц источника на основе фотосмесителей: (a) взаимодействие лазерных пучков и генерация сигнала на большой площади, (b) взаимодействие лазерных пучков в малой области с выводом на передающую антенну [12].

Прогресс в технологиях изготовления наноструктур с контролируемыми параметра привел к развитию одного из популярных на сегодняшний день типов источника – квантово-каскадный лазер. Первый ККЛ был разработан и

представлен в 1994 году [43], после чего, спустя практически 10 лет, был продемонстрирован ККЛ с рабочей частотой 4,4 ТГц [44]. Терагерцовый сигнал излучается вследствие релаксации электронов между подзонами квантовых ям, например, между несколькими слоями GaAs толщиной в несколько нм, разделенными барьерами $Al_xGa_{1-x}As$ и последовательно соединенными в каскад секций. Три основных реализации (механизма генерации) в литературе обозначаются как «связанный-с-континуумом» (англ. "*bound-to-continuum*") [45], «переплетенный», «чересстрочный» (англ. "*interlaced*") [46] и на основе фононного резонанса (англ. "*resonant phonon*") [47]. Обозначенные реализации различаются механизмом рассеяния электронов после излучения ТГц фотонов в результате инверсии населенности. Мощность современных ККЛ составляет десятки милливатт с рекордными значениями на уровне ~1 Вт. Движения по частоте в процессе развития технологии происходит «вниз» из области среднего ИК диапазона – напр., известна работа [48] в резонансно-фононном ККЛ с частотой 1,39 ТГц при приложении магнитного поля. Для работы ККЛ необходима криогенная система охлаждения, поскольку при комнатной температуре электронные уровни в атоме слишком широкие, что приводит к низкой эффективности либо полному отсутствию генерации. Наилучшие результаты демонстрируются при температурах порядка 20-40 К, рекордные же значения температуры достигают уровня 210 К с выходной мощностью порядка 200 мВт [15]. Усилия в современных работах по развитию ККЛ направлены на повышение рабочей температуры с целью упрощения устройства и коммерциализации, на понижение рабочей частоты в область ниже 1,5 ТГц, а также на улучшение энергоэффективности и увеличение выходной мощности для задач, где достигнутого уровня мощности по-прежнему недостаточно.

Единственным типом генераторов в ТГц диапазоне, который достиг уровня серийного коммерческого производства, можно считать полупроводниковые умножители частоты, преимущественно на диодах Шоттки [16-17]. Принцип заключается в кратном умножении на целое число

m частоты входного сигнала СВЧ за счёт нелинейности ВАХ барьерной структуры диода или решеточной системы. Достижение высоких характеристик с воспроизводимыми параметрами стало результатом, прежде всего, технологического прогресса в изготовлении предельных размеров микроструктур с использованием электронно-лучевой литографии, а также уменьшение паразитных помех благодаря новым топологиям устройств. Успеху в развитии также способствовало параллельное развитие мощных усилителей W-диапазона (75-110 ГГц), недоступность которых для широкого рынка и накладывает ограничение на локальные разработки умножителей. Такие источники являются достаточно компактными, потребляют относительно мало мощности питания, работают при комнатной температуре с тривиальной системой воздушного охлаждения и возможностью улучшения характеристик за счёт более продвинутого специального охлаждения.

Различные типы конструкции полупроводниковых гетероструктур, используемых в диодах Шоттки, представлены на рисунке 1.3.

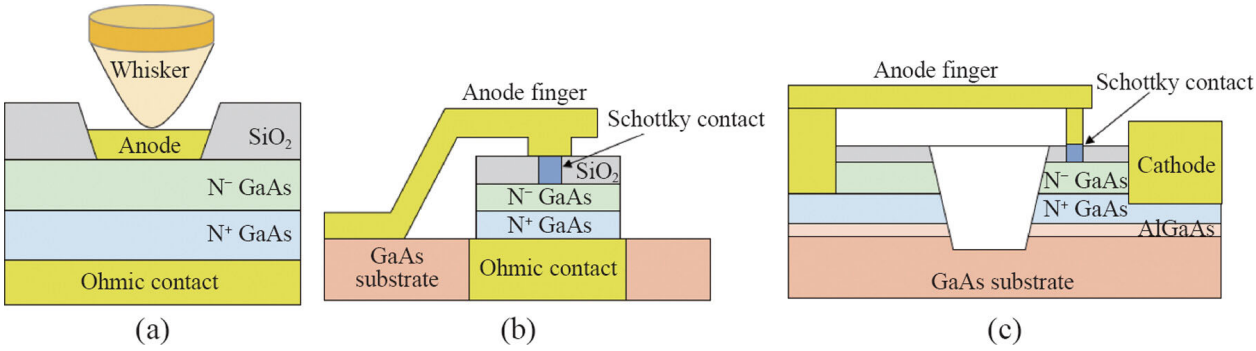


Рисунок 1.3 – Конструктивные реализации диодов Шоттки: (a) диод с щупальцеобразным контактом, (b) квазивертикальный планарный диод, (c) планарный диод с поверхностным каналом [17].

Мощность падает экспоненциально с ростом частоты (ростом номера гармоники), в научных работах демонстрируются следующие рекордные характеристики по мощности в разных частотных диапазонах: ~50 мВт в области 200 ГГц [49], ~7 мВт в области 400 ГГц, 2-3 мВт в области 600 ГГц

[50], ~1 мВт в области 850 ГГц [51], несколько мкВт в области 2,5-2,7 ТГц [52]. На сегодняшний день в качестве верхнего предела достигнутой частоты источников на основе умножителей на диодах Шоттки демонстрируется ~3-4,7 ТГц [53], однако для их работы на ~6-8й гармонике требуется входной сигнал на частоте около 600 ГГц, который, как правило, также является результатом умножения частоты синтезатора ~10 ГГц (~60-я гармоника).

Помимо диодов Шоттки следует отметить смежную технологию умножителей на основе квантовых полупроводниковых сверхрешеток [54-56], одна из реализаций которой продемонстрирована на отечественном пространстве в научных организациях Нижнего Новгорода под руководством Д.Г. Павельева. В отличии от умножителей на диодах Шоттки, где используются промежуточные усилители сигнала СВЧ в каскадах умножения до 100 ГГц и выше 100 ГГц, в данной технологии на вход умножителя подаётся изначально сигнал высокой мощности на субТГц частоте (от 100 до 250 ГГц). Выходная мощность для таких умножителей примерно на 2 порядка ниже, чем для умножителей на диодах Шоттки на одинаковых частотах, преимущество же заключается именно в отсутствии необходимости использования промежуточных усилителей, зачастую недоступных для приобретения. Так, в работе [54] демонстрируется сигнал третьей гармоники на частоте 300 ГГц (входная частота 100 ГГц) с мощностью порядка 30 мкВт, в работе [55] продемонстрирована работа на 11й гармонике ЛОВ с выходной частотой 2,7 ТГц, а в отечественной работе [56] сообщается о выходной частоте 8,1 ТГц на 54-й гармонике сигнала 150 ГГц от ЛОВ, с мощностью на уровне долей нановатта.

1.3. Сверхпроводниковые генераторы на нестационарном эффекте Джозефсона

1.3.1. Эффекты Джозефсона и физические эффекты в джозефсоновских контактах

Существует тип сверхпроводниковых источников ТГц диапазона, основанный на эффекте Джозефсона, который наблюдается в слабой связи двух сверхпроводников. Описание состояния области исследования генераторов данного типа в настоящей Главе вынесено в отдельный раздел, поскольку диссертационная работа посвящена разработке и исследованию генераторов именно данного типа.

Британский физик Брайан Джозефсон в 1962 году теоретически предсказал ряд новых микроскопических эффектов [18], которые возникают в случае, если организовать слабую связь между двумя сверхпроводниками. Данное предсказание достаточно скоро было подтверждено экспериментально [57], что открыло целый ряд новых научных направлений, исследованием которых занимаются до сих пор, а сам Б. Джозефсон в 1973 году получил нобелевскую премию. Открытые им эффекты называют эффектами Джозефсона, а систему из двух сверхпроводников со слабой связью называют джозефсоновским *контактом* или джозефсоновским *переходом* (данные термины идентичны по смыслу). Самым используемым на сегодняшний день типом джозефсоновского контакта является туннельный переход «сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник» (СИС), являющийся по сути гетероструктурой в полной аналогии с полупроводниковыми многослойными барьерными структурами, но термином «гетероструктура» по отношению к сверхпроводящим переходам не пользуются. Понятия *СИС перехода* и *СИС контакта* также равнозначны по смыслу.

Интересно отметить, что многие современные применения СИС переходов не используют непосредственно эффекты Джозефсона как таковые,

а используют лишь сильную нелинейность ВАХ электрического элемента. Более того, один из эффектов Джозефсона (первый, или стационарный) является паразитным в одной их важнейших областей применения СИС переходов – сверхчувствительный приём слабых сигналов с квантовым уровнем чувствительности, поскольку взаимодействие «критического» тока через контакт с внешним излучением приводит к нежелательным эффектам в приемной системе. Тем не менее, большой пласт «джозефсоновской терминологии» – эффект, контакт, переход, фаза, константа $2e/h$, глубина проникновения – неизбежно закрепился в научном мире, даже когда сам по себе эффект не используется как рабочий механизм того или иного устройства.

Слабой связью принято называть такой контакт между двумя сверхпроводниками, который не меняет в них существенно квантовое состояние (волновую функцию) бозе-конденсата куперовских пар, а играет роль возмущения. В таком случае возникает единая волновая функция сверхпроводника, которую можно рассматривать как суперпозицию (результат интерференции) волновых функций сверхпроводников, разделенных слабой связью. Согласование (связь) их волновых функций и является слабой связью сверхпроводников. Существует много различных конструктивных способов установить слабую связь – туннельный СИС переход, переход вида «сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник», точечный контакт, мостик из сверхпроводника переменной толщины в различных вариациях, пленка из сверхпроводника с прилегающим нормальным металлом, локально понижающим параметр порядка за счет эффекта близости, и другие. В 1960-1980хх годах исследование эффектов Джозефсона и связанной с ними физики производилось преимущественно на точечных контактах и СИС переходах на основе олова и свинца. С развитием технологического прогресса в области формирования тонкоплёночных микростуктур высокого качества заданной геометрии основным видом джозефсоновских контактов стали СИС (либо СИН) переходы на основе

ниобия и его соединений либо алюминия, а точечные контакты перестали использоваться.

Первый, он же стационарный эффект Джозефсона, заключается в том, что через джозефсоновский контакт может протекать бездиссипативный ток, то есть без падения напряжения. Максимальная величина тока, способного протекать без падения напряжения, называется критическим током и обозначается I_c. Для характеризации перехода (структуры) иногда пользуются величиной критического тока, умноженного на сопротивление нормального состояния перехода R_n, что даёт характерное напряжение перехода V_c [58]:

$$V_c = I_c \cdot R_n \,, \tag{1.1}$$

которое, чтобы не вводить дополнительное обозначение, часто так и обозначают $I_c R_n$. Далее, протекающий бездиссипативный ток зависит от разности фаз $\varphi = \theta_1 - \theta_2$ между электродами, где θ_1 и θ_2 – фазы волновой функции берегов джозефсоновского контакта; при нулевой разности фаз ($\varphi = 0$) либо смещенной на целое количество 2π ток будет отсутствовать. Разность фаз φ между берегами (электродами) джозефсоновского контакта для простоты называют джозефсоновской фазой. Существуют различные ток-фазовые соотношения между протекающим через контакт «сверхпроводящим» током I_s и критическим (максимально возможным) током, наиболее простым и часто встречающимся является синусоидальное ток-фазовое соотношение

$$I_s(\varphi) = I_c \sin \varphi. \tag{1.2}$$

Такая зависимость характеризует туннельный СИС переход во всём диапазоне температур (т.е. пока сверхпроводящие берега являются таковыми), а также некоторые типы слабых связей вблизи критической температуры сверхпроводника T_c, где хорошо применима теория Гинзбурга-Ландау [58,59]. Несмотря на то, что для других типов связи используются иные ток-фазовые соотношения, зачастую первый эффект Джозефсона ассоциируют именно с соотношением (1.2) как наиболее часто используемым.

Ключевым в исследовании настоящей **диссертационной работы** является второй, он же **нестационарный эффект Джозефсона,** который

заключается в возникновении высокочастотных осцилляций электромагнитного поля в джозефсоновском контакте при падении постоянного (усредненного по времени) напряжения V на берегах контакта. Частота таких осцилляций f определяется соотношением Джозефсона

$$2eV = hf\,, \tag{1.3}$$

где e – заряд электрона, h – постоянная Планка. В более фундаментальном виде соотношение Джозефсона, полученное непосредственно из решения уравнения Шредингера $i\hbar\,\partial\varphi/\partial t = \hat{H}\psi$, где ψ – волновая функция квантовой системы, $\hat{H}$ – гамильтониан системы, t – время, $\hbar = h/2\pi$ – приведенная постоянная Планка, выглядит следующим образом:

$$2eV = h\,\partial\varphi/\partial t\,, \tag{1.4}$$

при этом соотношение (1.3) определяет частоту основной гармоники осцилляций. Уникальность данного эффекта состоит в том, что для генерации высокочастотного сигнала достаточно приложить напряжение к джозефсоновскому контакту, при этом частота генерации линейно пропорциональна приложенному напряжению с коэффициентом $2e/h$ = 483,6 ГГц/мВ (или 483,6 МГц/мкВ), определяющимся лишь мировыми константами – зарядом электрона и постоянной планка. Константу $2e/h$ принято называть джозефсоновской.

Поскольку, в общем случае решение уравнения (1.4) необязательно приводит к синусоидальному виду изменения фазы, в спектре джозефсоновской генерации могут содержаться и высшие гармоники с частотами

$$f_{\mathrm{N}} = N\cdot(2e/h)\cdot V\,, \tag{1.5}$$

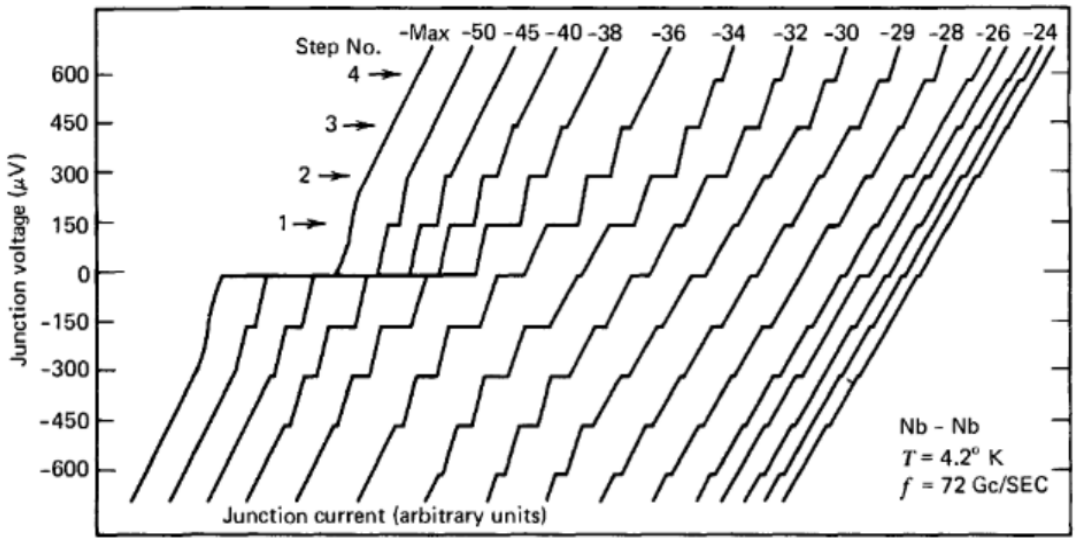
где N – номер гармоники (целое положительное число). Существование гармоник предсказано и численно описано достаточно давно в некоторых упрощённых моделях джозефсоновского перехода (см., например, [60-61]), а также продемонстрировано косвенным образом по наблюдению особенностей на вольтамперных характеристиках [62]. В других работах регистрировался похожий эффект, заключающийся в генерации гармоник внешнего сигнала на

сверхвысокой частоте, поданного на джозефсоновский контакт [63-64], т.е. контакт работал в качестве умножителя частоты. Поскольку общая мощность выходного излучения джозефсоновского перехода достаточно низкая — от нескольких единиц до сотен нановатт, а мощность высших гармоник значительно меньше мощности основной гармоники, прямые экспериментальные наблюдения джозефсоновских гармоник на истинной частоте генерации (не по измерению особенностей на ВАХ или отклика на промежуточной частоте смесителя) до исследования в настоящей диссертационной работе не проводились.

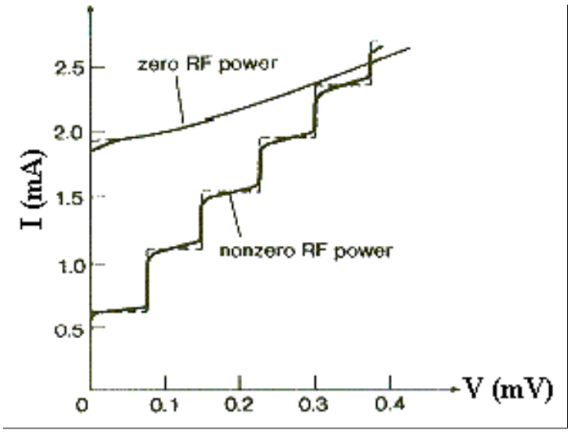
Необходимо отметить ещё ряд физических механизмов, которые прямо или косвенно будут фигурировать в диссертационной работе. Первые экспериментальные подтверждения джозефсоновской генерации были получены практически сразу же после открытия эффекта – в 1963 году. При приложении к контакту внешнего высокочастотного сигнала в результате частотной синхронизации джозефсоновской генерации и внешнего сигнала возникают резонансы, которые проявляются на ВАХ в виде ярко выраженных ступенек тока при напряжениях

$$V_n = n\,(h/2e)\,f_0\,, \qquad (1.6)$$

где f_0 – частота внешнего излучения, $n = \pm1, \pm2, \ldots$ Впервые этот эффект наблюдал Сидней Шапиро в работе [65], именем которого и названы ступени в современной литературе (ступени Шапиро). Пример таких ступенек показан на рисунке 1.4.



(а)



(б)

Рисунок 1.4 – Ступени Шапиро на ВАХ джозефсоновского контакта: (а) СИС перехода на основе Nb/Nb под воздействием сигнала на частоте 72 ГГц, рисунок из книги [19]; (б) точечного контакта под воздействием сигнала на частоте 35 ГГц, рисунок взят в Интернете из курса лекций по ступеням Шапиро университета Копенгагена [66].

Другим важным аспектом является взаимодействие джозефсоновского контакта с внешним постоянным магнитным полем. Согласно эффекту Мейсснера, магнитное поле выталкивается из массивного сверхпроводника, проникая внутрь него лишь на характерную микроскопическую величину – лондоновскую глубину проникновения λ_L, составляющую порядка нескольких десятков нанометров и зависящую от материала и его толщины. К примеру, для массивного ниобия данная величина, согласно табличным значениям,

составляет 47 нм, при этом для тонких пленок ниобия в различных работах сообщаются значения в среднем от 75 до 90 нм. Далее, при приложении к джозефсоновскому контакту слабого магнитного поля в плоскости барьера, поле проникает внутрь контакта на величину, называемую джозефсоновской глубиной проникновения (или джозефсоновской длиной, в зависимости от контекста рассматриваемой задачи) λ_J , которая определяется выражением

$$\lambda_J^{\,2} = \frac{\hbar c^2}{8\pi e j_c d} = \frac{c\Phi_0}{8\pi^2 j_c d}\,, \tag{1.7}$$

где $\Phi_0 = \pi\hbar c/e$ – квант магнитного потока, определяемый фундаментальными константами, $j_c = I_c/S$ – плотность критического тока, d – «электрическая» или «эффективная» толщина туннельного барьера, в которой протекает сверхпроводящий ток и существует магнитное поле. Эта толщина определяется выражением

$$d = d_0 + \lambda_L{}^1 + \lambda_L{}^2\,, \tag{1.8}$$

где d_0 – физическая толщина барьерного слоя, $\lambda_L{}^1$ и $\lambda_L{}^2$ – лондоновская глубина проникновения в каждый из электродов джозефсоновского контакта (прим.: верхний индекс в данном случае означает номер электрода, но не возведение в степень). В случае использования одинаковых материалов электрода $d = d_0 + 2\lambda_L$. Выражение (1.8) записано в приближении, когда толщина электродов значительно больше лондоновской глубины проникновения в соответствующий электрод. В случае, когда они соизмеримы, следует пользоваться более точным выражением

$$d = d_0 + \lambda_L{}^1 \coth\left(\frac{d_1}{\lambda_L{}^1}\right) + \lambda_L{}^2 \coth\left(\frac{d_2}{\lambda_L{}^2}\right)\,, \tag{1.9}$$

где d_1 и d_2 – толщины сверхпроводящих электродов джозефсоновского контакта. В случае $d_1 >> \lambda_L{}^1$ и $d_2 >> \lambda_L{}^2$ выражение (1.9) вырождается в (1.8).

Геометрия проникновения слабого магнитного поля в переход схематично изображена на рисунке 1.5. Джозефсоновская глубина, в отличие от лондоновской глубины, является макроскопической величиной. Выражение (1.7) в системных единицах записывается в виде

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{\Phi_0}{2\pi\mu_0 j_c d}}\ , \qquad (1.10)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м. Если взять некоторые характерные значения для СИС перехода на основе $Nb/AlO_x/Nb$ с плотностью тока 1 кА/см^2, физической толщиной барьера d_0 в несколько нанометров и толщиной электродов от 300 нм (в несколько раз больше λ_L^{Nb}), то «электрическая» толщина барьера составит $d \approx 2\lambda_L^{Nb} \approx 150$ нм, а λ_J составит около 25 мкм, т.е. более чем на 2 порядка больше лондоновской глубины.

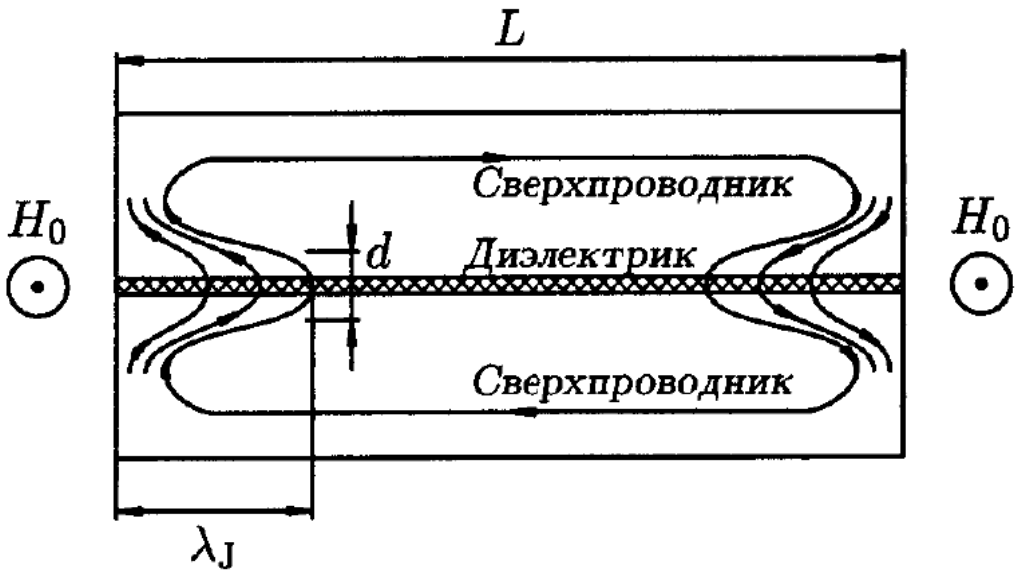


Рисунок 1.5 – Проникновение магнитного поля в СИС переход, помещенный в магнитное поле H_0. Стрелками показано распределение экранирующего (мейсснеровского) тока [59, с.143].

Интересен случай приложения сильного магнитного поля к переходу. Когда прикладываемые поле оказывается больше некоторой критической величины H_c, становится энергетически выгодным проникновение джозефсоновских вихрей внутрь перехода, каждый из которых имеет характерный размер $2\lambda_J$ вдоль перехода и несет в себе квант магнитного потока Φ_0. Значение критического поля вычисляется из уравнения Ферелла-Прейнджа и равняется

$$H_c = \frac{2}{\pi^2}\frac{\Phi_0}{\lambda_J d}\,. \tag{1.11}$$

На рисунке 1.6 схематично изображено проникновение магнитного поля в переход в виде джозефсоновских вихрей, а также распределение туннельного сверхпроводящего тока через переход, который при этом возникает [59].

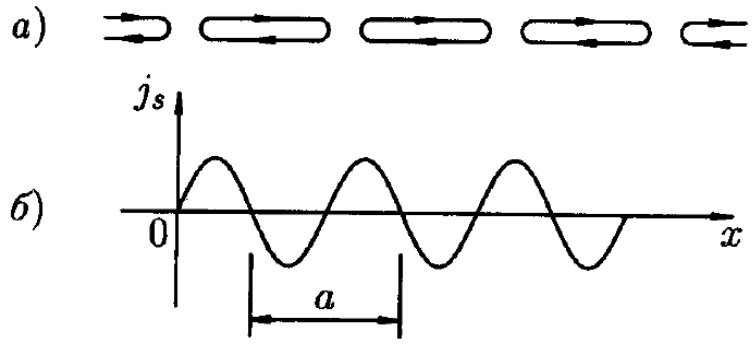


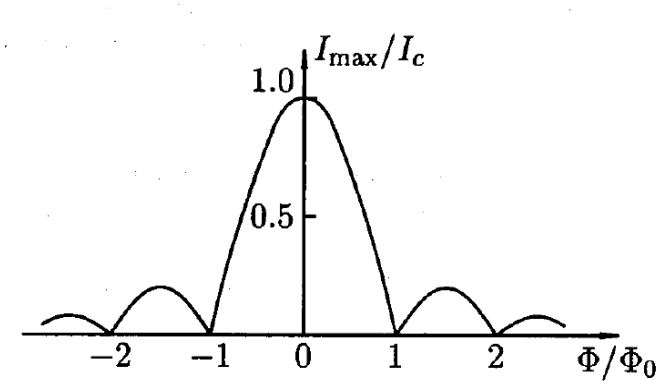
Рисунок 1.6 – а) Схематичное изображение плотно сжатой цепочки джозефсоновских вихрей в переходе; б) распределение туннельного сверхтока через переход. Расстояния межу центрами вихрей оценивается как $a = \Phi_0/H_0\, d$ [59, с.150].

В некоторых применениях туннельных СИС переходов наличие сверхпроводящего (бездиссипативного) тока является паразитным эффектом, поскольку приводит к появлению ступеней Шапиро на вольтамперной характеристике при воздействии внешним сигналом на высокой частоте, т.е. возникновению гармоник излучения, что при преобразовании шумов в широкой частотной полосе увеличивает общий шум (эквивалентную шумовую температуру) приемной системы. В таком случае сверхпроводящий ток подавляют при помощи приложения магнитного поля. Максимальный сверхпроводящий ток $I_{\max}$ в условии приложения внешнего магнитного поля определяется как

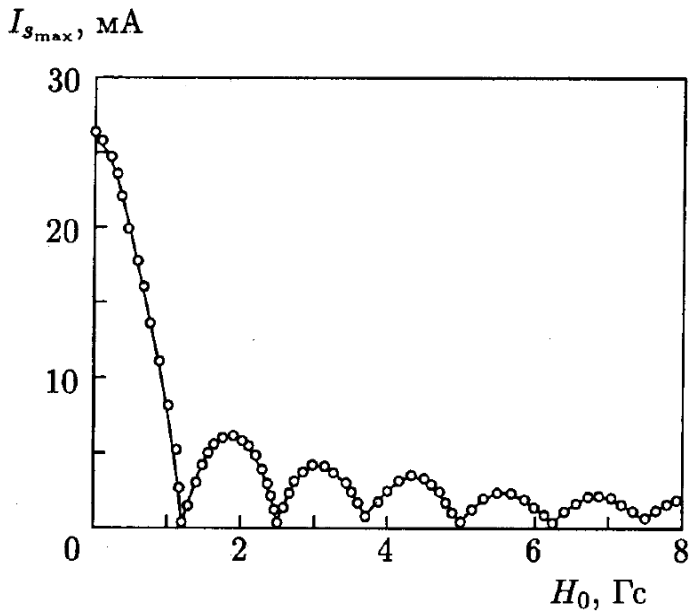
$$I_{\max} = I_c \left| \frac{\sin(\pi\Phi / \Phi_0)}{\pi\Phi / \Phi_0} \right|, \tag{1.12}$$

где $\Phi = H_0 L d$ – полный магнитный поток в джозефсоновском контакте, L – линейный размер контакта. Расчетный и экспериментальный графики

зависимости сверхпроводящего тока через контакт представлены на рисунке 1.7, взятом из [59, с.152]. Графики подобного типа часто называют «*фраунгоферовскими*», или «*по Фраунгоферу*», поскольку они в точности напоминают распределение интенсивности интерференционных полос в дифракции Фраунгофера на щели. В практических приложениях для полного подавления сверхтока в переходе устанавливают магнитное поле в одним из минимумов I_{max}/I_c на рисунке 1.7, где отношение Φ/Φ_0 является целым числом.



(а)



(б)

Рисунок 1.7 – зависимость максимального сверхтока от приложенного магнитного поля: (а) теоретическая, по соотношению вида (1.12); (б) экспериментальная для перехода $Sn/SnO_x/Sn$ [59].

Наконец, отметим последний интересный эффект, важный в рамках данной диссертационной работы – вынужденное квазичастичное туннелирование (англ. *photon-assisted tunneling*) через СИС переход под воздействием внешнего высокочастотного сигнала [67]. Выше были описаны ступеньки Шапиро, которые возникают на ВАХ джозефсоновского контакта независимо от его типа, будь то точечный контакт, туннельный переход или мостик переменной толщины, при этом необходимым условием их возникновения является наличие сверхпроводящего тока через контакт. Квазичастичное туннелирование характерно только для джозефсоновских контактов «туннельного» типа (СИС), когда имеется энергетический барьер для квазичастиц в системе – электронов, находящихся в «неспаренном» состоянии (вне куперовских пар). Энергетическая диаграмма туннельного контакта в полупроводниковой модели представлена на рисунке 1.8, а его вольтамперная характеристика – на рисунке 1.9. При приложении напряжения к СИС переходу V, меньшего суммы энергетических щелей электродов ($eV < \Delta_1+\Delta_2$), ток через туннельный барьер практически равен нулю и определяется лишь небольшим значением «тока утечки» за счёт свободных квазичастиц в системе вследствие ненулевой температуры перехода (при $T > 0$ K часть куперовских пар разорваны, а свободные электроны в малой концентрации находятся в состоянии термо- и электродинамического равновесия). При достижении напряжения смещения, равного сумме энергетических щелей электродов и выше неё, квазичастицы начинают туннелировать в большом количестве через барьер, в результате чего появляется скачкообразная ступень тока на ВАХ [67] (см. рисунок 1.9). Напряжение V_g, при котором данный скачок тока происходит, называют «щелевым» напряжением (англ. *gap voltage*), его значение составляет

$$V_g = (\Delta_1+\Delta_2) / e \,, \qquad (1.13)$$

где Δ_1 и Δ_2 – энергетическая щель сверхпроводников 1 и 2, из которых выполнены электроды СИС контакта. Сумму энергетических щелей электродов туннельного контакта также для простоты называют «щелью»

СИС перехода. В случае одинаковых материалов электродов выражение (1.13) принимает более простой вид $V_g = 2\Delta/e$. Далее по тексту термины «щелевое» напряжение, «щель», «щелевая» особенность и другие контекстные термины будут писаться без кавычек.

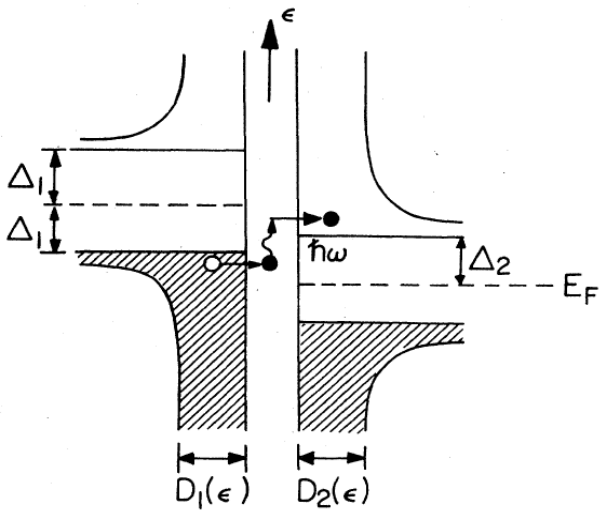
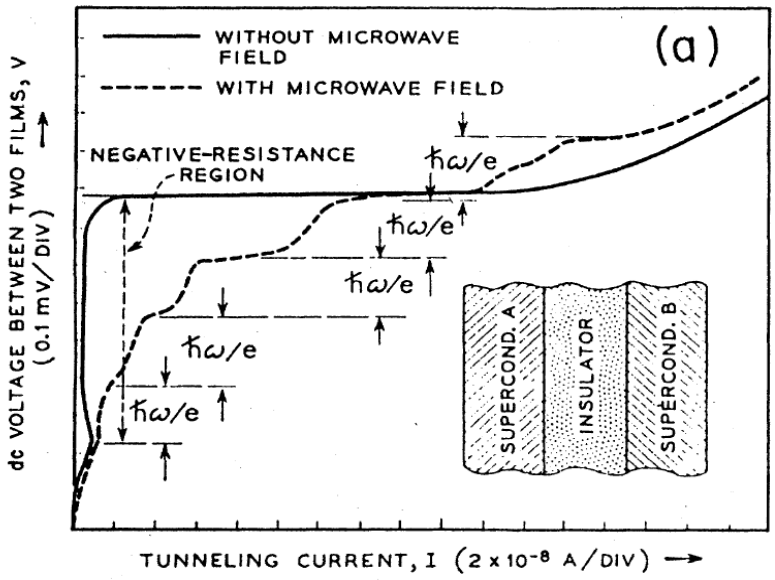
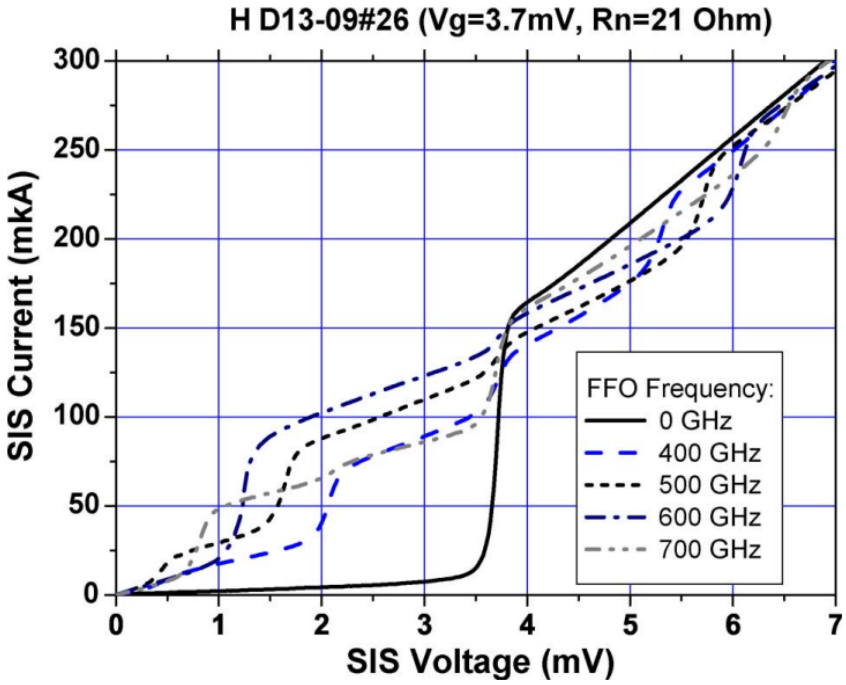


Рисунок 1.8 – энергетическая диаграмма и схема квазичастичного туннелирования через барьер СИС перехода [67].



(a)



(б)

Рисунок 1.9 – Набор вольтамперных характеристик СИС перехода (а) на основе $Al/Al_2O_3/In$ под воздействием внешнего излучения частотой 38 ГГц; рисунок из работы [67]; (б) на основе Nb/AlN/NbN под воздействием сигнала на частотах 400, 500, 600 и 700 ГГц, рисунок из работы [23]. Расположение осей тока и напряжения на (а) и (б) различны: в первом случае ток представлен по горизонтальной оси, во втором – по вертикальной.

Теперь, когда прояснен механизм образования квазичастичного скачка тока при щелевом напряжении, достаточно легко понять механизм вынужденного квазичастичного туннелирования в СИС переходе под воздействием внешнего высокочастотного сигнала – «накачки». Так, в случае, когда приложенное к переходу постоянное напряжение ниже щелевого, падающее электромагнитное излучение частотой f_0 способно поглотиться электроном (квазичастицей), сообщив ему дополнительную энергию hf_0 для преодоления энергетического барьера $\Delta_1+\Delta_2$ (см. область барьера на рисунке 1.8). В результате такого воздействия, на ВАХ перехода появляются квазичастичные ступени накачки при напряжениях V_n:

$$V_n = V_g \pm n\frac{hf_0}{e}, \qquad (1.14)$$

где V_g определяется выражением (1.13), а номер квазичастичной ступени n =1, 2, 3… отвечает за 1-фотонное, 2-фотонное, 3-фотонное и т.д. поглощение. Случай со знаком «-» в выражении (1.14) соответствует подщелевым энергиям квазичастиц, случай же со знаком «+» соответствует «надщелевому» случаю, когда квазичастица, обладающая достаточной энергией для туннелирования, приобретает дополнительную энергию поглощенного фотона, так что при результирующей энергии плотность электронных состояний в электроде после преодоления барьера оказывается ниже, чем в отсутствии внешнего излучения. Уменьшение плотности состояний с ростом энергии объясняет м*е*ньший суммарный туннельный ток при напряжениях $V > V_g$ на ВАХ по сравнению с током нормальной ветви ВАХ в отсутствии накачки. Так, на рисунке 1.9 а представлен случай вплоть до 4-фотонного поглощения сигнала СВЧ частотой 38 ГГц с последующим туннелированием квазичастиц, случай же из рисунка 1.9 б демонстрирует -1-ю и +1-ю квазичастичные ступени тока накачки при воздействии сигнала на частотах от 400 до 700 ГГц, которые лежат в целевом частотном диапазоне разработки и исследований в данной работе. Описанный процесс вынужденного туннелирования квазичастиц через барьерный слой изолятора под действием внешнего сигнала коротко называют «накачкой» перехода, а ток, индуцированный внешним излучением – током накачки. Чем выше мощность накачки, тем больше квазичастиц вынужденно туннелируют через барьер, тем выше ток.

Собственная джозефсоновская генерация также может приводить к так называемой самонакачке перехода (англ. *self-pumping*) [68-70], которая проявляется в виде особенностей на ВАХ при напряжениях $V_{sp} = V_g/(2m+1)$, где m =1, 2, 3…, т.е. при $V_g/3$, $V_g/5$ и т.д.; при этих напряжениях резко меняется затухание в переходе. Данные особенности не являются квазичастичными ступенями тока в прямом смысле, поскольку они проявляются как сложная суперпозиция одновременно двух эффектов - джозефсоновской генерации и вынужденного квазичастичного туннелирования под воздействием сигнала собственной генерации, при котором ток накачки зависит от постоянного

напряжения на переходе, т.е. частоты генерации по соотношению Джозефсона (1.3). Данный эффект будет наглядно продемонстрирован в разделе 1.3.3 при описании ВАХ РДП.

В заключении данного раздела отметим наиболее важные применения джозефсоновских контактов и эффектов Джозефсона в современном мире.

Приемные системы СВЧ и субТГц диапазона

За счет сильной нелинейности квазичастичного скачка тока в СИС переходе при щелевом напряжении, а также ввиду низкой физической температуры контакта в сверхпроводящем состоянии и, следовательно, низкого уровня тепловых шумов, туннельные СИС переходы нашли одно из важнейших практических применений в гетеродинном детектировании слабых сигналов в субТГц диапазоне. Приемные системы на основе СИС переходов обладают рекордной чувствительностью в диапазоне 0,2-1 ГГц на сегодняшний день, шумовая температура таких устройств достигает от одного до нескольких квантовых пределов $hf/2k_B$ (k_B – постоянная Больцмана). Именно благодаря сверхвысокой чувствительности СИС приемники нашли свое применение в радиоастрономических исследованиях [1-3,32,71,72], исследованиях состава атмосферы [4,31,37,38]. Интересно, что сами по себе эффекты Джозефсона не используются в приемных системах, а рабочий механизм основан исключительно на сильной нелинейности вольтамперных характеристик. Наличие сверхпроводящего тока через контакт (стационарный эффект Джозефсона), напротив, является паразитным эффектом, поэтому в любой работающей приемной системе на основе СИС переходов имеется система подавления сверхпроводящего тока путем задания магнитного поля.

Стандарт напряжения (вольта)

Благодаря фундаментальному соотношению Джозефсона (1.3), которое связывает напряжение на переходе с частотой через константу Джозефсона $2e/h$, совершенно естественным образом создан стандарт напряжения [73-75]. Заключается он в том, что при приложении к СИС переходу внешнего сигнала СВЧ строго известной частоты f_0 с метрологической точностью, набор

напряжений V_n, при котором на ВАХ перехода проявляются ступени Шапиро, с абсолютной точностью определяется только частотой воздействия и мировыми константами – см. соотношение (1.6).

СКВИД магнитометры

Благодаря высокочувствительному отклику сверхпроводящего тока джозефсоновского контакта на внешнее магнитное поле, успешно созданы наиболее чувствительные магнитометры [76-78]. Сверхпроводниковые системы магнитометрии основаны на сверхпроводящих квантовых интерферометрах, которые в русскоязычной литературе называют СКВИДами (от англ. ***S****uperconducting* ***Qu****antum* ***I****nterference* ***D****evice*, или *SQUID*). Чувствительность таких магнитометров достигает долей кванта магнитного потока $\Phi_0 = \pi\hbar c/e$, вплоть до 10^{-6} Φ_0. СКВИД магнитометры как коммерческие приборы в настоящее время успешно используются в медицине для исследований мозга (магнитоэнцефалография), сердца (магнитокардиография), других органов тела и живых тканей [76,79].

Квантовые вычисления: джозефсоновские кубиты, одноквантовая логика, параметрические усилители СВЧ сигналов

Одно из наиболее популярных применений джозефсоновских переходов сегодня находится в области квантовых вычислений и создания квантовых компьютеров [80-82]. Основная идея кубита (от англ. *quantum bit* или *qubit* – «квантовый бит») на основе джозефсоновского контакта состоит в том, что такой контакт как квантовая система может занимать два состояния одновременно – с двумя различными значениями сверхпроводящего тока (суперпозиция двух квантовых состояний). Соответственно, при наличии системы из N кубитов, такая система способна принимать суперпозицию из одновременно 2^N квантовых состояний, что может быть использовано при решении ряда специфических задач с гораздо большей эффективностью, чем с применением классической «битовой» логики. Последние 10 лет ежегодно выходят сотни-тысячи научных статей, посвященных созданию многокубитных систем на основе СИС переходов, а также устройств для

управления и считывания состояния кубита [83]. Другое смежное направление – параметрические усилители бегущей волны [84-85] – начало свое развитие задолго до эпохи квантовых вычислений, на два десятилетия раньше, при этом сейчас развивается одновременно и параллельно с кубитной техникой, поскольку в последней требуется усиление слабых СВЧ сигналов кубита с минимальным уровнем шума. Идея усилителя заключается в управлении параметрами СВЧ цепи (как правило, кинетической индуктивностью ячеек) на основе набора СКВИД-ячеек за счет изменения сверхпроводящего тока в ячейке. Так, за счёт взаимодействия бегущей волны с внешним сигналом накачки и изменения *LC*-параметров линии передачи происходит её усиление на определенных частотах.

Генераторы на основе эффекта Джозефсона

Ключевым эффектом, на котором основана диссертационная работа, является нестационарный эффект Джозефсона, поскольку генераторы именно на данном эффекте разработаны и исследованы в рамках работы. Создание генератора, управляемого лишь постоянным напряжением джозефсоновского контакта, представляется очень естественным непосредственно из вида фундаментального соотношения (1.3). Несмотря на то, что само по себе соотношение Джозефсона не накладывает ограничений на возможный диапазон рабочих напряжений (частот) генерации, а единственным условием проявления эффекта является наличие слабой связи и ненулевого бездиссипативного тока через контакт, на практике генерация оказалась осуществимой до частот порядка ½ щелевой частоты перехода $(2e/h)\cdot V_g$, что составляет ~700-750 ГГц для туннельных контактов на основе Nb и его соединений. Тем не менее, ввиду существенного недостатка практических генераторов в субТГц области частот с возможностью широкой перестройки частоты, возник высокий практических интерес к джозефсоновским генераторам как к устройствам, способным эффективно работать в области «терагерцового провала».

Помимо проблемы верхнего предела частоты генерации, который непосредственно связан с энергетической щелью электродов и затуханием сигнала при превышении этой щели, на практике также возникает проблема крайне низкой мощности генерации одиночного СИС перехода. Для непосредственной оценки выделяемой мощности генерации одиночного перехода в случае идеального согласования с внешней системой традиционно пользуются упрощённым выражением [58,86,87]

$$P_{\mathrm{rf}} = I_{\mathrm{c}}^2 \cdot R/8, \qquad (1.15)$$

где R – сопротивление перехода, равное сопротивлению выходного тракта, то есть в случае идеального согласования генератора с внешней системой. При этом критический ток перехода и его сопротивление опосредовано связаны через технологические возможности, поскольку на практике I_{c} невозможно сделать высоким при высоком R: чем выше сопротивление перехода, тем ниже критический ток, а для получения безгистерезисной вольтамперной характеристики переход необходимо шунтировать параллельным сопротивлением. Так, при технологически реализуемых параметрах $I_{\mathrm{c}} \approx 1$ мА и $R \approx 1$ Ом мощность по соотношению (1.15) получилась бы равной 125 нВт в идеальном случае, когда импеданс выходного тракта также равняется 1 Ом. На практике же выходной импеданс составляет несколько десятков Ом, так что у перехода с близким сопротивлением критический ток I_{c} становится на 1-2 порядка ниже, а поскольку в выражении (1.15) он входит как квадрат, то согласованная мощность генерации оказывается на уровне пиковатт – единиц нановатт [58,86]. Кроме того, ширина линии генерации перехода с сопротивлением, близким к импедансу выходного тракта, становится слишком большой для практических приложений.

Можно провести другую оценку, опираясь на энергозатраты при задании смещения и эффективность генерации, на примере современных образцов СИС-переходов высокого качества. Например, для генерации используется переход с плотностью туннельного тока $j_{\mathrm{g}} \approx 5$ кА/см^2 (практически предельная плотность без ухудшения барьерных характеристик, определяемых

технологическими возможностями изготовления) и площадью $S \sim$ 5-10 мкм^2 (в переходах такой площади и выше уже наступает заметный перегрев). Тогда мощность постоянного тока P_{dc} при подаче характерного тока смещения на данный переход, равного половине его туннельного тока, и напряжении V_{dc} = 1 мВ, что соответствует частоте 483,6 ГГц, составит

$P_{dc} = I_{dc} \cdot V_{dc} = ½\, j_g \cdot S \cdot V_{dc}$ = 2,5 кА/см^2·10 мкм^2·1 мВ = 250 нВт или 0,25 мкВт.

Далее следует учесть, что эффективность генерации составляет от нескольких до ~10% [58]: при максимальной оценке на уровне 10% мощность генерации P_{rf} составит 25 нВт. Поскольку каждый параметр в расчёте был завышен для получения оценки сверху, реальная генерируемая мощность одиночным СИС контактом с учетом его ёмкости и неидеальной согласованности по импедансу с внешней электродинамической системой снова составит от единиц пиковатт до единиц нановатт [86]. Кроме того, при выделяемой тепловой мощности на уровне P_{dc} = 0,25 мкВт в области сосредоточенного контакта наступает существенный перегрев, приводящий к деградации характеристик вплоть до разрушения сверхпроводимости при превышении критической температуры T_c.

Таким образом, две различные оценки – из непосредственной оценки (1.15) с учётом необходимости согласования излучаемого сигнала с выходным электродинамическим трактом и из общей потребляемой мощности перехода по постоянному току с тепловыми ограничениями, – дают величину не более единиц нановатт при использовании переходов наилучшего качества и современных технологических возможностей. Поэтому вполне естественно родилась идея создания распределенного массива джозефсоновских переходов, способного пропускать большой ток (либо небольшой ток при высоком напряжении) без перегрева и, таким образом, генерировать кратно больше мощности в сравнении с одиночным переходом. Альтернативной идеей стало создание одиночного перехода большого размера ($>> \lambda_J$), в котором большой ток также распределился бы на большой площади и не

приводил к деградации характеристик. Наряду с реализациями этих идей, стало известно о существовании слоистых монокристаллических ВТСП материалов, таких как $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$, в которых чередующиеся сверхпроводящие и изолирующие слои образованы естественным образом на кристаллическом уровне, и приложение напряжения к слоистому материалу также приводит к генерации. Так были развиты **три независимые концепции джозефсоновского генератора** в различных конструктивных реализациях, описанных в следующих подразделах 1.3.2-1.3.4.

1.3.2. Генераторы на основе цепочек джозефсоновских переходов

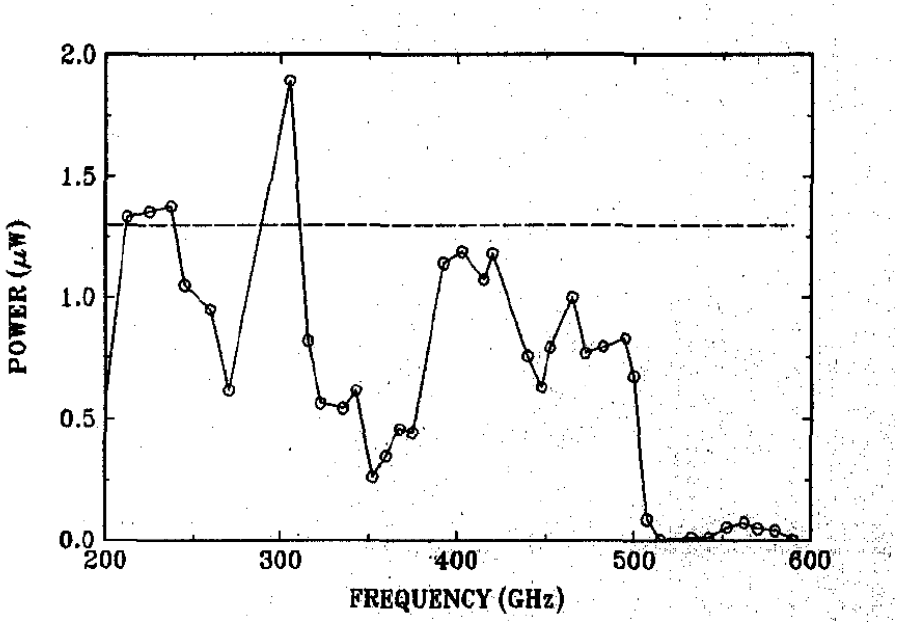
Прежде всего, следует отметить, что в практических работах нет единообразия по способу подключения переходов, включенных в цепочку: в большинстве работ переходы соединяют последовательно, в некоторых – параллельно. Также нет единообразия в размерности массива: в большинстве работ рассматриваются одномерные цепочки переходов, однако есть работы и с двумерными массивами (матрицами). В части работ все переходы включены в цепь пространственно однородно, в другой части работ переходы поделены на группы, включенные в общий массив.

Первые практически работы по созданию цепочек джозефсоновских переходов относятся к началу 1980-хх годов. Так, в работе 1980 года [88] цепочка из 10 микро-мостиков на основе индия размером 0,3×0,3 мкм толщиной 0,15 мкм была встроена в 50 Омную линию передачи. Авторы провели наблюдения генерации в диапазоне от 5 до 35 ГГц, оценка мощности составила ~30 пВт на частоте 6 ГГц. Несмотря на низкий уровень мощности, интересный результат авторов состоял в том, что джозефсоновские переходы в цепочке оказались синхронизированы по фазе, поскольку выходная мощность оказалась в $\sim N^2 = 100$ раз выше, чем для одиночного мостика, а ширина линии цепочки ~20 МГц – в N раз ниже. В большой классической

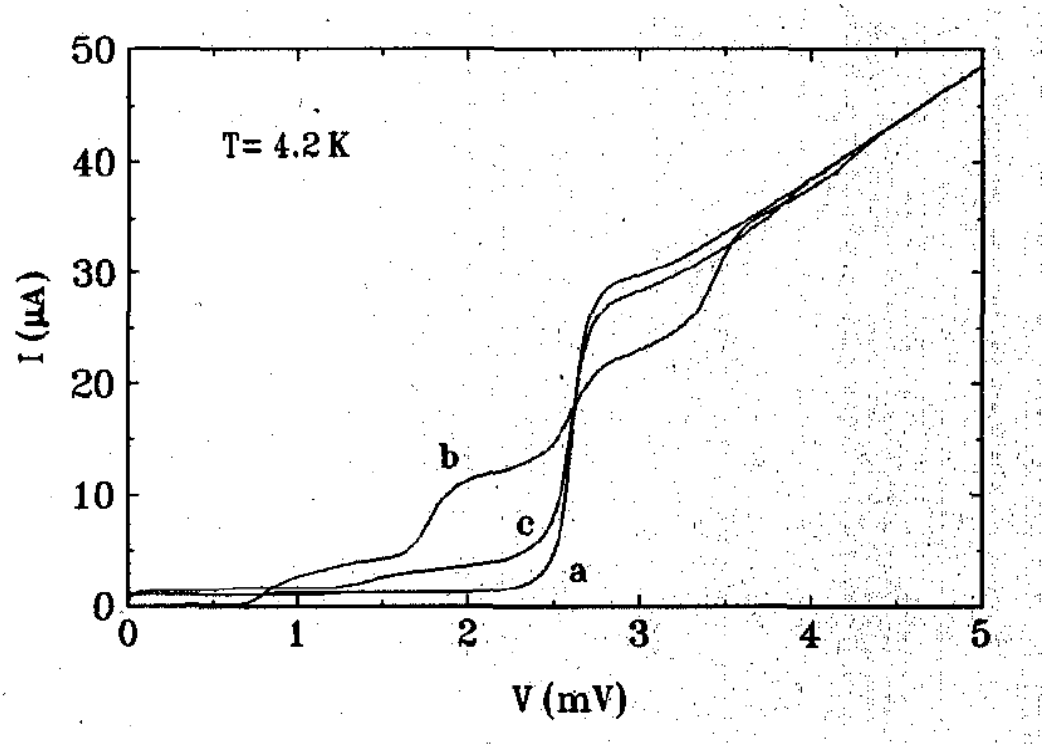
работе 1984-го года [89] по синхронизации также использовались тонкопленочные микромостики, приведено теоретическое описание механизмов и оценены параметры синхронизации шунтированных джозефсоновских переходов в массиве. В экспериментальной части работы сообщается о мощности до 5 нВт в массивах до 100 джозефсоновских контактов.

В другой интересной работе 1987-го года [90] авторы исследовали цепочку из 40 СИС переходов площадью 1,5 мкм^2 на основе свинцового сплава, шунтированных медными резисторами. Цепочка была встроена в микрополосковую линию передачи с нижним электродом из ниобия и диэлектрической прослойкой SiO. Авторы продемонстрировали мощность 3,7 нВт на частоте 109 ГГц, выделенную в 20-Омной нагрузке, и утверждали, что только 7 из 40 переходов находились в состоянии фазовой синхронизации.

Начиная с 1990-х годов с развитием ниобиевой технологии значительно выросло число публикаций с использованием туннельных переходов Nb/AlO_x/Nb, что, соответственно, способствовало росту рабочих частот. В работе [87] исследовался двумерный массив из 10×10 переходов Nb/Al_2O_3/Nb с плотностью тока 1 кА/см^2. Авторы продемонстрировали следующую мощность на различных частотах: 200 нВт на частоте 100 ГГц, 400 нВт при 150 ГГц и 100 нВт при 205 ГГц. Далее, в работе 1993-го года [91] демонстрируется значительно возросшая мощность по в сравнении с предыдущими работами. Цепочка из 20 СИС переходов Nb/AlO/Nb с площадью 2×2 мкм, шунтированных резисторами из золота и включенных параллельно, продемонстрировала мощность излучения на уровне 0,5-1 мкВт в диапазоне от 200 до 500 ГГц, с максимум порядка 1,8 мкВт на частоте около 300 ГГц. Результат из этой работы показан на рисунке 1.10. Также в данной работе была экспериментально измерена ширина линии генерации цепочки из 10 переходов (мощность при включении всех 20 переходов приводила к насыщению смесителя) на рабочей частоте около 240 ГГц: при температуре 1,57 К было измерено значение 10,3 МГц, при 4,0 К – 23 МГц.



(а)



(б)

Рисунок 1.10 – (а) Выходная мощность цепочки из 20 СИС переходов при температуре 1,57 К; (б) ВАХ используемого в качестве детектора мощности СИС смесителя без воздействия и под действием накачки исследуемой цепочки из 10 СИС переходов [91].

Значительно выделяются из остальных работ по мощности излучения работы 1994-го года [92] и 1996-го года [93] на переходах $Nb/AlO_x/Nb$ с крайне высокой плотностью тока 40-60 кА/см^2. В первой из них [92] генератор состоит из 500 переходов, разделенных на группы по 10 переходов в каждой группе; декларируется максимальная мощность излучения 47 мкВт на частоте 394 ГГц, и характерный уровень мощности порядка 10 мкВт на наборе рабочих частот в диапазоне от 300 до 500 ГГц. Также сообщается о ширине линии генерации менее 1 МГц в рабочих точках с наибольшей мощностью. Во второй работе [93] использован массив из 1968 переходов, разделенных на группы по 24 перехода; сообщается о колоссальной для такого типа генераторов мощности 160 мкВт на частоте 240 ГГц. Такой результат, по утверждению авторов, был достигнут за счёт специальной топологии схемы для минимизации паразитной индуктивности, возникающей за счёт шунтирующих сопротивлений каждого перехода, что позволило достичь большого критического тока $I_c = 23$ мА. Полученные значения мощности считаются рекордными и не были повторены в других работах.

В работе 1999-го года [94] авторы исследовали спектр генерации цепочки из 300 шунтированных последовательно соединенных СИС переходов $Nb/AlO_x/Nb$ с плотностью тока около 5 кА/см^2 и размерами 18×2 мкм. Общее число переходов в цепочке было разделено на 50 групп по 6 переходов в каждой группе (см. рисунок 1.11). Исследование излучения производилось при помощи СИС приемника со стабилизированным по фазе источником гетеродина 88 ГГц на основе диода Ганна; с учётом диапазона промежуточных частот (ПЧ) 18 ГГц диапазоны спектральных измерений составили 88 ±18 ГГц (основная гармоника гетеродина) и 176 ±18 ГГц (вторая гармоника гетеродина). В первом диапазоне ширина линии источника на основе цепочки СИС переходов составила около 60 МГц, что соответствуют спектру одиночного перехода. Во втором диапазоне (158-194 ГГц) наилучшая ширина линии составила уже около 10 МГц и варьировалась от 8 до 14 МГц, что, по утверждению авторов, соответствует спектру синхронизированных по

фазе 6 переходов (количество переходов в каждой группе). Кроме того, в некоторых рабочих точках между двух близких резонансных ступеней ширина спектра становилась ещё меньше – вплоть до 3,6 МГц. Авторы работы объясняют это влиянием дополнительных внутренних резонансов и/или самосмешения генерируемых сигналов внутри цепочки, в результате чего по меньшей мере 17 переходов синхронизированы по фазе. Таким образом, в работе была продемонстрирована нетривиальная электродинамика распределенной системы, в которой при разных условиях переходы либо полностью не синхронизированы, либо синхронизированы внутри группы (по 6 переходов), либо частично синхронизированы различные группы между собой.

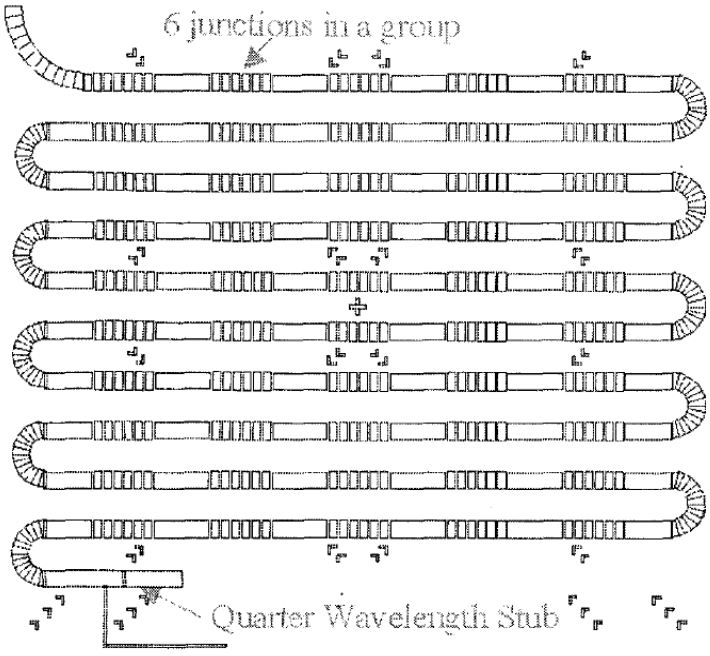


Рисунок 1.11 – Схематичное изображение генератора на основе 300 переходов, разделенных на 50 групп по 6 переходов в каждой [94].

Работа 2009-го года [95] была направлена не на достижение высокой мощности генерации или исследование спектральных характеристик, а на исследование гармоник генерации цепочки из 5 СИС переходов Nb/Al-AlO_x/Nb с плотностью тока ~10 кА/см^2 и площадью переходов ~1 мкм^2. Выходное излучение исследовалось также при помощи гетеродинного СИС

приемника диапазона 450-650 ГГц, расположенного в отдельном криостате. В работе наблюдались 3 четко выраженные резонансные ступени на ВАХ цепочки при напряжениях 0,51 мВ, 0,84 мВ и 1,02 мВ, соответствующие джозефсоновской генерации на частотах 246,5 ГГц (вторая гармоника – 495 ГГц), 406,05 ГГц (вторая гармоника – 812,1 ГГц) и 493,05 ГГц (вторая гармоника – 986,15 ГГц). Фактически, работа направлена на демонстрацию возможности широкой перестройки частоты с учётом использования резонансных ступеней на ВАХ и гармоник генерации, и является особенно интересной в контексте настоящей диссертационной работы, поскольку в ней используется схожая экспериментальная методика исследования излучения в открытое пространство (см. рисунок 1.12), когда источник и приемник располагаются в отдельных криогенных системах.

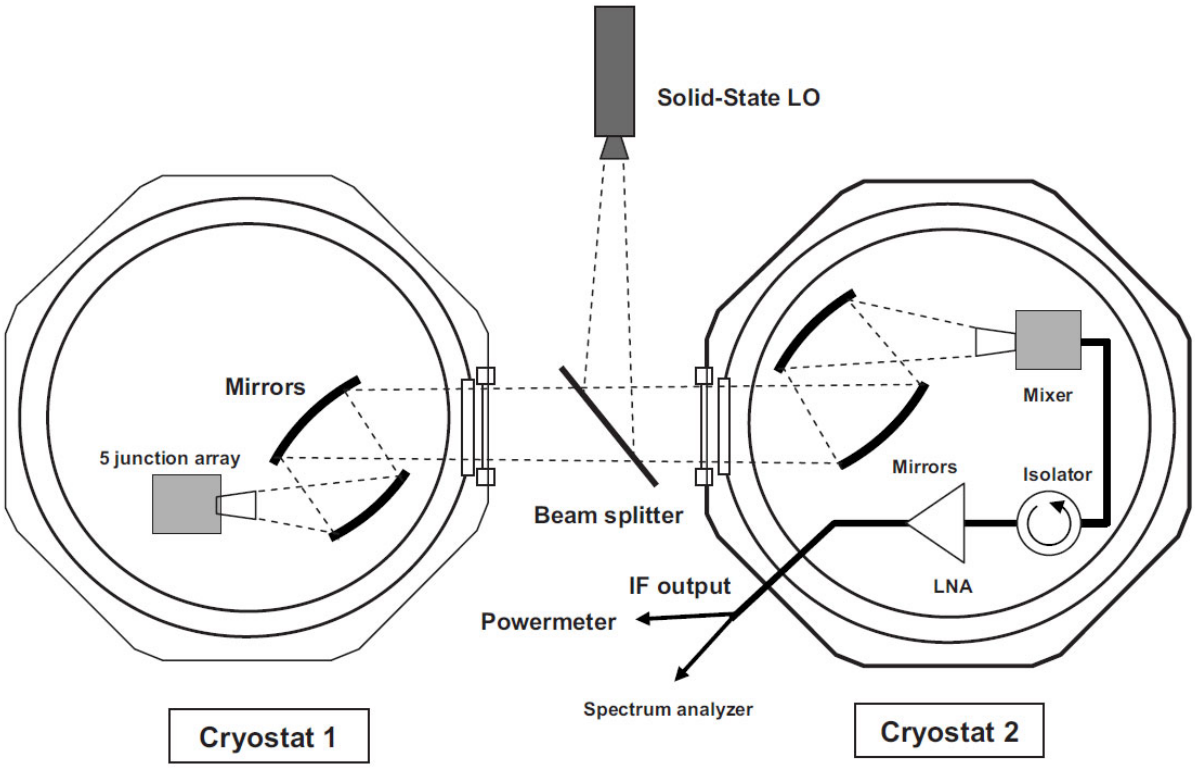


Рисунок 1.12 – схема экспериментальной установки по измерению спектров излучения генератора на основе цепочки СИС переходов (криостат 1) при помощи гетеродинного СИС приемника, расположенного в криостате 2 [95].

В другой работе 2009-го года [96] продемонстрирована мощность излучения около 2 мкВт на частоте 76 ГГц большого массива из 7500 переходов типа «сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник» (СИНИС) на основе $Nb/Al_2O_3/Al/Al_2O_3/Nb$. Мощность измерена при помощи гетеродинного радиометра при комнатной температуре. Авторы оценивают, что в случае идеального согласования генератора с внешней системой максимальная мощность составила бы N раз больше ($N = 7500$) чем по соотношению (1.15) для одиночного перехода, что в их системе составляет $P_{max} = N \cdot I_c^2 \cdot R/8 = 108$ мкВт. Поскольку измеренный уровень мощности составил около 2 мкВт, авторы пишут об «излучательной эффективности» (англ. *emission efficiency*) на уровне 2%.

Авторский хронологический обзор наиболее интересных работ по исследованию генераторов на цепочках (массивах) джозефсоновских контактов приведен в Таблице 1.1.

Таблица 1.1. Обзор работ по генераторам на цепочках джозефсоновских контактов.

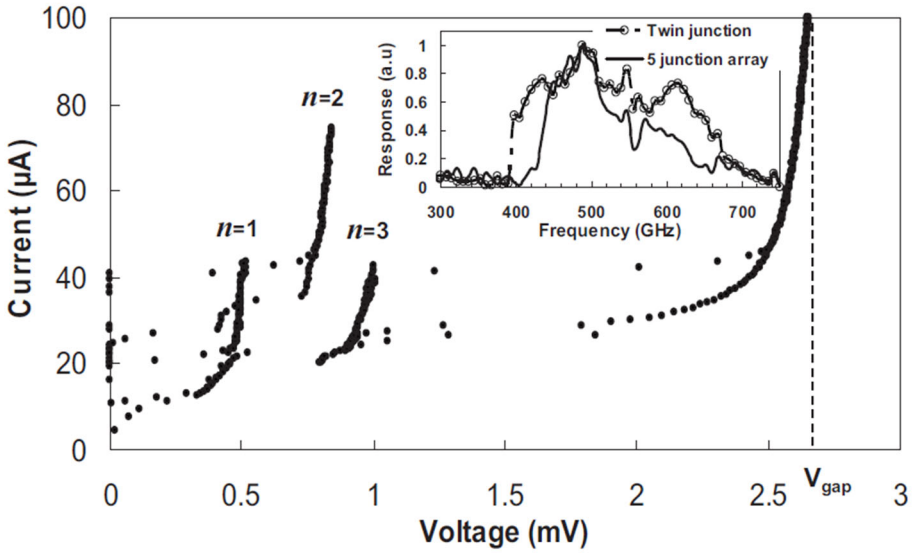
Год публикации	**Ссылка на публикацию**	**Рабочая частота, ГГц**	**Уровень мощности, нВт**	**Другие интересные результаты**
1980	A.K. Jain *et al* [88]	5-35	0,03	Мощность ~ N^2 Ширина линии ~1/N
1984	A.K. Jain *et al* [89]	< 100	< 5	Построена теория синхронизации переходов в массиве
1987	J. E. Sauvageau *et al* [90]	109	3,7	–
1991	S. P. Benz *et al* [87]	100	200	–
		150	400	
		205	100	

Год публика-ции	Ссылка на публикацию	Рабочая частота, ГГц	Уровень мощности, нВт	Другие интересные результаты
1993	B. Bi *et al* [91]	300	$1{,}8 \cdot 10^3$	В среднем ~0,5 мкВт в диапазоне до 500 ГГц
1994	S. Han *et al* [92]	394	$47 \cdot 10^3$	В среднем ~10 мкВт в диапазоне 300÷500 ГГц Ширина линии ~1 МГц
1996	P.A.A. Booi *et al* [93]	240	$160 \cdot 10^3$	Топология структуры с подавлением паразитной индуктивности шунтов
1999	S. Deus *et al* [94]	70-106	Не измерялся	Ширина линии ~60 МГц
		158-194		Ширина линии ~10 МГц, до 3,6 МГц в некоторых точках
2009	F. Boussaha *et al* [95]	246,5	Не измерялся	Зарегистрирован сигнал второй гармоники основной частоты 246,5 ГГц; сигнал основной гармоники 493,05 ГГц
		406		
		493,05		
2009	F. Song et al [96]	76	$2 \cdot 10^3$	–
2015 – по н.в.	[25,26,97-99]	до 300 ГГц	–	Углубленное изучение электродинамики и физических механизмов генерации, синхронизации; теоретические оценки; предложения практических применений и т.д.

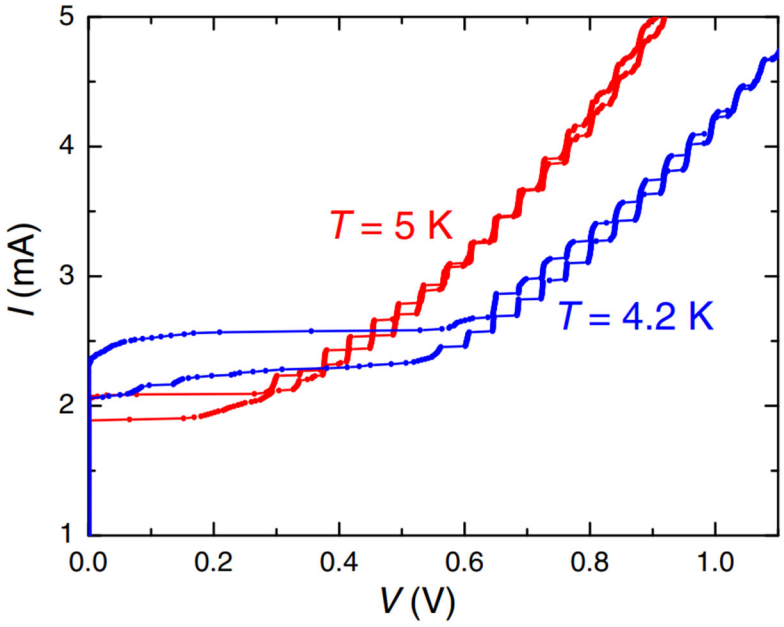
Работы последнего десятилетия (наиболее современные) по генерации в цепочках джозефсоновских контактов направлены преимущественно на изучение внутренней электродинамики системы, резонансных мод, рабочих «ступеней» генерации на ВАХ, объяснение причин и механизмов синхронизации отдельных переходов и отдельных групп (цепочек), а также на оптимизацию конструкции, геометрических и электродинамических

параметров системы с целью достижение конкретных рабочих частот и/или полезного использования механизмов фазовой само-синхронизации массива (нескольких массивов) для существенного увеличения мощности: резонансного, $\sim N^2$-подобного и т.д. [25,26,97-99]. Такие работы имеют преимущественно аналитический (напр., исследование стоячих волн методом сканирующей лазерной микроскопии в [97]) или численно-теоретический характер, оцениваются принципиально достижимые мощности в различных приближениях (напр., оценка ~600 мкВт из [98]), а также возможные практические применения (напр., в качестве гетеродина для субТГц приемников [25]), при этом экспериментально достигнутые значения мощности демонстрируются на уровне порядка единиц микроватт, как и в работах конца 1990-х – начала 2000-х. Следует отметить, что возможности непрерывной перестройки частоты в широком диапазоне в настоящее время не обсуждаются: во всех практических системах генерация происходит только на наборе «рабочих» эквидистантных ступеней генерации на вольтамперной характеристике – см. примеры на рисунке 1.13. В целом, можно отметить достаточно немногочисленное общее число работ в научном пространстве начиная с 2000-х годов, посвященных данному типу джозефсоновских генераторов. Автор диссертации объясняет это тем, что, как видно из Таблицы 1.1, к середине 1990-х годов были экспериментально получены значения мощности, близкие к предельно достижимым при использовании существующих технологий, после чего рост остановится, а рабочие частоты генерации в среднем остались не выше 300 ГГц, преимущественно от 70 до 200 ГГц. Можно сказать, что тематика в тот период достигла своего «концептуального» предела в экспериментальных реализациях, поэтому все последующие работы оказались направлены скорее на изучение внутренней физики устройств, чем на улучшение их технических характеристик. Второй причиной малой активности в данной тематике, по мнению автора, явилась низкая конкурентоспособность с другими типами генераторов ТГц и субТГц диапазона (см. обзор в разделе 1.2), не требующих охлаждения до гелиевых

температур. Так, например, в сходном частотном диапазоне до 300 ГГц превосходно зарекомендовали себя полупроводниковые умножители частоты сигналов СВЧ с выходным уровнем мощности на 2-3 порядка выше и простой возможностью перестройки частоты во всём диапазоне за счёт частоты входного сигнала СВЧ.



(а)



(б)

Рисунок 1.13 – Примеры вольтамперных характеристик генератора на основе цепочек СИС переходов: (а) 3 ступени генерации в цепочке из 5 переходов на основе Nb/Al-AlO_x/Nb [93]; (б) набор ступеней в цепочке из 1660 переходов на основе Nb/NbSi/Nb при двух рабочих температурах [97].

Однако, с ростом технологических возможностей, в частности за счёт перехода на более высокочастотные сверхпроводящие линии передачи, такие как NbTiN/Al, с низким уровнем потерь на частотах выше 700 ГГц, где линии передачи на чистом Nb достигают своего частотного предела, в ближайшие 1-2 десятилетия ожидается возобновление работ технической направленности по улучшению характеристик практических генераторов на цепочках джозефсоновских переходов и демонстрации их практических применений.

Также, несмотря на достаточно широкий спектр работ по исследованию ширины линии генерации цепочек джозефсоновских контактов (см. Таблицу 1.1 – напр., работы [88,92-94]), начиная от микромостиков, заканчивая СИС контактами $Nb/AlO_x/Nb$ высокого качества, ширина линии цепочек джозефсоновских (СНС) контактов на основе Nb/NbSi/Nb с высоким спектральным разрешением до настоящей работы не исследовалась. В дружественной автору диссертации научной группе из Института физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород) совместно с коллегами из Германии и Швеции были разработаны, изготовлены и охарактеризованы образцы генератора из цепочек переходов Nb/NbSi/Nb [97-99], в том числе включающие 9996 таких переходов, разбитых на секции. В данной работе впервые были проведены спектральные измерения таких генераторов при помощи супергетеродинного СИС приёмника диапазона 211-275 ГГц со спектральным разрешением лучше 0,1 МГц. Данная работа представлена в разделе 4.3.

1.3.3. Генераторы на основе распределенного СИС перехода

В период активного исследования физики и электродинамических свойств джозефсоновских контактов в 1970-1980хх годах как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения разработки практических устройств, исследовались также джозефсоновские контакты большого

размера. В англоязычной литературе при описании таких контактов принято пользоваться терминологией «длинного» джозефсоновского перехода (англ. *Long Josephson Junction* – сокр. *LJJ*) в понимании длины $L >> \lambda_J$, в то время как в русскоязычной литература больше устоялся термин «распределенного джозефсоновского перехода» (РДП), – в противовес «сосредоточенному» СИС контакту, – с терминологическим контекстом пространственного распределения фазы волновой функции сверхпроводника в переходе. Как было описано в разделе 1.3.1, при приложении сильного магнитного поля ($H > H_c$) к РДП, внутрь барьера начинают проникать магнитные вихри, каждый из которых несёт квант магнитного потока Φ_0 (см. рисунок 1.6). Под действием тока смещения такие вихри двигаются вдоль перехода от одного края к другому, создавая пространственно-неоднородное возмущение в переходе. Движущийся вихрь называется флаксоном (дословно от англ. *fluxon*), а сам переход является по сути линией передачи для распространяющихся волн (в терминах бегущей электромагнитной волны) или флаксонов (в терминах движения квазичастиц). В обобщенной терминологии флаксон является примером солитона – структурно устойчивой уединённой волны (или волнового пакета), распространяющейся в нелинейной среде. Концепция РДП на заре развития джозефсоновских контактов исследовалась, в первую очередь, с точки зрения интересной электродинамики флаксонов, их взаимодействия друг с другом и системой перехода (напр., [100-102]), характеристик сверхпроводниковых линий передачи (напр., [103-105]) и джозефсоновской генерации в целом (напр., [104,106]).

С развитием понимания электродинамики РДП стало ясно, что на его основе можно создать практический генератор, поэтому с начала 1990-х годов стало появляться всё больше работ про РДП в качестве источника миллиметровых и субмиллиметровых волн [107-115]. Удобство практического использования обусловлена не только тем, что частота генерации строго определена только постоянной составляющей напряжения на переходе в соответствии с джозефсоновским соотношением (1.3), но и возможностями

перестройки частоты в широких пределах. Для обозначения принципа работы генератора в англоязычной литературе используется термин “*Flux-flow oscillator*” (*FFO*), иногда пишется без дефиса межу словами “*flux*” и “*flow*”, что дословно означает «генератор на вязком потоке вихрей». Таким образом, в большинстве иностранных работ, посвященных созданию генератора на основе длинного джозефсоновского перехода, термины *LJJ* и *FFO* стали равнозначны по смыслу и обозначают одно и то же физическое устройство, поскольку *длинный переход* представляет собой *генератор*, а *генератор* изготовлен в виде *длинного перехода*. В русскоязычной терминологии устоялась лишь аббревиатура «РДП», а когда нужно контекстуально указать именно на генерирующие свойства перехода, термин расширяется до «источник/генератор на основе РДП». Другим интересным фактом является то, что, несмотря на устоявшуюся терминологию “*flux-flow oscillator*”, далеко не всегда генератор работает в режиме вязкого потока вихрей. В определенном диапазоне напряжений (и частот, соответственно) в генераторе реализуется резонансный режим работы благодаря образованию стоячих волн в линии передачи, что будет пояснено ниже при описании принципов работы РДП; именно поэтому в англоязычной терминологии возникает чуть больше путаницы и появляется необходимость вводить дополнительные пояснения, например, “*true flux-flow regime*” (истинный режим вязкого потока вихрей), в противовес “*resonant regime of FFO*” (резонансный режим работы).

В одной из классических работ [110] предложена экспериментальная реализация такого генератора, совмещенного с СИС детектором на одной микросхеме. СИС переходы был изготовлены на основе свинцовых сплавов (с добавлением золота и индия), плотности тока составляли от 1 до 4 кА/см^2, а размеры генератора – от 280 до 950 мкм в длину и около 40 мкм в ширину. Мощность генерации оценивалась по величине квазичастичной накачки СИС детектора и составила порядка сотен нановатт – единиц микроватт в диапазоне от 100 до 400 ГГц.

В работах [101,107-109,115] исследовалась электродинамика в РДП и связанные с ней эффекты, режимы работы генератора; отдельный интерес представляет диссертационная работа (*Ph.D. thesis*) [114], в которой детально описан 10-летний прогресс (с 1983 по 1993 г.) в развитии генераторов подобного типа.

В работах [116-120] исследовалась ширина линии излучения и определяющие её физические механизмы, которая в автономном режиме составляет от сотен кГц до единиц МГц, а работы [22,121-123] направлены на достижение фазовой синхронизации излучения в РДП. С использованием цепи обратной связи с генератором и полупроводниковой системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) удалось засинхронизировать к опорному сигналу от 50% до ~90-95% мощности в центральном пике, ширина которого при измерении фактически ограничивается спектральным разрешением анализатора и составляет порядка 1 Гц.

В 2013 году автором настоящей диссертации была защищена диссертация на соискание степени кандидата наук [124], одна из глав которой посвящена экспериментальному исследованию режимов работы РДП: исследованы переходы разной длины (от 100 мкм до 1400 мкм), экспериментально измерена и количественно рассчитана зависимость ширины линии генерации от электродинамических параметров системы, в том числе дифференциальных сопротивлений, определены параметры затухания в переходе.

Отдельно следует выделить более позднюю серию работ 2017-2019 гг по численному моделированию микроскопического туннелирования в РДП [125-126], в которых удалось с высокой степенью точности описать экспериментальные результаты численными методами, что до того момента удавалось лишь качественно. Эти работы считаются наиболее точными с точки зрения численного описания динамики РДП, поскольку берут за основу достаточно точную туннельную микроскопическую модель, в то время как

другие теоретические и численные работы опирались скорее на феноменологические теории и модели.

Важнейшим результатом научных исследований РДП с начала 1980-х по конец 2000-х годов является то, что генератор на его основе доведен до практического применения в уникальном на сегодняшний день устройстве – супергетеродинном сверхпроводниковом интегральном приемнике (СИП) [21,31,37,127-129], в котором РДП используется как широко перестраиваемый (от 450 до 700 ГГц) источник гетеродина с синхронизированным по фазе сигналом и уровнем мощности, оптимальным для накачки СИС смесителя в рабочем режиме. Максимальная мощность РДП (порядка 1 мкВт) избыточна в данной задаче, поскольку приводит к насыщению СИС смесителя, поэтому уровень мощности подбирается специальным образом для оптимального уровня гетеродинной накачки: величина подщелевой квазичастичной ступени СИС смесителя должна составлять порядка 20% от туннельного скачка тока. Идея создания приемника с интегрированным гетеродином на основе РДП была впервые предложена в 1993 году [130], а на момент 2011 года СИП совершил несколько научных запусков в стратосферу на высоте 20-35 км в рамках международного проекта *TELIS* [4,38,**A24**].

Поскольку в настоящем диссертационном исследовании никакое другое применение РДП не подразумевается, кроме как в качестве генератора субТГц диапазона, далее по тексту термины «*РДП*» и «*генератор на основе РДП*» будут использоваться как равнозначные по смыслу.

Первоначально, до приблизительно 2007 года, СИС переходы в составе микросхемы СИП – как высокочувствительный смеситель, так и РДП, – изготавливались из трехслойных структур $Nb/AlO_x/Nb$ [21], однако вскоре стало понятно, что для достижения более высокой чувствительности на частотах выше 500 ГГц предпочтительнее структуры Nb/AlN/NbN [23,31,**A24**] благодаря возможности увеличения плотности тока и, соответственно, квазичастичного отклика на принимаемый сигнал.

Следует детальнее описать что представляет собой современный *on-chip* генератор на основе РДП, который является «исходным» объектом исследования в диссертационной работе с целью вывести его излучение в открытое пространство. Концепция генератора представлена на рисунке 1.14. Длина перехода $L >> W$ (W – ширина перехода) и одновременно $L >> \lambda_J$, что физически и означает условие «распределенности». В качестве РДП используются переходы на основе туннельных структур Nb/AlO_x/Nb и Nb/AlN/NbN геометрии "*overlap*" (англ. – *перекрытие, наложение*) с поперечным заданием тока смещения I_B (рисунок 1.15). Характерная длина РДП составляет 300 – 700 мкм при ширине от 10 до 20 мкм. В настоящей работе использованы экспериментальные образцы РДП размером 400×16 мкм. Величина плотности критического тока j_c лежит в диапазоне 2 - 10 кА/см^2, что соответствует джозефсоновской глубине проникновения магнитного поля $\lambda_J \approx$ 8-2 мкм в соответствии с выражением (1.10). Для структур Nb/AlO_x/Nb щелевое напряжение $V_g \approx$ 2,8 мВ, в то время как для структур Nb/AlN/NbN $V_g \approx$ 3,7 мВ при T = 4,2 К.

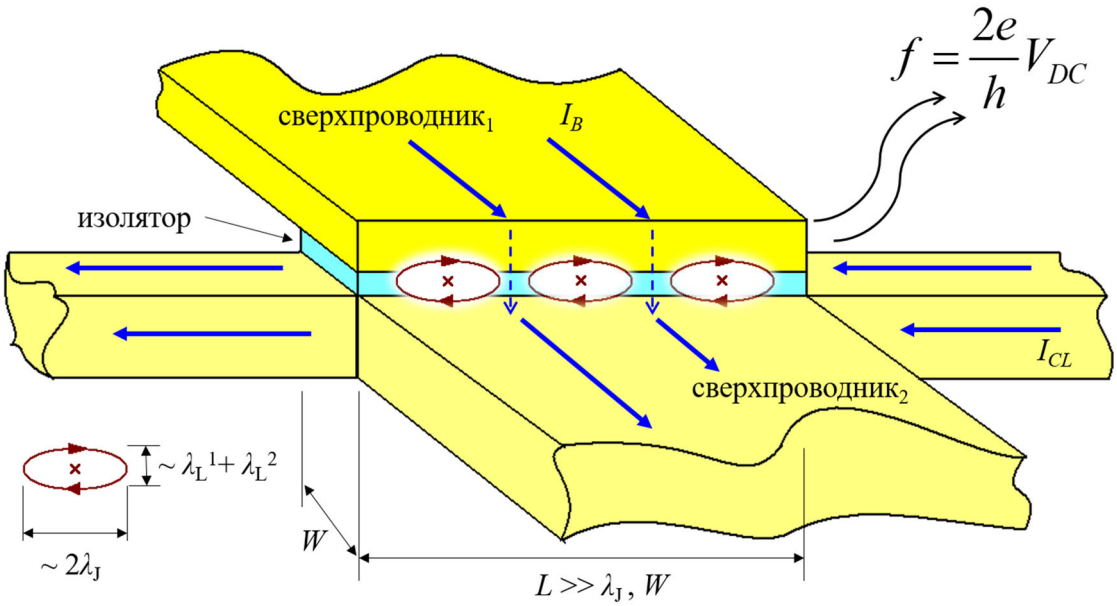


Рисунок 1.14 – Концепция генератора на основе РДП; рисунок не в масштабе [124]. При направлениях тока смещения I_B и тока линии управления локальным магнитным полем I_{CL}, указанных на рисунке, джозефсоновские вихри проникают в переход с левого конца, движутся слева направо и излучаются на правом конце. Вставкой в левой нижней части обозначены характерные размеры флаксона.

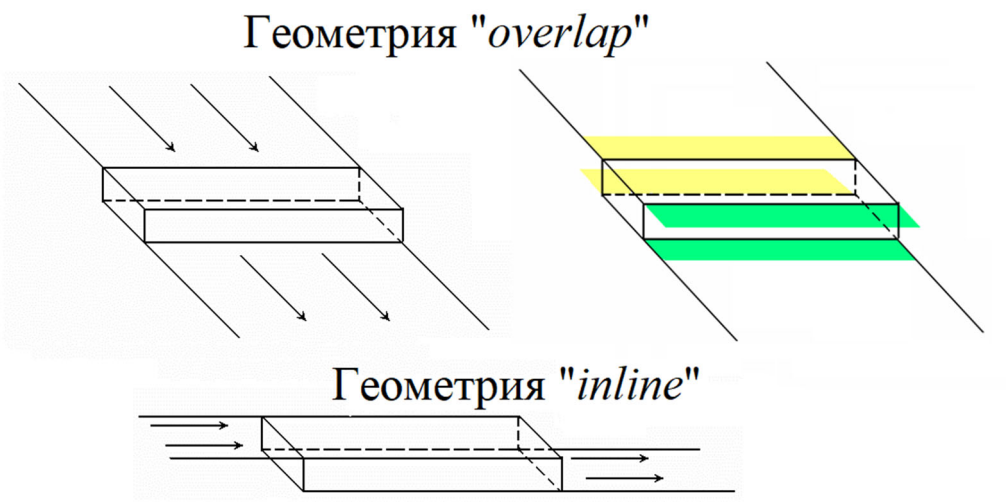


Рисунок 1.15 – Типы геометрии подключения электродов РДП для задания тока I_B: сверху – поперечное задание (“*overlap*”), снизу – продольное задание (“*inline*”). Для геометрии *overlap* показан случай без дополнительного «нахлеста» электродов за пределами барьера (слева) и случай с «нахлестом» (справа, цветные области), который называют “*idle region*” и смысл которой пояснен далее.

В РДП под действием магнитного поля и задаваемого через переход тока смещения I_B движутся джозефсоновские вихри – флаксоны, каждый из которых содержит квант магнитного потока Φ_0 , а его размер составляет порядка $2\lambda_J$ вдоль перехода и $2\lambda_L$ в перпендикулярном направлении (либо $\lambda_L^1+\lambda_L^2$ в случае разных сверхпроводников), поскольку магнитное поле проникает в каждый из сверхпроводящих электродов на величину порядка λ_L. Более строго для определения размера вихря в поперечном направлении следовало бы пользоваться выражениями (1.8) и (1.9), но физическая толщина барьерного слоя d_0 составляет 1-2 нм, типичное значение λ_L для пленок ниобия составляет 75-90 нм, а толщина электродов d_1, d_2 (300-400 нм и больше) в несколько раз больше λ_L, поэтому можно пренебречь как толщиной барьера на фоне λ_L, так и поправками вида $\coth(d_{1,2}/\lambda_L)$ в выражении (1.9). Максимальная скорость движения вихрей совпадает со скоростью распространения электромагнитных волн в переходе c_{sw}, называемой скоростью Свайхарта и равной $c_{sw} = \omega_p\lambda_J$, где ω_p – плазменная частота джозефсоновского перехода [58,114]

$$\omega_p = \sqrt{\frac{2eI_c}{\Phi_0 C}}\,. \tag{1.16}$$

При подставлении (1.16) в определение и с учётом выражения (1.10), получается простейшая оценка для скорости Свайхарта

$$c_{sw} = \omega_p \lambda_J = \sqrt{\frac{2eI_c}{\Phi_0 C}}\sqrt{\frac{\Phi_0}{2\pi\mu_0 j_c d}} = \frac{c}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 c_s d}}\,, \tag{1.17}$$

где C – полная электрическая емкость перехода, c_S – удельная ёмкость на единицу площади, а c в числителе – скорость света в вакууме. Выражение (1.17) не учитывает влияния на скорость волны в переходе области перекрытия верхнего и нижнего электродов за пределами туннельного барьера – так называемой “*idle region*” (англ. «*холостая область*»), схематично показанной на рисунке 1.15 вверху справа. Эта область создает дополнительную параллельную емкость к емкости перехода c_s, что увеличивает скорость распространения волны. Учет этого фактора описан, например, в [105], и приводит к уточненному выражению для расчета скорости Свайхарта:

$$c_{sw} = \frac{c}{\sqrt{\dfrac{4\pi\varepsilon_0 c_s W + 2W_i\dfrac{\varepsilon_i}{d_i}}{\dfrac{W}{d} + 2\dfrac{W_i}{h_i}}}}\,, \tag{1.18}$$

где добавлены новые геометрические размеры: W_i – ширина «холостой области» (от англ. *idle*), ε_i – диэлектрическая проницаемость изолятора «холостой области», d_i – толщина изолятора прослойки между электродами в «холостой области» (по порядку величины она на 2 порядка больше толщины барьера), h_i - эффективная «электрическая» толщина перехода в холостой области, вычисленная по аналогии с выражением (1.8) для «эффективной толщина» барьера. В предельном случае при $W_i = 0$ выражение (1.18) приобретает вид (1.17). При характерных параметрах РДП W = 16 мкм, L = 400мкм, W_i = 10 мкм, ε_i = 4,2 для SiO_2, d_i = 200 нм, c_s = 0,085 пФ/мкм^2, а

также λ_L = 90 нм для Nb и 370 нм для NbN и толщинах верхнего и нижнего электродов d_1 = 200 нм и d_2 = 450 нм для скорости Свайхарта получаются следующие значения:

$c_{sw} \approx 6{,}6 \cdot 10^6$ м/с для РДП на основе структур Nb/AlO_x/Nb;

$c_{sw} \approx 5{,}5 \cdot 10^6$ м/с для РДП на основе структур Nb/AlN/NbN,

что примерно на 2 порядка меньше скорости света в вакууме. Вычисленные по (1.18) значения достаточно близко совпадают со значениями, полученными экспериментально по расстоянию между резонансными особенностями на вольтамперных характеристиках РДП, которые чаще называют ступенями Фиске. Ступени впервые наблюдались Миланом Фиске в работах [131,132], после чего проанализированы теоретически, например, в [133]. Вид таких резонансных особенностей и их анализ будет представлен при детальном рассмотрении экспериментальных ВАХ РДП в разделе 3.1.

Комплексная эквивалентная схема РДП в модели резистивно-емкостного шунтированного СИС-перехода представлена на рисунке 1.16 (из работы [114]) с обозначениями сосредоточенных элементов схемотехники по западным стандартам (резистор – зигзагообразная ломаная; индуктивность – циклоида).

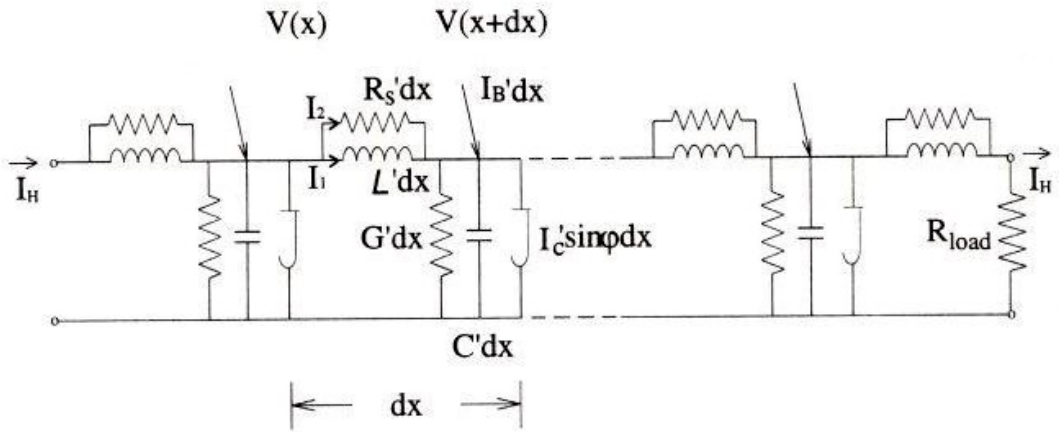


Рисунок 1.16 – Эквивалентная схема РДП [114]. На схеме: L', C', G' – нормированные на длину индуктивность, шунтирующие емкость и проводимость перехода; I_B' и I_c' – нормированные на длину ток смещения и критический ток. Внешнее магнитное поле определяется током I_H. R_{load} – нагрузочное сопротивление на выходном конце перехода.

Динамика РДП в большинстве работ с начала 1980-х [107,109,111,112,114] по конец 2000-х годов (напр., [134]) описывается «возмущенным» уравнением Синус-Гордона с различным количеством учтенных факторов, которые варьируются в зависимости от сложности модели. В наиболее полном виде данное уравнение записывается следующим образом [114]:

$$\varphi_{xx} - \varphi_{tt} - \sin\varphi = \alpha^{\text{damp}}\varphi_t - \beta\varphi_{xxt} - \eta(x), \tag{1.19}$$

где индексы x и t означают частную производную по координате и времени (с соответствующим порядком производной в случае нескольких индексов) джозефсоновской фазы, член $\alpha^{\text{damp}}\varphi_t$ отвечает за затухание электромагнитной волны в переходе, член $\beta\varphi_{xx}$ – за поверхностные потери, а $\eta(x)$ учитывает неравномерное распределение по длине перехода плотности тока смещения. В стационарном случае, т.е. в случае нулевых производных по времени, а также без задания тока смещения, (1.19) вырождается в простое уравнение Ферелла-Прейнджа $\partial^2\varphi/\partial x^2 = \sin\varphi$. Однако, даже при учете достаточно большого числа факторов, уравнение (1.19) не учитывает наличия щели в энергетическом спектре квазичастичных возбуждений сверхпроводящих материалов, поэтому на практике не удается полностью достоверно описать динамику РДП при помощи этой модели в сравнении с экспериментальными результатами. Как было отмечено выше, наиболее точного совпадения численного решения динамики РДП с экспериментальными результатами удалось достичь лишь при решении туннельной микроскопический модели [125-126].

На данный момент не существует стройной теории, количественно описывающей экспериментальные результаты измерений ширины линии генерации РДП δf. Существует «классическое» выражение для сосредоточенного перехода [58]:

$$\delta f = \left(\frac{2\pi}{\Phi_0}\right)^2 \cdot S_i(0) \cdot {R_d}^2, \tag{1.22}$$

где R_d – дифференциальное сопротивление РДП, Φ_0 – квант магнитного потока, $S_i(0)$ – плотность низкочастотных токовых флуктуаций через переход. Плотность флуктуаций определятся выражением

$$S_i(0) = \frac{e}{2\pi}\left[I_{qp} \coth\frac{eV}{2kT} + 2I_s \coth\frac{eV}{kT} \right], \qquad (1.23)$$

где I_{qp} и I_s – туннельный квазичастичный ток и сверхпроводящий ток (куперовских пар), которые в сумме дают полный ток смещения через переход: $I_{qp} + I_s = I_B$. Выражение (1.23) описывает нелинейную суперпозицию теплового и дробового шумов, обусловленных физической природой джозефсоновского перехода, а (1.22) имеет наглядный физический смысл: токовые флуктуации в переходе через дифференциальное сопротивление R_d преобразуются во флуктуации напряжения, которое однозначно связано с частотой генерации соотношением Джозефсона (1.3). Численные расчёты по формулам (1.22)-(1.23) примерно на порядок расходятся к экспериментальными результатами измерения спектральной ширины линии. Причиной этого является то, что (1.23) описывает лишь собственные шумы джозефсоновского перехода, но не учитывает внешние низкочастотные флуктуации тока $\delta f_{Low\text{-}freq}$ в цепи управления и измерения РДП, обусловленные неотъемлемыми шумами в экспериментальной установке. Также в работах [119,120] было показано, что необходимо дополнительно учитывать флуктуации тока в линии управления магнитным полем, которые, в свою очередь, преобразуются во флуктуации тока через переход и также вносят вклад в уширение линии. Для этого, помимо дифференциального сопротивления R_d по току смещения, дополнительно вводится понятие дифференциального сопротивления по току управления магнитным полем, которое определяется как $R_\mathrm{d}^{\mathrm{CL}} = \partial V_\mathrm{dc} / \partial I_\mathrm{CL}$ при постоянном токе смещения. В результате многочисленных попыток учета факторов уширения была предложена эмпирическая формула, наиболее точно описывающая современные экспериментальные результаты измерения ширины линии РДП [124]:

$$\delta f = \left(\frac{2\pi}{\Phi_0}\right)^2 \cdot S_i(0) \cdot \left[R_d + K \cdot R_d{}^{CL}\right]^2 + \delta f_{Low-freq}, \qquad (1.24)$$

где уширение линии за счет внешних флуктуаций определяется выражением

$$\delta f_{Low-freq} = \frac{2}{\Phi_0}(R_d + R_d{}^{CL}) \cdot I_{Low-freq}, \qquad (1.25)$$

здесь $I_{Low\text{-}freq}$ – шумовой низкочастотный ток, обусловленный исключительно экспериментальной установкой и внешними условиями, в том числе техническими наводками, а эмпирический параметр K определяется экспериментально и по порядку величины составляет 0,05-0,1. Величина $I_{Low\text{-}freq}$ несложным образом определяется из эксперимента в резонансном режиме при малых R_d и $R_d{}^{CL}$, поскольку первый член в выражении (1.24) зависит от дифференциальных сопротивлений квадратичным образом, а второй член – линейно.

В заключении данного обзорного подраздела можно отметить, что не существует однозначного ответа на вопрос какой длины и из какой трехслойной структуры – Nb/AlO_x/Nb или Nb/AlN/NbN – источники субТГц диапазона на основе РДП более практичны, поскольку ответ зависит от конкретной практической задачи. Например, из постановки практической задачи может быть выбран приоритет по «граничной» частоте перехода от резонансного режима к режиму вязкого потока вихрей (из-за эффекта самонакачки [68]) за счёт выбора материалов РДП: для Nb/AlO_x/Nb ($V_g/3 \approx 0{,}9$мВ) она составляет ~430-440 ГГц, в то время как для Nb/AlN/NbN ($V_g/3 \approx 1{,}2$мВ) – около 580 ГГц. Наличие резонансных ступеней усложняет возможность непрерывной перестройки частоты генерации, поскольку–при выбранном постоянном токе смещения I_B между соседними ступенями отсутствуют рабочие точки по напряжению, что означает невозможность генерации при выбранном токе I_B и приводит к необходимости варьировать сразу два тока – I_B и I_{CL} – для поиска рабочей точки генерации. С другой стороны, б***о***льшее затухание в переходе приводит к ухудшению резонансных

свойств, подавлению ступеней Фиске и значительному упрощению процесса перестройки частоты путем изменения лишь магнитного поля (тока I_{CL}) при фиксированном I_B, при этом приводит к увеличению автономной ширины линии генерации и, соответственно, меньшему проценту мощности в δ-пике при работающей системе ФАПЧ. При слишком широком спектре излучения в автономном режиме (более ~20 МГц), превышающем полосу работы традиционной полупроводниковой системы ФАПЧ, фазовая стабилизация становится вовсе недоступной. Из последнего тезиса, в частности, напрямую произошёл ряд работ по созданию криогенной системы ФАПЧ с полосой захвата до 70 МГц на основе гармонического СИС смесителя в качестве фазового детектора [135-137], способной синхронизировать до ~80% мощности в пике при ширине автономной линии около 15 МГц, которая (ширина) является практически предельно допустимой для работы полупроводниковой системы ФАПЧ.

Что касается практического образца субТГц генератора, более чем 20-летний цикл работ исследователей в группе автора, включая собственно автора, привел к некоторому оптимальному для полетной миссии в рамках проекта *TELIS* дизайну РДП размером 400 × 16 мкм на основе Nb/AlN/NbN с плотностью тока около 7 кА/см^2: в таком переходе удается реализация любой частоты генерации в диапазоне от примерно 250 ГГц до примерно 700 ГГц (около 100% полосы перестройки) за счёт достаточного наклона ступеней в резонансной области, с автономной шириной линии от порядка 1 МГц до ~20 МГц, которую полупроводниковая система ФАПЧ комнатной температуры способна засинхронизировать к опорному сигналу 400 МГц. При этом джозефсоновская генерация в таком РДП наблюдается вплоть до частоты около 750 ГГц, однако, при столь высоких для ниобия частотах, низкая мощность сигнала (т.е. маленькое отношение «сигнал/шум» для используемой системы ФАПЧ) не всегда обеспечивает возможность фазовой стабилизации.

Практическая реализация РДП в составе сверхпроводникового интегрального приемника [4,37,**A24**], описанного детальнее в разделе 1.4,

осуществлена для гетеродинной *on-chip* накачки опорным сигналом приемного СИС смесителя, при этом вывод излучения за пределы линий передачи микросхемы не подразумевается концепцией прибора. Для РДП в такой реализации использованы размеры и параметры, описанные в предыдущем абзаце. Поскольку источник является сверхширокополосным по перестройке частоты, при этом обладает возможностью фазовой синхронизации выходного излучения, представляется крайне интересным реализация на его основе универсального субТГц источника в открытое пространство. Поэтому **в диссертации поставлена задача** разработки и комплексного исследования источника на основе РДП в открытое пространство (Глава 3), а также демонстрация практического применения в лабораторной спектроскопии газов (Глава 5). В качестве прототипа будет использован РДП, успешно примененный в составе микросхемы СИП, со сходными геометрическими и электрофизическими параметрами.

1.3.4. Генераторы на основе естественного массива джозефсоновских переходов в монокристалле высокотемпературного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$

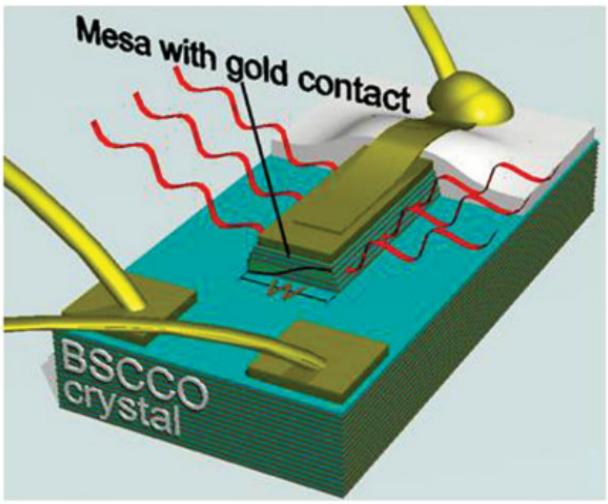
Третьей из основных существующих концепцией генератора на джозефсоновском эффекте, после описанных выше концепций на цепочке переходов и на одиночном РДП, является массив джозефсоновских переходов в слоистой монокристаллической структуре $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ (BSCCO) с критической температурой T_c около 80-90 К. В англоязычной литературе при написании химической формулы в индексе часто используется символ δ вместо x – $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$, а также добавочный индекс иногда опускается – $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$; все эти обозначения подразумевают один и тот же тип структуры.

Область исследования генераторов на основе ВТСП структуры BSCCO является наиболее обширной среди обозначенных концепций по количеству опубликованных работ: по оценке автора, на тему исследования BSCCO-генераторов в период с 2007 года (после классической работы [27]) по настоящее время опубликовано больше научных работ, чем по двум другим концепциям, вместе взятым за вдвое больший интервал времени (с 1980-х годов по настоящее время). Такая популярность научного направления объясняется, прежде всего, простотой работы с ВТСП-материалами, работающими при температурах жидкого азота (с возможным охлаждением до ~50 К путем откачки паров азота), в сравнении с НТСП-структурами, для которых необходимы более сложные криогенные установки на основе жидкого гелия (в том числе, с его ожижением в системе замкнутого цикла) с рабочей температурой около 4 К. Другой причиной является относительная простота технологических процессов: для изготовления генераторов на основе цепочек сосредоточенных и идентичных друг другу СИС переходов либо РДП требуется литография субмикронных размеров – как электронная, так и ультрафиолетовая, в то время как массив переходов в монокристалле уже образован самим выращенным монокристаллом, а образец генератора (топология) формируется несложной процедурой травления монокристалла фокусированным ионным пучком. Наконец, третьей причиной можно назвать перспективность работ в части «терагерцового провала» на частотах порядка и выше 1 ТГц, что также вносит вклад в развитие темы в свете общей популярности ТГц технологий.

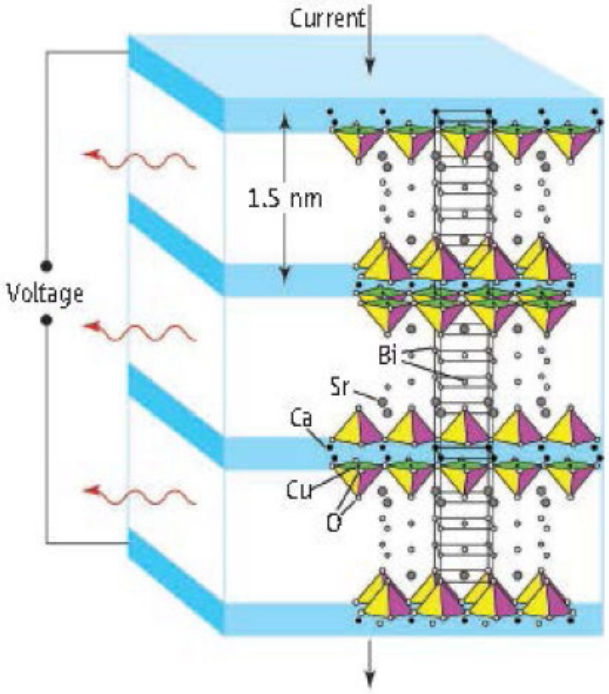
О наличии сверхпроводящих свойств в материале $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ стало известно в начале 1990-х годов; пионерской работой считается работа 1992-го года [138], в которой наблюдались эффекты Джозефсона между би-слоями CuO. Однако, значительный прорыв в данной теме начался после работы [27], в которой было зарегистрировано когерентное излучение образца $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ мощностью порядка 0,5 мкВт на частотах до 0,85 ТГц, недостижимых для СИС переходов на основе Nb, при этом образец работал

при температуре около 50 К. В течение последующих 10-15 лет наступил настоящий бум в данной теме, который можно условно сопоставить с «графеновым бумом» приблизительно того же периода в полупроводниковых технологиях. Ежегодно публиковались сотни работ в передовых научных изданиях: так, например, в работе 2012-го года [**A32**] в вводной части приведен обзорный библиографический список из 39 (!) источников за всего лишь трехлетний период 2009-2012 годов. При этом работы велись широким фронтом – публиковались множество и теоретических (напр., [139-145]), и экспериментальных работ (напр., [146-152]), из которых достаточно трудно выделить ключевые. Работы преимущественно направлены на изучение сложной многопараметрической электродинамики в системе: взаимодействие волн с геометрической структурой образца и синхронизация за счёт резонансных мод, распределение температуры в образце и механизмы образования «горячего пятна», участие «горячего пятна» в синхронизации излучения, взаимодействие сверхпроводящих слоев друг с другом, взаимодействие генератора с внешним излучением и т.д. Вместе с тем, началась активная «борьба» лидирующих групп за мощность излучения и за наивысшую рабочую частоту. Наивысшая частота генерации, продемонстрированная в работах на сегодняшний день, составляет около 11 ТГц [153], а наибольшая мощность генерации одиночного генератора – порядка 30-100 мкВт [151,154-155]. Существуют также работы по созданию массивов из нескольких отдельных образцов с целью увеличения выходной мощности – например, в работе [155] получена мощность около 600 мкВт на частоте 510 ГГц от трёх генераторов BSCCO. При этом, как и в любой области приборостроения и создания технических устройств, не следует рассматривать достигнутые рекордные значения как характерные для данного типа устройств, поскольку образцы, демонстрирующие рекордные значения, как правило, являются уникальными «штучными» образцами, плохо подходящими для практических применений.

Образец генератора BSCCO представляет собой монокристаллическую структуру, изготовленную в форме мезы (английское слово *mesa* означает «*плато*», «*плоскогорье*», «*плоская гора с крутым обрывом*»), в которой естественным образом создана система последовательно соединенных джозефсоновских переходов (см. рисунок 1.17). Поскольку в рамках настоящей диссертационной работы никакие другие структуры в форме мезы не рассматриваются, кроме генераторов на основе монокристалла BSCCO, далее по тексту термин *меза* будет идентичным сочетанию «*образец генератора на основе* $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$». Сверхпроводимость в таких структурах обусловлена «парными» слоями (би-слоями) CuO_2 толщиной порядка 0,3 нм. Эти би-слои разделены изолирующими слоями SrO и Bi_2O_3, которые выступают в качестве барьера, что естественным образом формирует в кристаллической решетке ячейку в виде джозефсоновского контакта, как показано на рисунке 1.17 б.



(а)



(б)

Рисунок 1.17 – (а) Схематичное изображение образца генератора на основе мезы BSCCO с контактными площадками из золота [150]; (б) Модельное изображение кристаллической решетки $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$, представляющей массив джозефсоновских контактов [27].

Толщина ячейки, равная периоду кристаллической решетки, составляет 1,533 нм. Таким образом, кристалл из такой структуры в форме мезы толщиной порядка 1 мкм содержит массив из ~650 последовательно соединенных идентичных джозефсоновских переходов. При приложении к такой структуре напряжения порядка 1 В, при котором напряжение на каждом контакте составляет порядка 1 В/650 ≈ 1,5 мВ, на выходе имеется электромагнитный сигнал в ТГц диапазоне. Впервые такое излучение было зарегистрировано в работе [138]. В последующих работах экспериментально было показано, что при некоторых условиях этот массив из N джозефсоновских излучателей синхронизируется, т.к. измеряемая мощность выходного излучения в некоторых случаях растет квадратичным образом ($\sim N^2$) с ростом числа переходов. На сегодняшний типичный частотный диапазон генерации составляет 0,3 – 1 ТГц (реже – до 1,5 ТГц) с выходной мощностью

от характерного значения в единицы микроватт до десятков микроватт (напр., ~30 мкВт была показана в [151,154]). Характерная площадь мезы составляет порядка $5 \cdot 10^3$-$5 \cdot 10^4$ мкм^2 (длина ~100-400 мкм; ширина ~50 мкм), а толщина – порядка 1 мкм.

Известны несколько механизмов синхронизации излучения джозефсоновских контактов внутри BSCCO. В работах [146,148] при помощи лазерной микроскопии было исследовано распределение температуры вдоль структуры в режиме генерации и было обнаружено, что в рабочем режиме внутри мезы возникает область «горячего пятна» с температурой выше критической ($T > T_c$), а также установлено волнообразное распределение температуры по длине образца. На основе этого были сделаны предположения, что «горячее пятно» некоторым образом участвует в синхронизации переходов, а в дальнейших работах предложена теоретическая модель, количественно описывающая этот процесс [144]. В других работах предполагается [149,152], что синхронизация излучения достигается за счет резонансной структуры внутри мезы, поскольку сама меза геометрически может выступать в качестве волновода и образовывать стоячие волны, подобно резонансному режиму в РДП. Третьим из рассматриваемых механизмов является синхронизация джозефсоновских осцилляторов в структуре за счет их физической близости (расстояние менее 0,3 нм), которая способствует проникновению волновых функций в соседние контакты и их взаимному влиянию. Все описанные механизмы синхронизации при различных условиях могут быть реализованы как по отдельности, так и совместно.

Традиционно мощность излучения BSCCO измерялась при помощи полупроводниковых болометров (на основе кремния либо германия) или диодов. Как и для генератора на основе РДП, в настоящее не существует стройной теории, описывающей характер излучения и его зависимость от ряда физических параметров и условий. Кроме того, не существует даже эмпирической модели для оценки ширины спектральной линии по примеру

выражения (1.24) для РДП, поскольку меза считается физически более сложной системой по сравнению с РДП. Так, например, к множеству эффектов, существующих в РДП с практически постоянной и однородно распределенной температурой, в случае генератора BSCCO добавляется многопараметрическая температурная составляющая – обратный загиб вольтамперной характеристики из-за физического нагрева за счет лишь постоянного тока смещения, наличие «горячего» пятна, означающее сильно неоднородное пространственное распределение температуры, переменное в каждой рабочей точке количество задействованных в процессе излучения переходов и т.д. Одним из важнейших факторов в принципах управления таким генератором является то, что **частота генерации не зависит прямым образом от напряжения на ВАХ образца из соотношения Джозефсона**, что хорошо работает для одиночного РДП и лишь с небольшой погрешностью для цепочки планарных СИС переходов, потому как в мезе рабочее напряжение на одиночных контактах зависит от неизвестного количества контактов, находящихся в сверхпроводящем состоянии в данной рабочей точке вне области «горячего пятна».

В большинстве, экспериментальные спектральные исследования BSCCO генераторов проводились при помощи Фурье-спектрометров на основе оптических интерферометров (Майкельсона либо аналогичных). Спектральное разрешение таких спектрометров составляет порядка 1 ГГц, что много больше фактической ширины линии излучения при ряде условий (режимов), поэтому подобные измерения с достаточной точностью говорят о частоте генерации и позволяют оценить мощность излучения, но не позволяют судить о форме спектральной линии. В работе с участием автора [**A32**] впервые была измерена форма спектральной линии излучения при помощи гетеродинного СИС приёмника с разрешением лучше 0,1 МГц (описание СИП приведено в подразделе 1.4) и показана нетривиальная зависимость ширины линии излучения как от рабочей точки на ВАХ структуры, так и от температуры. При малых токах смещения в отсутствии «горячего пятна»

спектр излучения имеет большую ширину δf~1-10 ГГц, т.е. генератор является скорее источником широкополосного сигнала. В присутствии «горячего пятна» δf составляет от десятка до несколько десятков мегагерц и, в наилучших рабочих точках и с учётом подстройки температурного режима, может достигать единиц мегагерц. До настоящего исследования не существовало модели, способной количественно объяснить нетривиальные зависимости ширины линии от рабочих параметров системы (рабочего тока, напряжения, температуры), поэтому в настоящей работе **поставлена задача** проведения дополнительных серий экспериментов в широком диапазоне рабочих параметров с целью построения численных моделей, качественно и количественно согласующихся с экспериментальными результатами. Решение описанной задачи представлено в разделе 4.1.

Поскольку генератор BSCCO сам по себе уже является системой со сложной тепло- и электродинамикой, другим слабо изученным вопросом является синхронизация излучения нескольких образцов. Как было обозначено выше, существуют работы по измерению мощности излучения от нескольких отдельно расположенных мез (напр., [155]) с целью увеличения выходной мощности в условиях отсутствия непосредственной «контактной» тепловой связи генераторов друг с другом (связь опосредована подложкой и тепловым излучением). В таком случае управление частотой является достаточно нетривиальной задачей, поскольку в отдельной мезе рабочее напряжение на ВАХ не определяет частоту генерации, а измерение мощности болометрическими методами приводит к суммарной мощности нескольких мез, которые могут излучать сигнал на разных частотах. Для точного совпадения частот отдельных генераторов требуется непосредственный контроль частоты каждого генератора в процессе задания рабочих параметров, что достижимо только при использовании гетеродинного приёмника. Поэтому в данной работе была **поставлена дополнительная задача** проведения спектральных исследований с высоким разрешением при взаимодействии излучения двух отдельных генераторов, решение которой описано в

разделе 4.2. Далее, поскольку генератор на основе BSCCO изначально реализован как универсальный источник в открытое пространство, представляется интересным его реализация в составе практического устройства. Поэтому в диссертации также **поставлена задача** демонстрации применения источника для спектроскопии газовых смесей (Глава 5).

1.3.5. Проблемы превышения «щелевой» частоты сверхпроводника и тепловые проблемы

Предельная рабочая частота приемных систем на основе высококачественных СИС переходов $Nb/AlO_x/Nb$ с щелевым напряжением ~2,8 мВ, которое соответствует джозефсоновской частоте около 1,35 ТГц, включенных в традиционно используемые линии передачи $Nb/SiO_2/Nb$, на практике составляет величину порядка ~0,7 ТГц (напр., [21,31,37]). При этом использование переходов Nb/AlN/NbN с более высоким щелевым напряжением ~3,6 мВ (что соответствует джозефсоновской частоте уже около 1,7 ТГц) с неизменными линиями передачи практически не изменяет предельную рабочую частоту приемника, которая повышается лишь до ~0,75 ТГц (напр., [4,23,32,**A24**]). Причина этого состоит в том, что верхний частотный предел приемной структуры, помимо собственно СИС перехода, определяется всеми элементами электродинамической системы, включая линии передачи входного тракта. В свою очередь, частотный предел сверхпроводящих линий передачи определяется фундаментальными ограничениями, связанными с энергетической щелью $\Delta(T)$ используемых материалов, согласно теории Маттиса и Бардина [156-157]. Эти ограничения определяются частотной зависимостью потерь в пленках и их скачкообразным ростом при превышении щелевой частоты. Так, линии передачи на основе тонких пленок чистого ниобия обладают максимальной рабочей частотой около 750 ГГц ($\Delta_{Nb} \approx 1{,}4$ мэВ при $T = 4{,}2$ К), выше которой потери в пленках не позволяют принимать и обрабатывать сигнал. Поэтому в системах,

работающих на частотах вплоть до 1 ТГц и выше, используются более высокочастотные линии передачи с более высоким значением Δ, в частности на основе пленок NbTiN [32,158-159], с фундаментальным ограничением порядка 1,2-1,4 ТГц (Δ_{NbTiN} ~ 2,5-2,7 мэВ при T = 4,2 К) [160-161].

На рисунке 1.18 из работы [158] представлена сравнительная зависимость потерь в пленках Nb и NbTiN согласно теории Маттиса и Бардина; на которой показан скачкообразный рост потерь начиная с частоты ~700 ГГц для Nb, и начиная с ~1,2 ТГц для NbTiN. Однако, при использовании линий передачи с двумя электродами из NbTiN (т.е. NbTiN/SiO_2/NbTiN) возникает дополнительный негативный эффект перегрева СИС перехода, встроенного в линию передачи, из-за того, что на границе Nb и NbTiN («интерфейс» электродов СИС перехода и линии передачи) из-за различия щелей Δ_{Nb} и Δ_{NbTiN} естественным образом возникает энергетический барьер для квазичастиц в ниобии, препятствующий их оттоку в электрод линии передачи. Помимо слабого оттока квазичастиц из-за энергетического барьера присутствует дополнительный фактор низкой теплопроводности сверхпроводящего NbTiN, что также способствует слабому оттоку тепла.

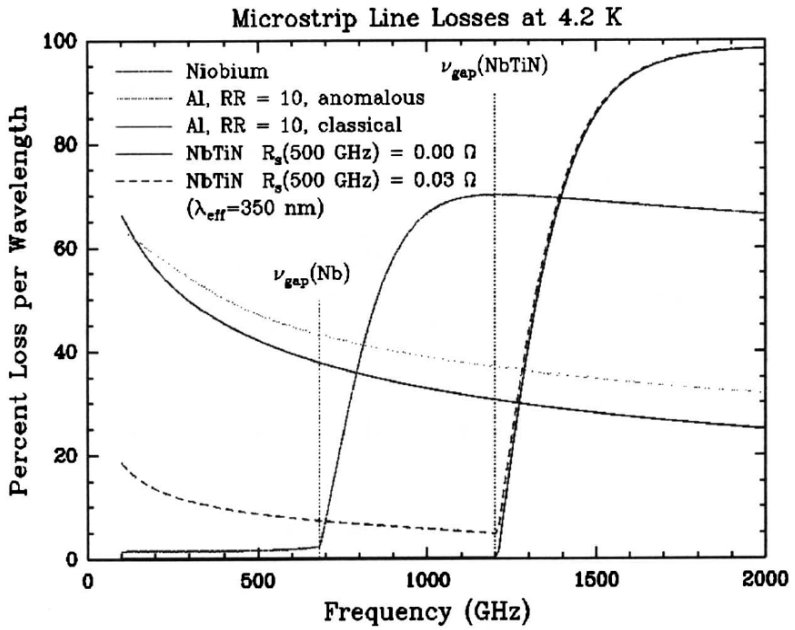
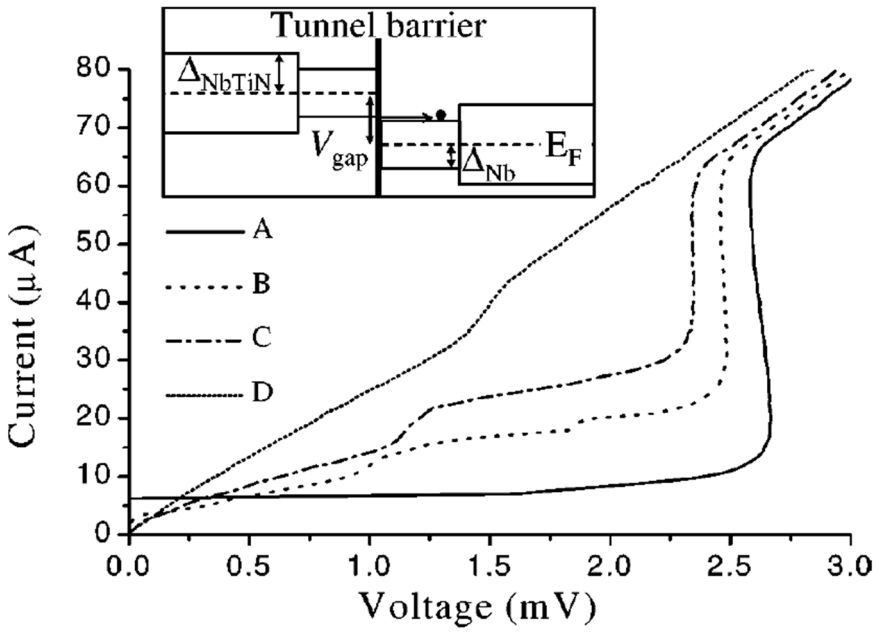
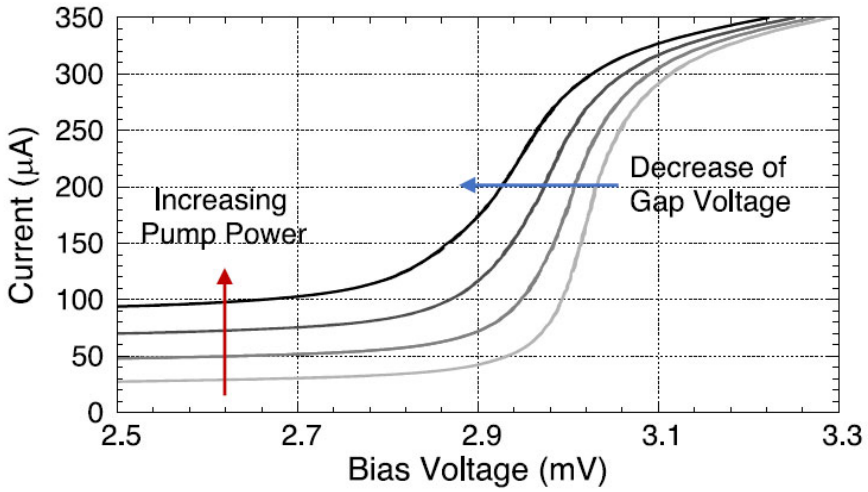


Рисунок 1.18 – Зависимость высокочастотных потерь в линиях передачи, изготовленных из различных материалов: Nb, NbTiN и Al [158].

Такой перегрев наблюдается непосредственно при измерении ВАХ и продемонстрирован, например, в работах [162-163] – см. рисунок 1.19 а. Значительный нагрев перехода приводит к обратному «загибу» ВАХ (участок отрицательного дифференциального сопротивления) при измерении по постоянному току и, в случае использования СИС в качестве смесителя приемной системы, неизбежно приводит к ухудшению шумовых характеристик [164]. Для улучшения отвода тепла при использовании линий передачи $NbTiN/SiO_2/NbTiN$ в некоторых работах использовалась дополнительная накладка из золота (нормального металла с высокой теплопроводностью) между СИС переходом и верхним электродом линии передачи, которая способствует более эффективному оттоку тепла из области перехода [165-166].



(а)



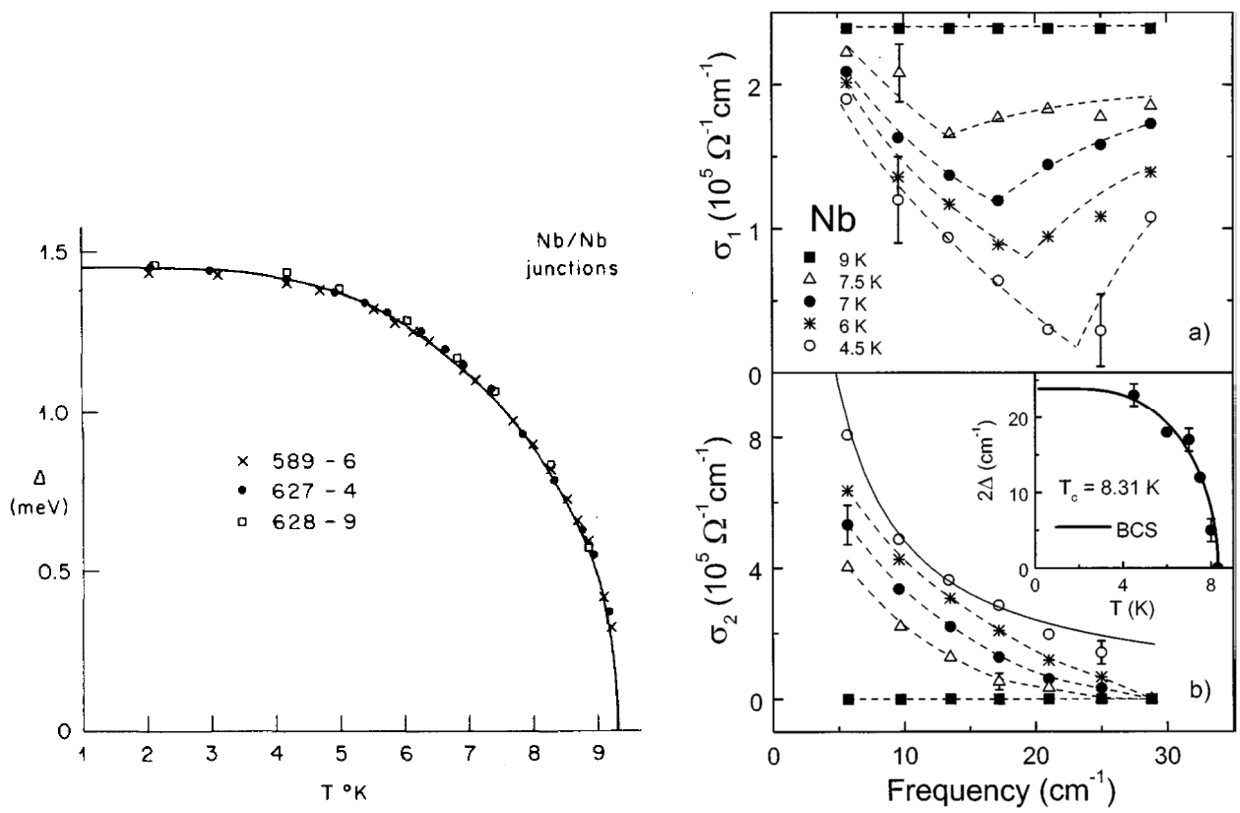
(б)

Рисунок 1.19 – (а) Серия ВАХ СИС перехода $Nb/AlO_x/Nb$, встроенного в линию передачи $NbTiN/SiO_2/NbTiN$: без внешнего воздействия (сплошная кривая A) и с накачкой сигналом на частоте 895 ГГц с различным уровнем мощности (пунктирные кривые B,C,D). Вставкой показана энергетическая диаграмма «интерфейса» электрода СИС с электродом линии передачи. Наблюдается нагрев СИС перехода даже в отсутствии высокочастотной накачки [162]. (б) Серия ВАХ СИС перехода Nb/AlN/NbN, встроенного в линию передачи $NbTiN/SiO_2/Al$: без внешнего воздействия (нижняя кривая) и с накачкой сигналом на частоте 840 ГГц с различным уровнем мощности (три верхние кривые). Вертикальная стрелка указывает направление возрастания мощности сигнала, горизонтальная – направление уменьшения щелевого напряжения перехода [164].

Наиболее эффективными и успешно работающими в действующих приемных системах на основе СИС переходов являются линии передачи $NbTiN/SiO_2/Al$ [23,159,164,167-168], в которых верхний электрод из алюминия при рабочей температуре около 4 К является нормальным металлом и обеспечивает теплоотвод; такие линии обладают достаточно низким уровнем потерь вплоть до 1 ТГц, а верхний частотный предел составляет около 1,2 ТГц. При использовании в СИС приемниках на основе $Nb/AlO_x/Nb$ или Nb/AlN/NbN линий передачи $NbTiN/SiO_2/Al$ на рабочих частотах выше 700 ГГц известна также другая проблема – нагрев СИС перехода под воздействием внешнего сигнала гетеродина на частоте выше щелевой частоты ниобия – см. рисунок 1.19 б. Даже при значительно улучшенном теплоотводе

за счёт алюминиевого электрода по сравнению со случаем из рисунка 1.19 а наблюдается заметное уменьшение щелевого напряжения СИС перехода вследствие его нагрева. Эффект нагрева практически не проявляется на частотах накачки ниже 700 ГГц [21,23,123,124,126,**A8,A13,A42,A45**] и становится существенным при достижении предельной рабочей частоты ниобия, из которого выполнен один из электродов СИС контакта [164,167,**A33**,**A34**].

Таким образом, воздействие на СИС переход сигналом высокой частоты (порядка и выше щелевой частоты ниобия ~750 ГГц) неизбежно приводит к его нагреву, что в комбинации с низкой теплопроводностью сверхпроводящих материалов приводит к повышению рабочей температуры перехода на величину ~0,5-1,5 К от условно «базовой» рабочей температуры 4,2 К «абсолютно невозмущенного» состояния (без смещения по постоянному току и воздействия на высокой частоте). Несмотря на то, что такое изменение температуры ΔT кажется незначительным на первый взгляд, оно порой существенно сказывается на характеристиках электродинамической системы на основе низкотемпературных сверхпроводников, поскольку ΔT является значительным по сравнению с T_c. Как видно из зависимости энергетической щели ниобия от рабочей температуры, представленной на рисунке 1.20 а [169], повышение температуры с 4,5 К до 6 К (т.е. более 15% от $T_c^{Nb} \approx 9$ К), приводит к изменению Δ на величину порядка 0,1 мэВ, что довольно значительно сказывается на электродинамических параметрах системы. В частности, из рисунка 1.20 б [170] видно, что повышение температуры с 4,5 К до 6 К приводит к увеличению действительной части проводимости на частоте 750 ГГц (или 25 $см^{-1}$ в единицах шкалы графика) примерно в 4 раза.



(а) (б)

Рисунок 1.20 – (а) Зависимость энергетической щели ниобия от температуры: символы (×,●,□) – три разных экспериментальных образца, сплошная кривая – теоретическая зависимость для Δ = 1,45 мэВ, T_c = 9,3 К [169].
(б) Частотные зависимости действительной (сверху) и мнимой (снизу) частей проводимости ниобия при различных температурах от 4,5 до 9 К [170].

Поскольку воздействие на частоте выше щелевой частоты материала в некотором смысле «превращает» сверхпроводник в нормальный металл за счёт разрыва куперовских пар, при работе СИС перехода именно вблизи щелевой особенности сверхпроводящих материалов (по частоте и/или мощности воздействия) проявляются фундаментальные ограничения исключительных эффектов, таких как эффекты Джозефсона, происходящих именно в условиях слабого контакта двух сверхпроводников. Поэтому исследование тепловых эффектов, происходящих в джозефсоновских системах, включающих ТГц линии передачи, является интересным как для фундаментальной науки – например, исследование фундаментальных ограничений для проявления эффектов Джозефсона, так и с прикладной точки

зрения – например, при создании приёмных и генерирующих систем субТГц и ТГц диапазона.

Схожая картина наблюдается и для высокотемпературных сверхпроводников, таких как BSCCO, где именно тепловые условия в структуре приводят, во-первых, к понижению щелевого напряжения и образца и, следовательно, рабочей частоты генерации, во-вторых, к медленным (инерционным) тепловым процессам, в частности, затрудняющим реализацию фазовой автоподстройки при помощи внешней СВЧ системы, в-третьих, накладывают ограничения на размер массива и, соответственно, предельную мощность генерации.

Одним из важных следствий высокой чувствительности электродинамической системы на основе НТСП СИС переходов к малым изменениям температуры является необходимость обеспечения качественного теплового контакта с охладителем – как правило, с «холодной плитой» криостата. Другим важным следствием является то, что именно температурный режим рабочей системы может накладывать практические ограничения на возможность джозефсоновской генерации как таковой, т.е. возможность создания практического генератора ТГц диапазона. Поэтому в данной работе, помимо того, что во всех экспериментах уделено отдельное внимание качеству теплового контакта, в частности с использованием запатентованного решения установки контактов методом ультразвуковой сварки **[A50]**, была **поставлена задача** исследования тепловых механизмов в СИС переходах Nb/AlN/NbN, встроенных в линии передачи NbTiN/SiO_2/Al, под воздействием мощного сигнала на частоте 1,1 ТГц лампы обратной волны. Данная работа представлена в разделе 3.9.

1.4. Сверхпроводниковый интегральный приемник субТГц диапазона

Основой многих экспериментальных исследований в рамках настоящей работы является уникальный прибор – сверхпроводниковый интегральный

приемник, разработанный в период с середины 1990-х по конец 2000-х годов в научной группе Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, в которую входит автор диссертации, при непосредственном участии автора, совместно с Институтом космических исследований Нидерландов, г. Гронинген [21-23,31,37,127-129,171,**A24**,**A45**]. Ключевая идея СИП – объединение субТГц генератора гетеродина на основе РДП и приемного СИС смесителя на одной микросхеме – впервые была озвучена в 1993-м году [130], затем в течение последующих ~15 лет доведена до стадии запусков прибора на высотном аэростате в составе научного инструмента *TELIS* с целью исследования атмосферных газов [4,38]. Интересно заметить, что генератор на основе РДП получил широкое развитие именно в рамках разработки СИП с целью доведения его (генератора) до практической реализации [22,68,117-120,123,128,134,171]. Помимо того, что СИП является одним из ключевых инструментов в настоящей работе для спектральных исследований с высоким разрешением в диапазоне 450 – 700 ГГц, важно отметить, что *on-chip* генератор гетеродина на основе РДП в составе СИП явился прототипом для разрабатываемого источника на основе РДП с излучением сигнала в открытое пространство. Таким образом, множество фундаментальных знаний о динамике РДП и технических наработок по его применению в качестве генератора субТГц диапазона, во-первых, были получены именно в период разработки СИП с целью его использования для атмосферных исследований в рамках крупного международного проекта, во-вторых, были получены при непосредственном участии автора и явились важным научным заделом для диссертационного исследования.

Блок-схема установки СИП представлена на рисунке 1.21. На одной микросхеме интегрированы все ключевые элементы гетеродинного приемника субТГц диапазоне: гетеродин на основе РДП, СИС смеситель, интегрированный с планарной дипольной антенной с квантовым уровнем шумов, а также дополнительный гармонический смеситель (ГС),

выполненный также на основе СИС перехода и использующийся для стабилизации излучения РДП при помощи внешней системы ФАПЧ в цепи обратной связи.

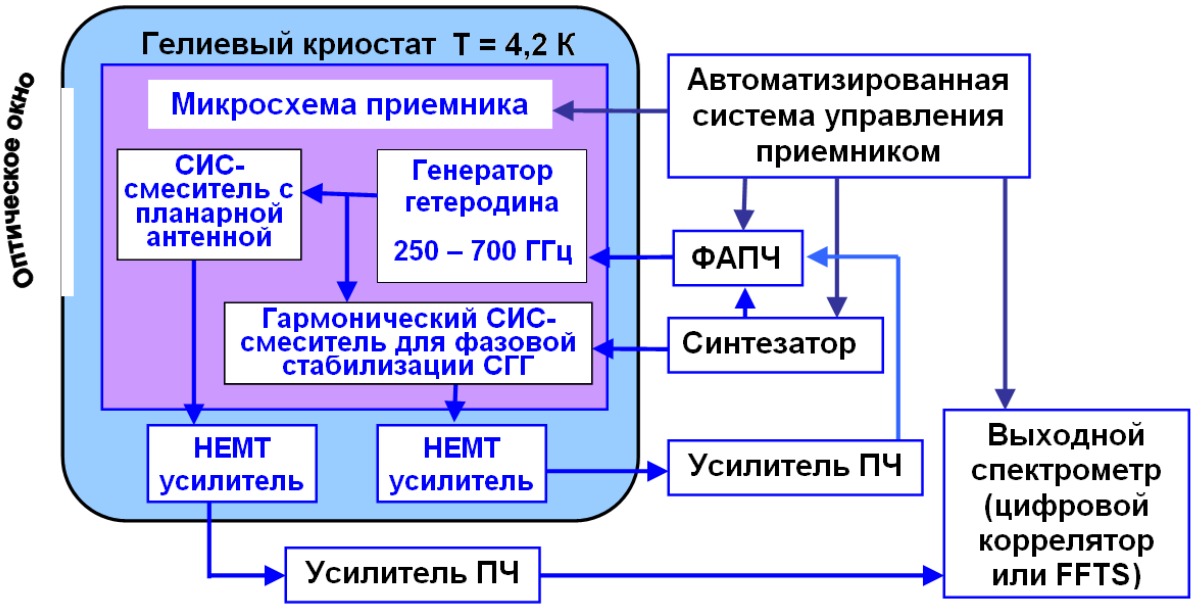


Рисунок 1.21 – Блок-схема установки СИП **[А45]**. На схеме использованы не введенные в диссертации обозначения: СГГ – сверхпроводниковый генератор гетеродина, то же что генератор на основе РДП; FFTS (от англ. *Fast Fourier Transform Spectrometer*) – «быстрый Фурье-преобразователь».

Генератор на основе РДП и СИС смесители выполнены на основе высококачественных трёхслойных структур Nb/AlO_x/Nb либо Nb/AlN/NbN с толщиной барьера ~1 нм и плотностью критического тока до 10 кА/см^2. Микросхема СИП размером 4 × 4 × 0,5 мм изготовлена на подложке из высокоомного кремния методами магнетронного напыления и электронно-лучевой литографии (при изготовлении фотошаблонов субмикронной точности), характерные размеры СИС смесителя составляют порядка 1 мкм^2. Микросхема устанавливается на плоской поверхности кремниевой полуэллиптической собирающей линзы для фокусировки входного излучения на дипольной квазиоптической антенне. Материал подложки и линзы выбран одинаковым для минимизации внутренних отражений на границе сред, а линза дополнительно покрыта антиотражающим покрытием для повышения

эффективности приема. Для охлаждения микросхемы СИП и усилителей на основе транзисторов на высокой подвижности электронов (англ. *HEMT*, от *high electron mobility transistor*) используется заливной криостат с жидким гелием 4,2 К. При этом рабочая температура микросхемы с учётом локального тепловыделения за счет пропускания рабочих токов (в т.ч. питание *HEMT* усилителей) и внешнего притока тепла через окно криостата с ИК фильтрами и кабели может составлять до 4,5 К. Опционально для охлаждения может использоваться система замкнутого цикла на основе криогенного рефрижератора с близким значением рабочей температуры (~4 - 4,5 К). Недостатком системы замкнутого цикла являются небольшие температурные флуктуации с частотной около 1 Гц в процессе охлаждения и поддержания температуры за счёт работы «пульсирующей трубки» охладителя, приводящие к флуктуациям электрофизических параметров, в т.ч. частоты генерации РДП.

Выходной сигнал СИП на промежуточной частоте (ПЧ) лежит в диапазоне 4 – 8 ГГц, который определяется параметрами тракта ПЧ, преимущественно – диапазоном и амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) используемых HEMT усилителей. В качестве оконечного прибора в лабораторных условиях используется коммерческий полупроводниковый анализатор спектра СВЧ диапазона, который анализирует выходной сигнал ПЧ. Для стабилизации гетеродина (как частотной, так и фазовой) используется петля обратной связи с частотным дискриминатором и системой ФАПЧ, которая, в свою очередь, использует выходной сигнал ПЧ гармонического смесителя в диапазоне 0 – 1 ГГц. В качестве опорного сигнала для гармонического смесителя используется сигнал внешнего синтезатора СВЧ в диапазоне 19-21 ГГц, при этом номер смешиваемой (рабочей) гармоники лежит в диапазоне 20-35.

Чувствительность СИП оценивается путем измерения его эквивалентной шумовой температуры с использованием достаточно стандартной лабораторной методики измерения величины *Y-factor* (см., например, [172-173]) – отношения интегральной мощности сигнала ПЧ в

режиме подачи на детектор «комнатной» (T = 295 K) и «холодной» (T = 77 K) чернотельных нагрузок, где «холодный» чернотельный источник охлаждается жидким азотом. Зависимость шумовой температуры, измеренной в двухполосном режиме приема (англ. *DSB* – от "*double sideband"*), от частоты представлена на рис. 1.22, наилучшее значение составляет ~120 K на частотах около 495 ГГц и 600 ГГц [4].

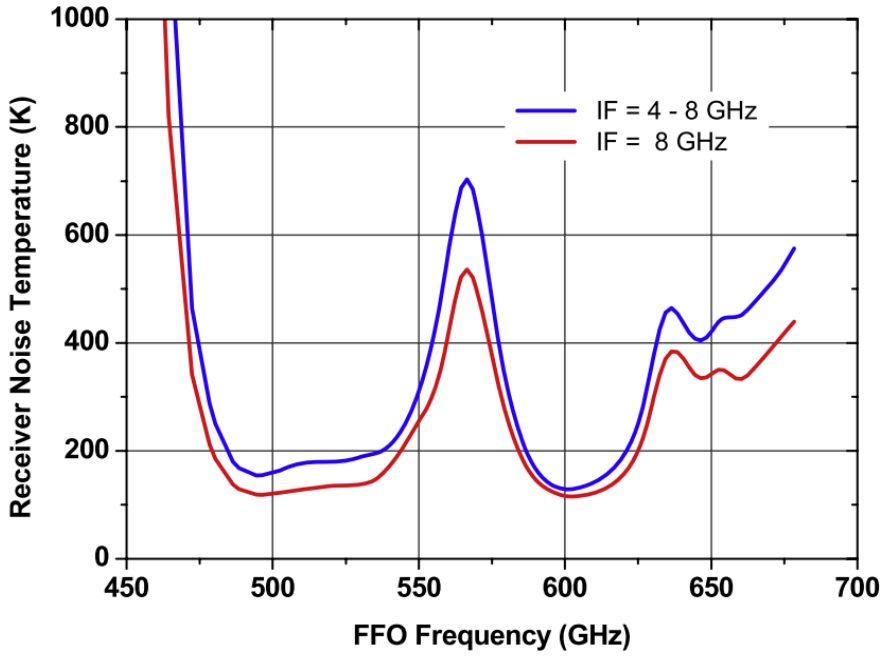


Рисунок 1.22 – Шумовая температура полетного образца СИП на частоте ПЧ 8 ГГц и интегральная в диапазоне ПЧ 4 – 8 ГГц, из работы [4].

Спектральное разрешение СИП составляет величину порядка 0,1 МГц и оценивалось при помощи регистрации сигнала излучения внешнего перестраиваемого субТГц генератора в окрестности рабочей частоты 600 ГГц с шагом 80 кГц – см. рисунок 1.23 [**A45**]. В качестве источника использовалась лампа обратной волны (ЛОВ) с умножителем на квантовых полупроводниковых сверхрешётках [54,56] с собственной шириной линии порядка 50 кГц и независимой системой ФАПЧ. Из рисунка 1.23 видно, что любые две соседние линии, отстоящие на 80 кГц друг от друга по частоте, достаточно хорошо различимы как отдельные, следовательно, спектральное

разрешение СИП в данном исследовании составляет порядка 0,1 МГц. Интересно отметить, что полученное разрешение определяется автономной шириной линии исследуемого источника, так что при исследовании более узких линий фактическое спектральное разрешение может составить ещё меньшую величину.

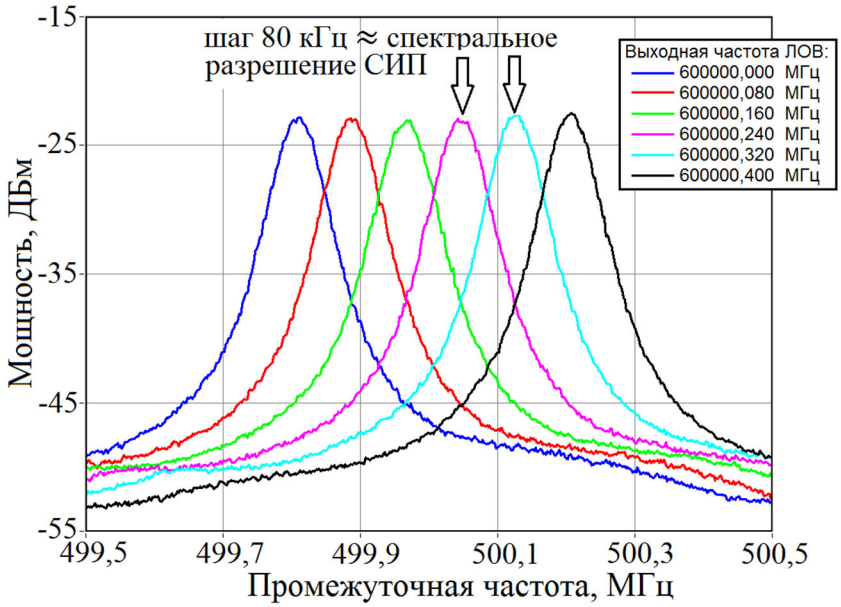


Рисунок 1.23 – Спектры шести линий направленного субТГц источника на основе ЛОВ вблизи частоты 600 ГГц, записанных с шагом по частоте 80 кГц **[А45]**. Измерение спектров производилось в диапазоне ПЧ 0 – 1 ГГц.

1.5. Выводы и постановка задач исследования

В заключение Главы 1 обобщим основные выводы из рассмотренного обзора литературы в виде коротких тезисов, после чего будет сформулирована постановка задачи.

Выводы

– Терагерцовый и субтерагерцовый диапазоны частот активно осваиваются последние 2-3 десятилетия и используются в широком спектре практических задач, таких как радиоастрономические исследования и мониторинг

атмосферы, биомедицинские исследования и медицинская диагностика, системы связи и информационно-телекоммуникационные технологии, микроскопия в ТГц диапазоне, фундаментальные исследования в физике, химии, биологии. Происходит постоянное развитие методов и приборов ТГц диапазона, поэтому область применения ТГц технологий расширяется.

– Имеется существенный недостаток практичных и доступных широко перестраиваемых источников ТГц диапазона. Несмотря на достаточно богатое количество принципиальных реализаций таких источников – электровакуумные устройства (лампы бегущей волны, лампы обратной волны, клистроны, магнетроны, гиротроны и др.), фотосмесители, квантово-каскадные лазеры, умножители частоты (на диодах Шоттки, на квантовых сверхрешётках и др.), – ни один из существующих типов ТГц генераторов не рассчитан на массовое производство и массовое потребление, а многие образцы генераторов являются уникальными наработками отдельных научных групп, т.е. отсутствует доступность таких источников.

– Одним из перспективных типов источников субТГц диапазона являются источники на основе нестационарного эффекта Джозефсона, который (эффект) заключается в генерации высокочастотного электромагнитного излучения при приложении постоянного напряжения к контакту из двух слабо связанных сверхпроводников – джозефсоновскому контакту. Помимо генерации в субТГц диапазоне, джозефсоновские контакты нашли применение в ряде других областей: приемные системы на основе сильной нелинейности СИС смесителей, стандарт напряжения, СКВИД магнитометры, квантовые вычисления – кубиты, одноквантовая логика, параметрические усилители сигналов.

– Воздействие на сверхпроводник внешнего сигнала на частоте выше щелевой частоты материала, которая определена его энергетической щелью, приводит к сильному изменению его проводимости. Поэтому сверхпроводящие линии передачи имеют резко выраженную предельную рабочую частоту, при превышении которой сигнал значительно затухает. Кроме того, воздействие

на СИС переход сигналом на частоте выше щелевой частоты его электрода(-ов) приводит к его нагреву, что также значительно сказывается на ряде характеристик перехода в силу их температурной зависимости. Слабые изменения температуры (~1 K) в системах на основе низкотемпературных сверхпроводников могут приводить к значительным изменениям характеристик и режимов работы.

– Существует несколько практических и конструктивных реализаций джозефсоновского генератора, наиболее развитые из которых следующие три: а) планарная **ц**епочка (массив) **д**жозефсоновских **п**ереходов (ЦДП) с количеством от нескольких десятков до нескольких тысяч; б) одиночный распределённый джозефсоновский переход (РДП); в) естественный **м**ассив **д**жозефсоновских **п**ереходов в монокристалле **в**ысокотемпературного (МДПВ) сверхпроводника BSCCO.

– Несмотря на широкое развитие перечисленных концепций и конструктивных реализаций джозефсоновских генераторов, имеется ряд нерешенных задач как с фундаментальной, так и с практической точки зрения. Диссертация посвящена решению широкого круга задач, связанных со всеми тремя типами реализации джозефсоновских генераторов.

Постановка задач исследования

1. Разработка экспериментальных стендов и методик для проведения комплексных исследований генераторов с сигналом излучения в открытое пространство:

- спектральных исследований излучения в субТГц диапазоне с высоким разрешением, позволяющим точно восстанавливать форму спектральной линии, в узкой полосе анализа (шириной до 4 ГГц);
- спектральных исследований излучения в ТГц диапазоне с низким разрешением, позволяющим установить наличие сигнала и определить частоту (набор частот) генерации, в широкой полосе анализа (до 2 ТГц);

- исследований основных параметров генерации (частоты, мощности, ширины спектральной линии) в зависимости от температуры и режима работы для генераторов на основе МДПВ;
- исследований накачки СИС переходов мощным сигналом лампы обратной волны на частоте выше 1 ТГц (выше щелевой частоты ниобия);
- спектральных исследований поглощения с использованием газовой ячейки и возможностью задания давления.

2. Разработка практического субТГц источника с сигналом излучения в открытое пространство на основе РДП, интегрированного с передающей антенной, с использованием СИС структур $Nb/AlO_x/Nb$ и Nb/AlN/NbN с рабочей температурой 4,2 К. Исследование его ключевых физических характеристик – диапазона перестройки частоты, мощности генерации, спектральных характеристик выходного излучения с высоким разрешением, предельной рабочей частоты генерации. Реализация фазовой синхронизации генератора в разработанном конструктивном исполнении.

3. Прямое наблюдение и экспериментальное исследование гармоник джозефсоновского генератора на основе РДП непосредственно на частоте соответствующей гармоники при настройке генератора на основную частоту.

4. Наблюдение и исследование тепловых процессов, вызванных воздействием на СИС переход сигнала на ТГц частоте, превышающей щелевую частоту сверхпроводящих электродов перехода.

5. Экспериментальное исследование спектральных характеристик джозефсоновского генератора на основе МДПВ в монокристалле BSCCO, излучающего в открытое пространство, в зависимости от режима работы (области рабочих точек ВАХ) и температуры образца в широком диапазоне параметров, позволяющее построить практическую численную модель для описания полученных экспериментальных результатов. Исследование практической возможности частотной стабилизации и фазовой синхронизации излучения при помощи внешней системы фазовой автоподстройки частоты.

6. Исследование практической возможности синхронизации излучения двух отдельных генераторов на основе BSCCO, расположенных на одной микросхеме.

7. Экспериментальное исследование спектральных характеристик генератора на основе ЦДП Nb/NbSi/Nb, интегрированного с выходной волноводной линией передачи, с высоким спектральным разрешением.

8. Разработка лабораторной системы детектирования газов методом регистрации линий поглощения в ТГц диапазоне с использованием активного источника на основе РДП. Демонстрация практической работы системы на примере регистрации линий поглощения газов.

9. Разработка лабораторной системы детектирования газов методом регистрации линий поглощения в ТГц диапазоне с использованием активного источника на основе BSCCO. Демонстрация практической работы системы на примере регистрации линий поглощения газов. Исследование возможности спектроскопии газов как при узкополосном сигнале источника, так и при использовании широкополосного сигнала, близкого к шумовому.

Глава 2

Методы экспериментального исследования характеристик сверхпроводниковых генераторов субтерагерцового диапазона

Поскольку диссертационное исследование объединяет в себе две независимые области науки – терагерцовый диапазон частот и сверхпроводниковую микроэлектронику, – при разработке установок для проведения исследований оказалось необходимым объединение широкого круга экспериментальных методов. Несмотря на то, что большинство и использованных методов являются стандартными и распространенными в лабораторных условиях, практически не существует коммерческих приборов ТГц диапазона, готовых к работе непосредственно после распаковки (приобретения). Ввиду отсутствия готовых промышленных решений, как правило, устройства ТГц диапазона разрабатываются в лабораторных условиях для решения конкретной задачи.

Похожа картина наблюдается и в области сверхпроводниковой микроэлектроники. Сверхпроводниковые устройства практически всегда являются уникальными разработками отдельных научных групп и изготавливаются в штучных количествах с некоторыми вариациями технологических параметров. Так, например, в работе используются уникальные приборы, существующие исключительно в распоряжении научного коллектива диссертанта, один из которых – сверхпроводниковый интегральный приемник субТГц диапазона частот, устройство и характеристики которого подробно описаны в разделе 1.4. Другим уникальным прибором является СИС приемник диапазона 200-300 ГГц с опорным генератором на основе умножителя на диоде Шоттки. При этом, в силу специфики низкотемпературной сверхпроводимости как таковой, работа с такими устройствами дополнительно включают в себя работу с криогенными жидкостями, а также с криогенной и вакуумной техникой.

Большинство описанных в данном разделе экспериментальных установок, за исключением блоков измерения вольтамперных характеристик и отдельных составных частей в виде готовых единиц продукции (таких как сосуд Дьюара, заливной криостат коммерческого производства, откачной стенд на основе турбомолекулярного насоса и др.), были собраны автором либо при непосредственном участии автора.

2.1. Криогенные системы для охлаждения сверхпроводниковых структур

Для охлаждения сверхпроводящих структур до температуры 4,2 К использовались три различных методики – 1) непосредственное погружение образца в жидкий гелий; 2) охлаждение от «холодной плиты» в вакуумном заливном криостате, и 3) охлаждение от «холодной плиты» в вакуумном криостате на основе рефрижератора замкнутого цикла.

2.1.1. Погружная зонд-вставка в жидкий гелий

Фотография зонд-вставки представлена на рисунке 2.1. Вставка обеспечивает независимое управление тремя элементами сверхпроводниковой микросхемы – одним РДП и двумя СИС переходами малых размеров, для каждого из которых в силу их специфики отведено различное количество контактов (проводов). Для управления РДП используется в сумме 6 контактов – два для задания постоянного тока смещения ($+I^{B}_{FFO}$, $-I^{B}_{FFO}$), два для независимого измерения постоянного напряжения ($+V^{B}_{FFO}$, $-V^{B}_{FFO}$) и два для независимого задания тока линии управления локальным магнитным полем в переходе ($+I^{CL}_{FFO}$, $-I^{CL}_{FFO}$). Для управления «классическим» СИС переходом малых размеров используется 3 контакта, один из которых продублирован для независимого задания/измерения тока и напряжения: $+I,V^{B}_{SIS}$, $-I^{B}_{SIS}$, $-V^{B}_{SIS}$. Как было отмечено выше, на зонд-вставке имеются контактные выводы для управления двумя такими СИС переходами. Для одного из СИС переходов, как и для РДП, предусмотрена возможность задания магнитного поля путем пропускания тока через нижний электрод; для этого имеются дополнительные

2 контакта – $+I^{CL}_{SIS1}$, $-I^{CL}_{SIS1}$. Электрические контакты платы зонд-вставки с контактными площадками микросхемы осуществляется прижимным методом чипа к полоскам из фосфорной бронзы, покрытым слоем золота, за счёт естественной «подпружиненности».

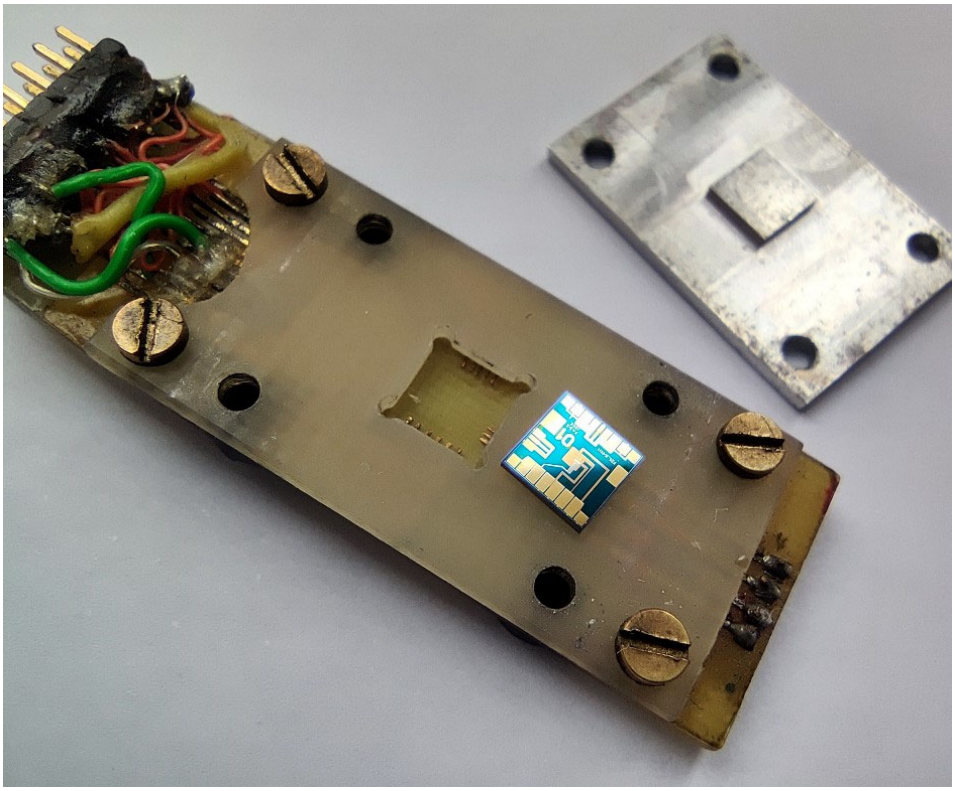


Рисунок 2.1 – Фотография погружной зонд-вставки для исследования ВАХ РДП и СИС переходов малого размера. На зонд-вставке лежит рабочая микросхема размером 4×4 мм, размер «окна» в текстолите соответствует размеру микросхемы, а расположение контактных площадок микросхемы в точности соответствует расположению полосок на вставке. За вставкой показана прижимная «крышка» зонда-вставки, фиксирующая положение микросхемы в «окне» и обеспечивающая прижим контактов.

Эксперименты с использованием погружной зонд-вставки использованы для измерения вольтамперных характеристик сверхпроводниковых элементов по постоянному току, в том числе в результате взаимодействия элементов микросхемы друг с другом на ТГц частоте; связь элементов микросхемы с внешней системой на высокой частоте не предусмотрена. Единственным исключением является эксперимент с волноводным выходом из гелиевой (криогенной) ёмкости сосуда Дьюара в

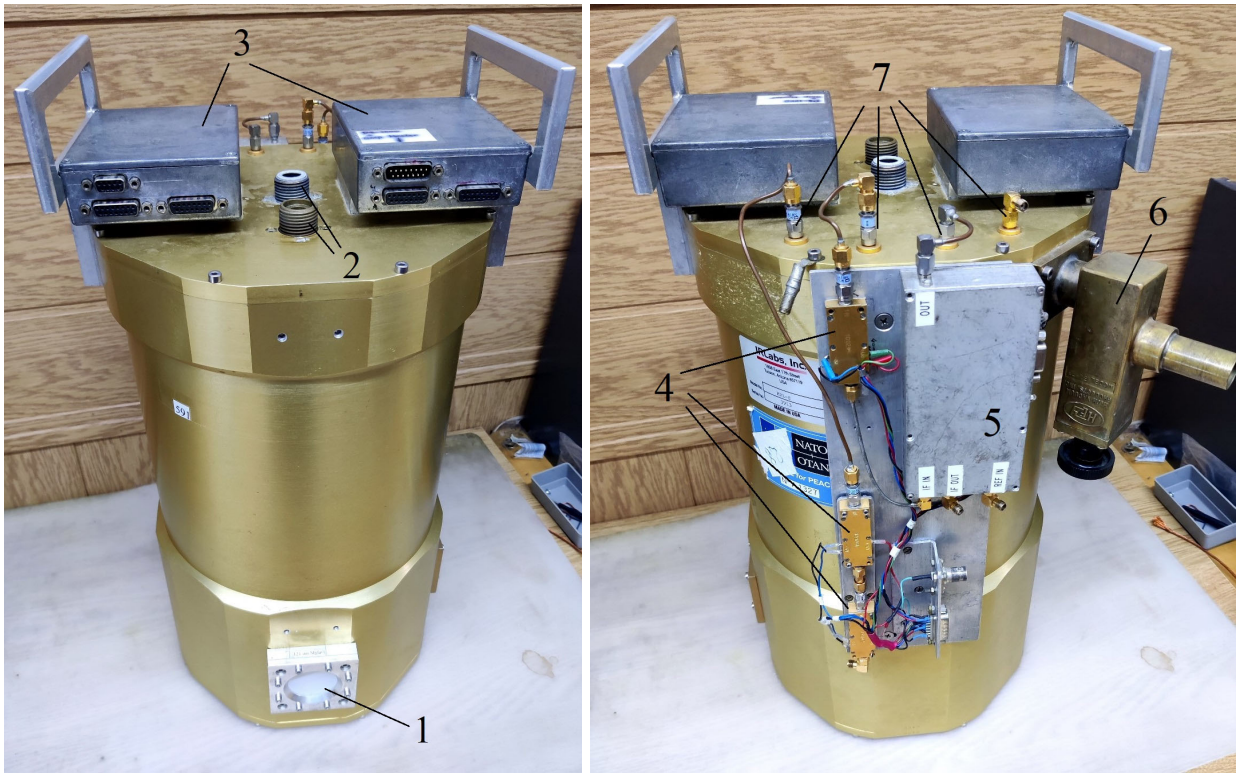
открытое пространство (раздел 4.3) в эксперименте с генератором на основе ЦДП. В данном эксперименте была использована другая (специализированная) волноводная вставка, разработанная группой исследователей Института физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород.

2.1.2. Охлаждение в вакуумном заливном криостате

Для исследования генерирующих и приемных характеристик сверхпроводниковых устройств на ТГц частоте использовался, в том числе, заливаемый жидким гелием вакуумных криостат производства *Infrared Laboratories* (США) с оптическим окном и «азотной ступенью» 77К, обеспечивающей дополнительное тепловое экранирование. Внутренняя и внешняя оснастка криостата были разработаны и адаптированы под задачи исследования: в криогенное пространство заведено достаточное количество проводов и кабелей (общим числом больше 50) для управления и измерения параметров всех исследуемых элементов, – как по постоянному току, так и на СВЧ до ~26 ГГц. В отличии от погружной зонд-вставки с 4-контактной схемой управления СИС переходами, в заливном криостате использована улучшенная 5-контактная схема с нагрузочным сопротивлением для защиты от спонтанных скачков тока: – два провода для контроля напряжения ($+V^{B}_{SIS}$, $-V^{B}_{SIS}$), два для контроля туннельного тока ($+I^{B}_{SIS}$, $-I^{B}_{SIS}$) и один дополнительный для задания тока через нагрузочное сопротивление (I^{S}_{SIS}). На холодной ступени криостата дополнительно установлены низкочастотные фильтры для минимизации шумов при измерении ВАХ и криогенные низкошумящие НЕМТ усилители диапазонов 0-1 ГГц и 4-8 ГГц. На корпусе криостата (при комнатной температуре) установлены выходные СВЧ усилители тех же диапазонов (0-1 ГГц и 4-8 ГГц), а также полупроводниковая система ФАПЧ, с соответствующими соединениями при помощи СВЧ кабелей.

Внешний вид криостата показан на рисунке 2.2, а внутренний вид вместе с установленными объектами исследования будет показан в соответствующих разделах диссертации. Входное окно выполнено из Майлара, прозрачного в

ТГц диапазоне, а на внутренних окнах криостата установлены дополнительные ИК фильтры из материала *Gore-Tex*™ (гортекс).



(а) (б)

Рисунок 2.2 – Фотографии вакуумного заливного криостата, использованного для исследования сверхпроводниковых генераторов субТГц диапазона, в собранном виде, с разных сторон. (а) 1 – входное/выходное оптическое окно; 2 – горловины для заливки жидкого гелия и азота; 3 – коммутационные блоки с проводами, идущими к холодной ступени, а также с платами управления криогенными HEMT усилителями. (б) 4 – усилители СВЧ при комнатной температуре; 5 – блок системы ФАПЧ; 6 – вакуумный вентиль с патрубком для откачки криостата; 7 – набор входных/выходных СВЧ-разъемов к холодной ступени с кабелями.

Перед заливкой жидкого гелия в рабочую ёмкость криостата производится откачка герметичного объёма при помощи откачного стенда с турбомолекулярным насосом до характерного уровня вакуума ~10^{-5} мБар, а также предварительное охлаждение жидким азотом до температуры 77 К. В результате заливки криогенной жидкости в рабочую ёмкость вакуум в криостате улучшается до ~10^{-6} мБар за счёт естественного «эффекта

криогенного насоса» – вымерзания и осаждения остаточных газов, преимущественно паров воды, на «азотном экране» (ступень 77 К).

2.1.3. Охлаждение в вакуумном криорефрижераторе замкнутого цикла

В рамках работы также был использован другой криостат для охлаждения образцов до температуры около 4 К – на основе коммерческого рефрижератора замкнутого цикла производства *Cryomech* (США). Данный криостат разрабатывался для управления сверхпроводниковым интегральным приемником и имеет практически идентичную оснастку на холодной ступени и на корпусе (комнатной температуре), что и заливной криостат, описанный выше: достаточный набор вводных проводов и СВЧ кабелей (общим числом более 50) для возможности независимого управления, по меньшей мере, 10 различными элементами схемы, низкочастотные фильтры для измерений по постоянному току, набор низкошумящих криогенных и «теплых» усилителей, система ФАПЧ и вспомогательная оснастка. Внешний вид криостата показан на рисунке 2.3. При функционировании криорефрижеретора в процессе работы из-за недостаточной тепловой стабилизации имеются небольшие температурные флуктуации на уровне нескольких мК с частотой около 1 Гц за счет работы «пульсирующих трубок» охладителя. Эти флуктуации могут приводить к изменениям электрофизических параметров сверхпроводниковой системы в реальном времени в силу высокой чувствительности СИС структур к температурным изменениям. Например, флуктуации приводят к модуляции рабочей частоты РПД в автономном режиме в точности с частотой пульсации охладителя (порядка 1 Гц). Тем не менее, для подавляющего большинства элементов схемы уровень флуктуаций некритичен, так что при работающей системе частотной и фазовой стабилизации РДП описанные флуктуации чаще всего не приводят к проблемам при работе с устройством.



Рисунок 2.3 – Фотография вакуумного криостата на основе рефрижератора замкнутого цикла, использованного для исследования сверхпроводниковых генераторов субТГц диапазона, в собранном виде. 1 – входное/выходное оптическое окно; 2 – охладитель (криоголовка); 3 – криогенные трубопроводы с вакуумной изоляцией (гелиевая магистраль); 4 – коммутационные блоки с проводами, идущими к холодной ступени, а также с платами управления криогенными HEMT усилителями; 5 – блок системы ФАПЧ (вид сзади); 6 – вакуумный вентиль с патрубком для откачки криостата.

2.2. Исследования АЧХ и спектрального состава излучения в терагерцовом диапазоне в широкой полосе анализа

Выше было отмечено, что в современной приборной технике практически отсутствуют устройства для исследований в терагерцовом диапазоне в виде «готовых решений». Как правило, промышленные

(коммерческие) устройства, предназначенные для работы ТГц диапазона, либо необходимо дорабатывать в лабораторных условиях для конкретных задач с учётом их специфики, либо такие устройства «как-есть» (без доработок) являются частью более составного устройства. В данном разделе приведены устройства и экспериментальные установки, использованные в рамках исследования.

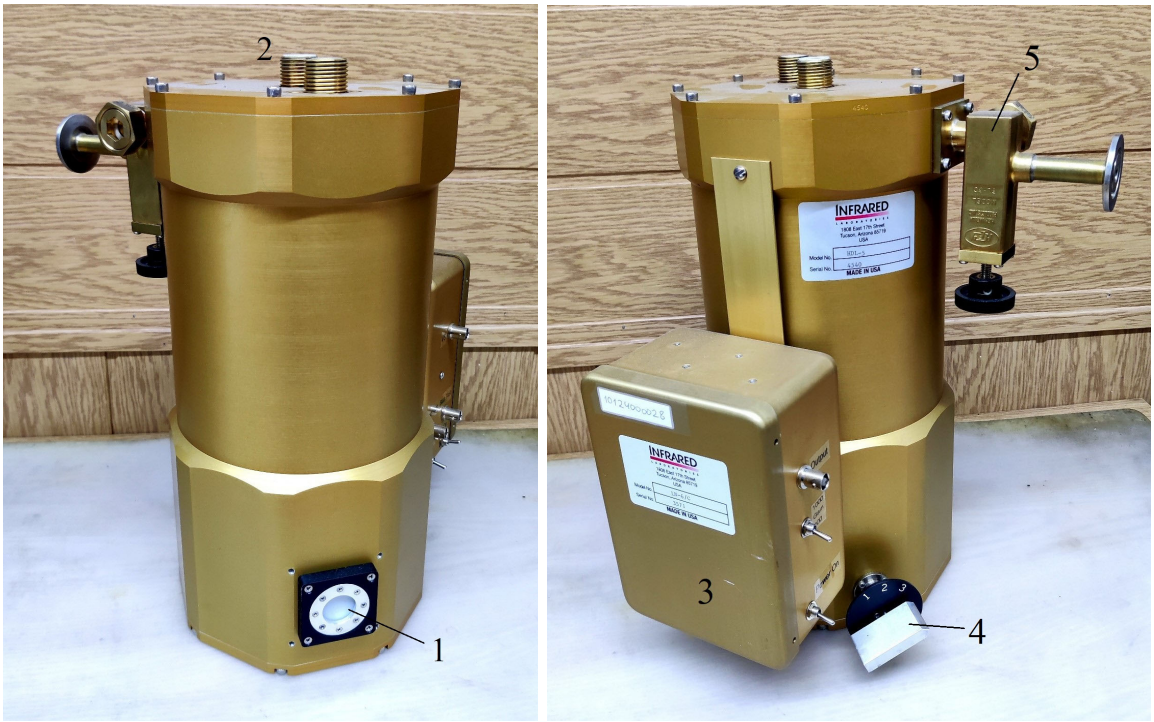
2.2.1. Исследования АЧХ при помощи охлаждаемого болометра ИК диапазона на основе кремния

Для прямой регистрации сигналов дальнего ИК диапазона использовался коммерческий прибор производства *Infrared Laboratories* (США) – охлаждаемый болометр на основе кремния, установленный внутри вакуумного заливного криостата для жидкого гелия, с входным оптическим окном и возможностью переключения фильтров (3 шт.) внутри криостата. Согласно спецификации, рабочий диапазон болометра составляет 15 – 2000 мкм (или 0,15 – 20 ТГц), а чувствительность в единицах мощности эквивалентной шуму (МЭШ) – около $1{,}44 \cdot 10^{-13}$ Вт/Гц$^{1/2}$. Болометр является прямым детектором и интегрирует сигнал во всей принимаемой полосе частот, т.е. не обладает частотным разрешением. Однако, в силу специфики джозефсоновских генераторов, частота которых строго определяется постоянным напряжением на переходе (соотношение 1.3), частота генерации считается известной с точностью измерения напряжения. Прямые измерения мощности излучения джозефсоновского генератора в режиме перестройки частоты генерации при помощи широкополосного болометра фактически являются измерением АЧХ системы с учетом известной частоты в каждой рабочей точке. Такой эксперимент позволяет определить «полезный» рабочий диапазон перестройки частоты источника в открытое пространство, который определяется многими факторами – как характеристиками самого генератора

(РДП), так и характеристиками элементов передающего тракта (антенны, линзы, линий передач и т.д.), а также характеристиками согласования РДП с выходным трактом. Ширина полосы исследования в данном случае определяется полосой перестройки источника в процессе исследования, а «частотная сетка» определяется шагом перестройки напряжения, который определяет шаг перестройки частоты.

В криостате производителем установлены три фильтра нижних частот с длиной волны среза 13 мкм (≈ 23 ТГц), 103 мкм (≈ 2,9 ТГц) и 285 мкм (≈1,05 ТГц). Поскольку целевой диапазон исследования лежит ниже 1 ТГц, в экспериментах преимущественно использовался третий из фильтров (1,05 ТГц), так что фактическая полоса приема, согласно спецификации прибора, составляла 0,15 – 1,05 ТГц.

Фотографии криостата с болометром представлены на рисунке 2.4.

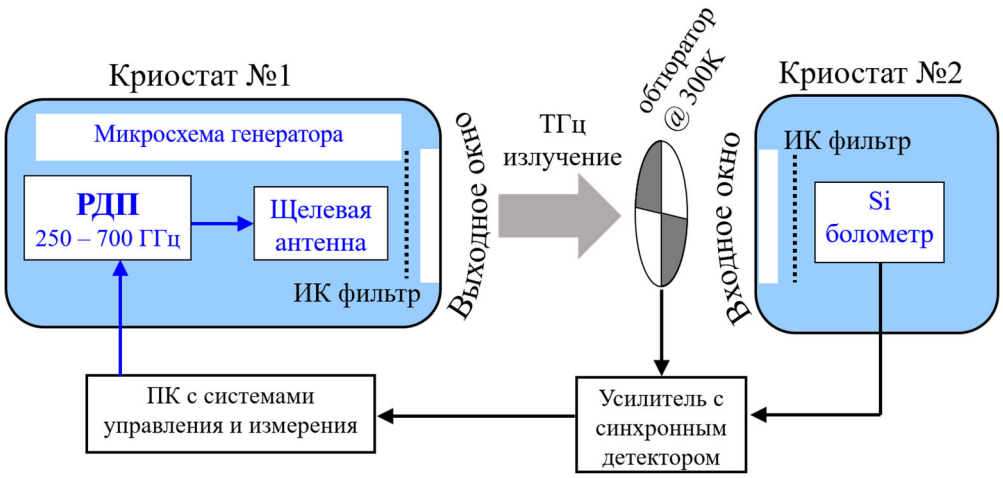


(а) (б)

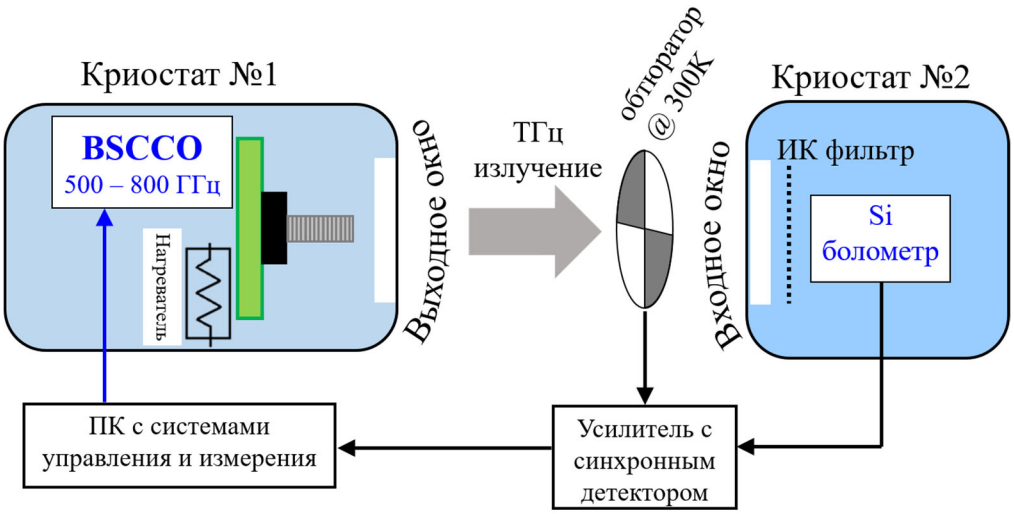
Рисунок 2.4 – Фотографии криостата с охлаждаемым болометром ИК диапазона на основе кремния: (а) со стороны оптического окна: 1 – входное окно, 2 – горловины для заливки жидкого гелия и азота; (б) со стороны блока управляющей электроники: 3 – блок управляющей электроники с выходным разъемом, 4 – рукоятка переключения входных фильтров, 5 – вакуумный вентиль с фланцем для откачки криостата.

Выходной сигнал болометра измеряется традиционным методом при помощи усилителя с синхронным детектором, с дополнительной модуляцией при помощи оптического дискового обтюратора (прерывателя) с частотой до 200 Гц. Оптимальная частота обтюратора и время накопления сигнала синхронного детектора подбираются экспериментально для получения наилучшего отношения сигнал/шум с учетом разумной длительности эксперимента, а сам обтюратор (плоскость вращения диска) устанавливается под углом к излучаемому пучку и окнам криостатов для минимизации переотражений между элементами квазиоптического тракта. Схема экспериментальной установки для регистрации сигнала генераторов двух типов – на основе РДП и на основе BSCCO – представлена на рисунке 2.5.

Чувствительность болометра достаточно высока для приема сигналов с мощностью от десятков нановатт до единиц микроватт, так что при установке криостатов с источником и болометром в непосредственной близости друг к другу дополнительная фокусировка не требовалась, несмотря на расходящийся выходной пучок генератора. Также следует отметить, что схема источника на основе РДП (левая часть на рис. 2.5 а) может включать дополнительные элементы для частотной и фазовой стабилизации генератора, такие как гармонический смеситель и система ФАПЧ, но для исследования диапазона перестройки частоты генератора стабилизация частоты не требуется, поэтому элементы для стабилизации не приведены на схеме.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 2.5 – Схема экспериментальной установки для исследования мощности излучения в открытое пространство источника на основе (а) РДП, (б) BSCCO в зависимости от частоты. (в) Фотография экспериментальной установки.

2.2.2. Спектральные исследования при помощи широкополосного ТГц Фурье-спектрометра

Для спектральных исследований в широкой полосе анализа при фиксированной частоте генератора, т.е. для измерения спектрального состава излучения источника, использовался Фурье-спектрометр на основе оптического интерферометра Майкельсона. Используемая установка Фурье-спектрометра была собрана ранее автором в рамках кандидатской диссертации [124], где была применена для исследования характеристик приемного СИС смесителя, а в качестве источника использовался широкополосный чернотельный ИК источник глобар (от англ. *glowbar – «светящаяся панель»*) на основе накаленного до температуры порядка 1500ºС стержня из карбида кремния. Фурье-спектрометр может использоваться как для исследований АЧХ детектора – для этой цели необходимо использовать широкополосный источник со спектром излучения заведомо шире, чем диапазон детектора, так и для исследования спектрального состава источника – в таком случае необходимо использовать широкополосный детектор с диапазон заведомо шире, чем спектр исследуемого источника. Фотография отдельно взятого интерферометра на оптическом столе без источника и детектора показана на рисунке 2.6. Схема интерферометра является симметричной относительно источника и детектора, то есть их можно беспрепятственно менять местами, руководствуясь лишь удобством и качеством оптической настройки эксперимента с учетом остальных приборов.

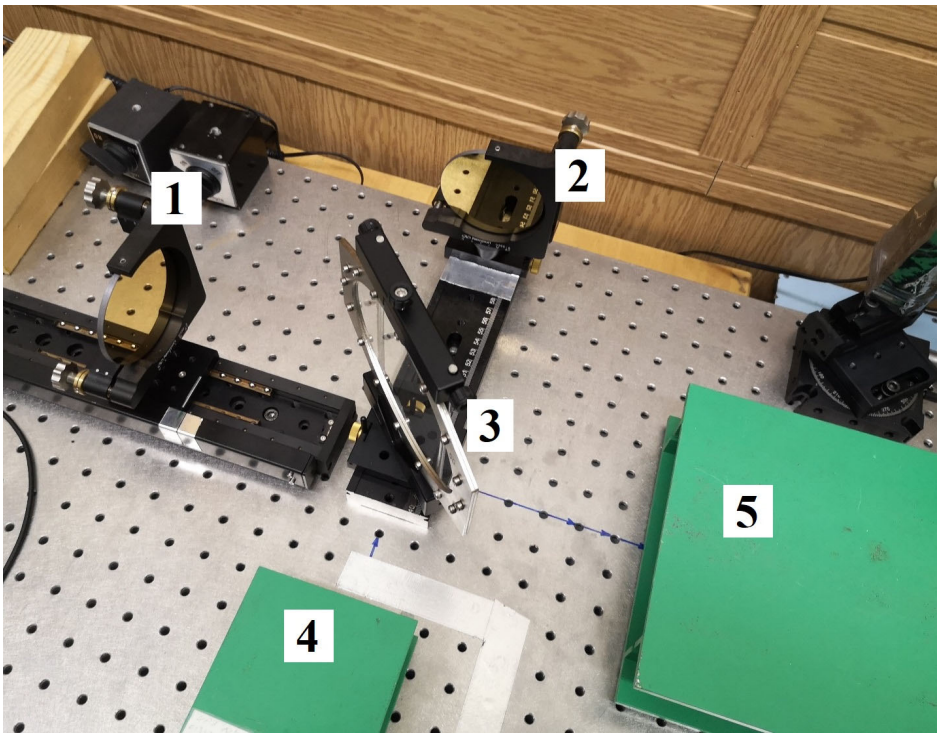
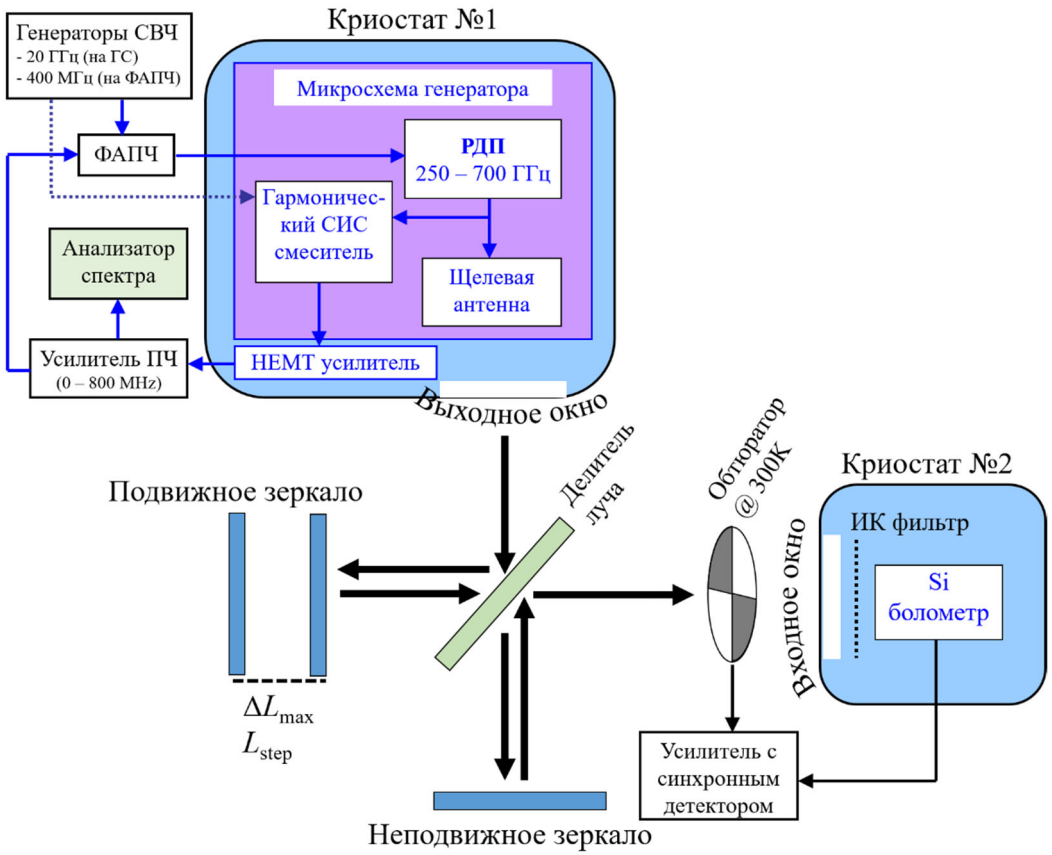
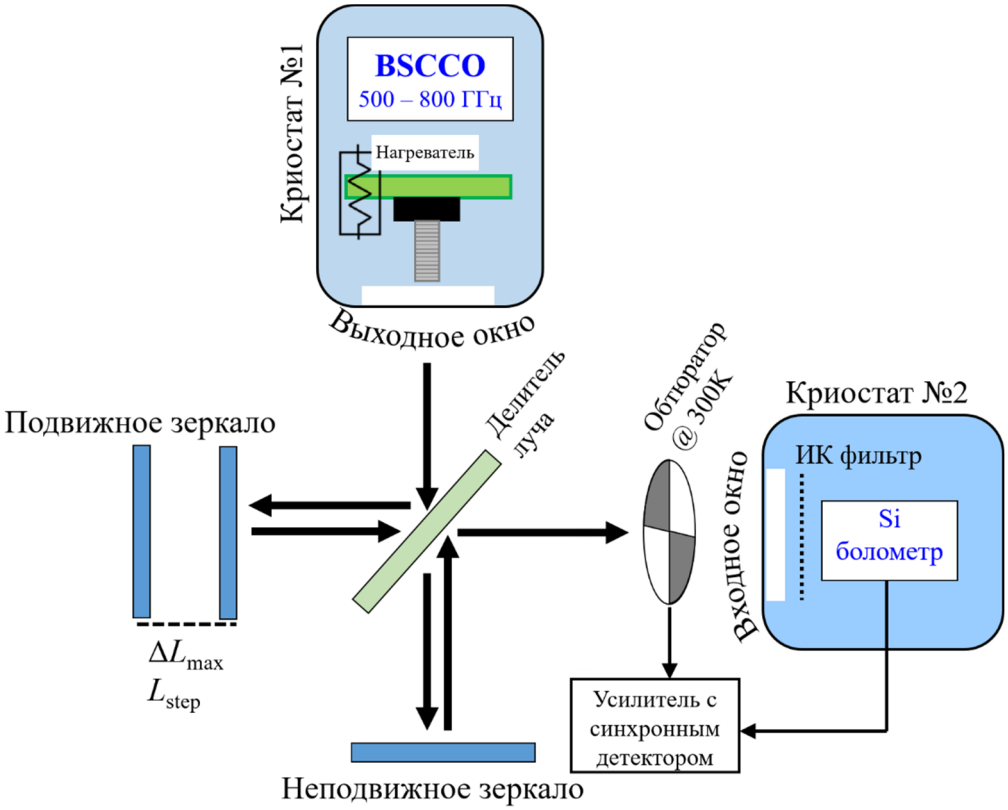


Рисунок 2.6 – Фотография лабораторного оптического интерферометра Майкельсона. 1 – подвижное зеркало, установленное на шаговом двигателе, 2 – неподвижное зеркало, 3 – делитель луча, 4 и 5 – платформы для установки источника и детектора, каждый из которых может быть установлен на любую из платформ.

Схема эксперимента с Фурье-спектрометром на основе интерферометра Майкельсона для исследования спектров излучения источника двух типов – на основе РДП и на основе BSCCO – представлена на рисунке 2.7. Интерферометр состоит из двух зеркал, установленных перпендикулярно друг другу, и делителя луча, расположенного под углом 45° к падающему сигналу. В качестве детектора использован широкополосный охлаждаемый ИК болометр на основе кремния, детальной описанный в предыдущем разделе (МЭШ на уровне $1{,}4 \cdot 10^{-13}$ Вт/Гц$^{1/2}$). Детектор регистрирует результат интерференции двух лучей, отраженных от подвижного и неподвижного зеркал, в зависимости от положения подвижного зеркала, после чего восстанавливается частотный спектр исходного сигнала посредством преобразования Фурье. Запись сигнала болометра происходит при помощи усилителя с синхронным детектором с модуляцией сигнала частотой 170 Гц (частота выбрана экспериментально).


Генераторы СВЧ
- 20 ГГц (на ГС)
- 400 МГц (на ФАПЧ)
ФАПЧ
Анализатор спектра
Усилитель ПЧ
(0 – 800 MHz)
Криостат №1
Микросхема генератора
РДП
250 – 700 ГГц
Гармонический СИС смеситель
Щелевая антенна
НЕМТ усилитель
Выходное окно
Подвижное зеркало
Делитель луча
Обтюратор @ 300K
Криостат №2
ИК фильтр
Si болометр
Входное окно
ΔL_{max}
L_{step}
Усилитель с синхронным детектором
Неподвижное зеркало

(а)


Криостат №1
BSCCO
500 – 800 ГГц
Нагреватель
Выходное окно
Подвижное зеркало
Делитель луча
Обтюратор @ 300K
Криостат №2
ИК фильтр
Si болометр
Входное окно
ΔL_{max}
L_{step}
Усилитель с синхронным детектором
Неподвижное зеркало

(б)

(в)

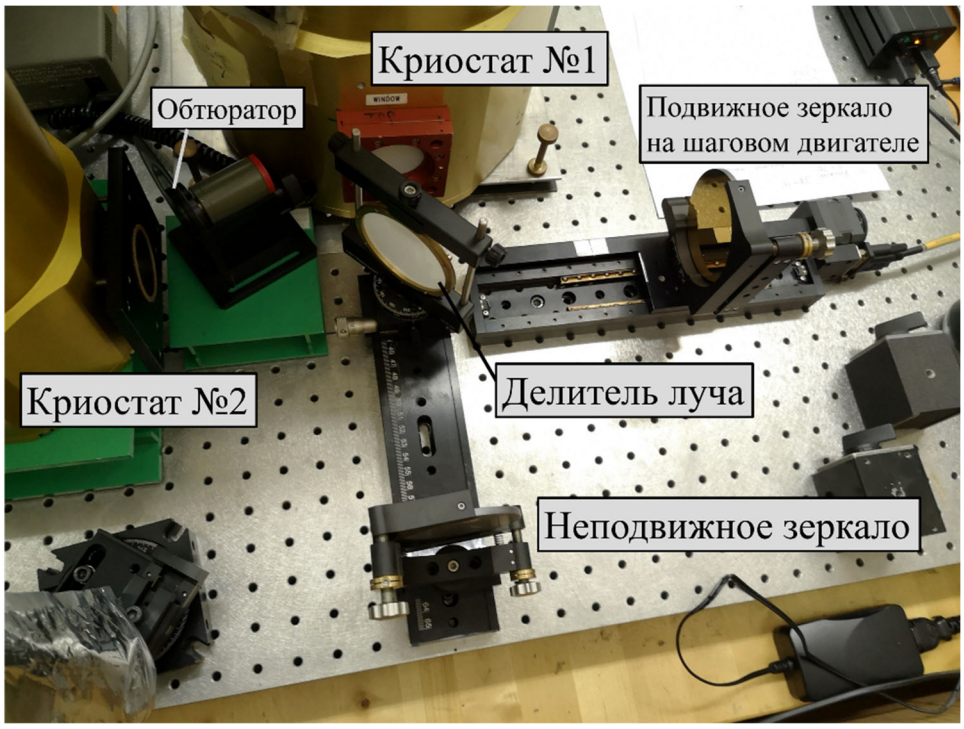


Рисунок 2.7 – Схема экспериментальной установки Фурье-спектрометра для исследования спектров излучения в открытое пространство источника на основе (а) РДП, (б) BSCCO. (в) Фотография экспериментальной установки.

Максимальное спектральное разрешение спектрометра δf_{FTS} определяется (например, [174]) как

$$\delta f_{FTS} \approx c / (2 \cdot \Delta L_{max}) = 0{,}75 \text{ ГГц} , \quad (2.1)$$

где ΔL_{max} – максимальная длина хода подвижного зеркала, составляющая 200 мм для текущей экспериментальной установки. Такое спектральное разрешения является избыточным, поскольку точность определения частоты РДП при пересчете из напряжения составляет такой же порядок величины (точность ±1 мкВ соответствует ±0,5 ГГц), поэтому в эксперименте использована длина хода подвижного зеркала 24 мм, которой соответствует спектральное разрешение 6,25 ГГц. Максимальная частота регистрируемой спектральной характеристики f_{FTS}^{max}, в свою очередь, определяется минимальным шагом подвижного зеркала L_{step} [174], который составляет 2,5 мкм в используемом шаговом двигателе:

$$f_{FTS}^{max} \approx c / (4 \cdot L_{step}) = 30 \text{ ТГц} . \quad (2.2)$$

Выражение (2.2) описывает идеальный случай и не учитывает фактор точности восстановления спектра, который понижает фактическую максимальную частоту с коэффициентом порядка 1-1,25. Также, как и максимальное спектральное разрешение, максимальная частота спектрометра 30 ТГц избыточна для текущей задачи, поскольку предельная рабочая частота линий передач на основе тонких пленок сверхпроводящего ниобия составляет около 0,75 ТГц, а в случае использования линий передач на основе NbTiN – около 1,2 ТГц. В целях оптимизации времени измерения при исследовании образцов с линиями передачи $Nb/SiO_2/Nb$ был выбран шаг зеркала 62,5 мкм (25 минимальных шагов), что обеспечивает максимальную частоту регистрации около 1,2 ТГц. При выбранных параметрах движения зеркала, а также с выбранным временем накопления сигнала усилителя с синхронным детектором 300 мс и с учётом конечной скорости перемещения шагового двигателя, время одного измерения при фиксированной частоте генерации источника составляло около 7 минут. В процессе измерений сигнал РДП был стабилизирован при помощи системы ФАПЧ (см. схему на рис. 2.7 а). Также, как и в случае расположения криостатов «окно-к-окну» (без оптического интерферометра), мощность сигнала источника и чувствительность болометра оказались достаточными для того, чтобы не использовать дополнительной фокусировки при помощи линз.

2.3. Спектральные исследования в субТГц диапазоне с высоким разрешением

Постоянное напряжение на РДП позволяет с относительно высокой точностью (~0,5 ГГц) определять частоту генерации из соотношения Джозефсона, но не содержит информации о спектре излучения, а описанный в предыдущем разделе Фурье-спектрометр на основе оптического интерферометра восстанавливает спектр генерации с максимальным

разрешением порядка 0,75 ГГц. При этом автономная ширина линии исследуемых источников (РДП, ЦДП, BSCCO) составляет от долей МГц до ~20 МГц (напр., [119,120]) и выше. Следовательно, для исследования спектральной линии излучения таких источников требуется высокое спектральное разрешение – лучше 1 МГц.

2.3.1. Спектральные исследования при помощи *on-chip* гармонического смесителя и системы ФАПЧ

Для исследования спектральных характеристик источника на основе РДП, излучающего сигнал в открытое пространство, применяется метод, уже реализованный ранее для РДП в составе сверхпроводникового интегрального приемника, – использование *on-chip* гармонического СИС смесителя, который смешивает сигнал РДП на субТГц частоте с *N*-й гармоникой опорного синтезатора СВЧ в диапазоне 19-21 ГГц, в результате чего свертка сигналов на промежуточной частоте (0–1 ГГц) измеряется анализатором спектра СВЧ диапазона. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.8. Спектральное разрешение в таком исследовании определяется шириной линии опорного синтезатора и предельным разрешением анализатора спектра и на практике составляет величину порядка 1 Гц, т.е. заведомо на 5-7 порядков лучше, чем автономная ширина линии генерации.

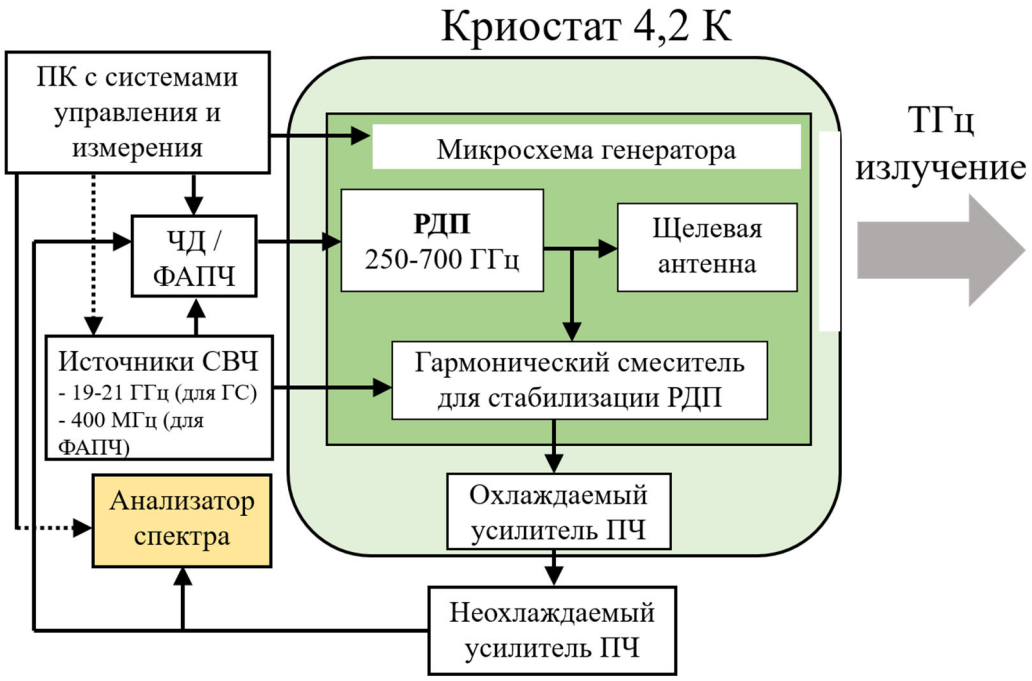


Рисунок 2.8 – Схема эксперимента по исследованию спектральной линии излучения РДП при помощи *on-chip* гармонического смесителя с высоким разрешением.

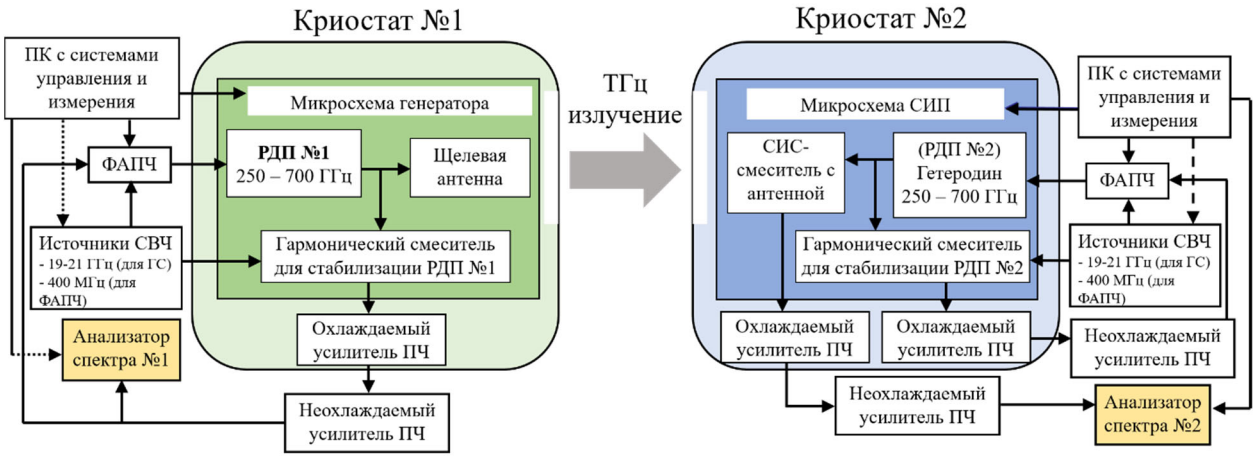
При прямом измерении споктроанализатором сигнала ПЧ, усиленного последовательным каскадом усилителей примерно на ~70-90 дБ, измеряемый спектр оказывается сильно «размытым» из-за технических шумов и наводок в системе питания РДП и непригодным, например, для определения ширины линии генерации. Поэтому для стабилизации частоты сигнала используется частотный детектор (ЧД) в цепи обратной связи, позволяющий увидеть точную форму автономной линии излучения РДП. При измерении спектра производится дополнительное усреднение сигнала (до 100 считываний) при помощи встроенной функции анализатора, с целью получения более «чистой» формы спектральной линии. Следует отметить, что этот же сигнал ПЧ с гармонического смесителя используется системой ФАПЧ, которая может работать как одновременно, так и независимо от частотной стабилизации при помощи ЧД. Система ЧД и система ФАПЧ были разработаны ранее в Институте физики микроструктур РАН специально для стабилизации РДП в составе СИП и конструктивно объединены в одном блоке (см. поз. 5 на рисунке 2.2 б), поэтому в рамках данной диссертационной работы

обозначение «ФАПЧ» на любых схемах подразумевает наличие **как частотной, так и фазовой стабилизации,** которые могут работать по отдельности либо совместно.

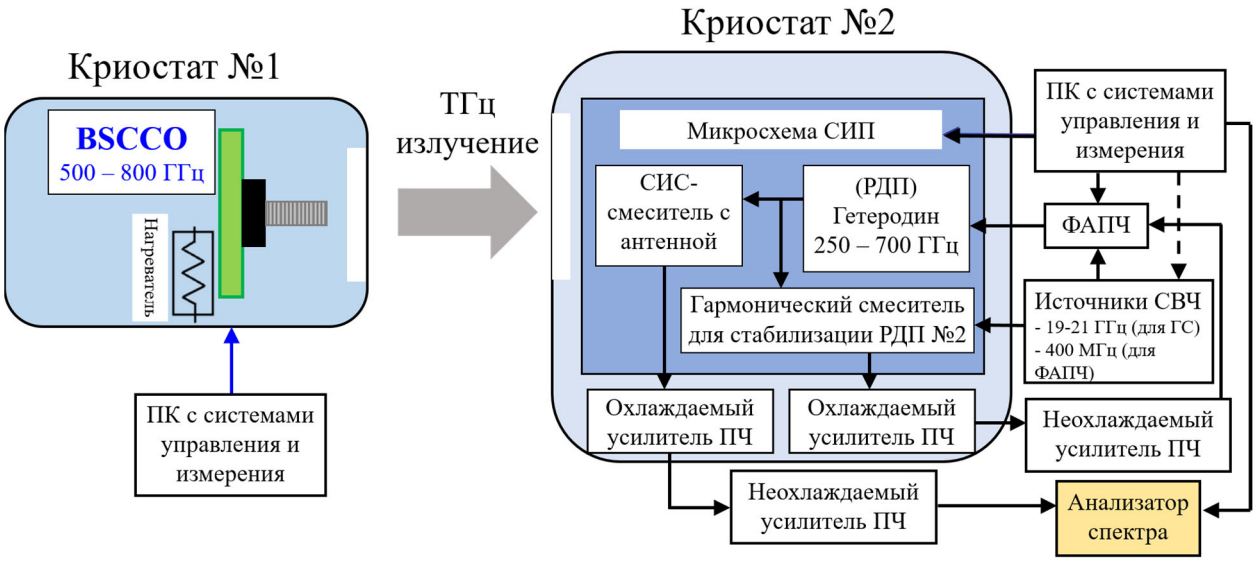
2.3.2. Спектральные исследования при помощи сверхпроводникового интегрального СИС приёмника в диапазоне 500-700 ГГц

Принцип работы и схема установки СИП и его характеристики подробно описаны в разделе 1.4; перечислим ещё раз основные: шумовая температура ~150-400 К в диапазоне 500-700ГГц с наилучшим значением около 120 К на частотах вблизи 500 ГГц и 600 ГГц, спектральное разрешение лучше 0,1 МГц. В настоящей работе СИП был успешно использован для исследования спектров излучения в открытое пространство источников двух типов – на основе РДП и на основе BSCCO; схемы экспериментов представлены на рисунке 2.9. В обоих случаях экспериментальная установка достаточно сложная, потому как содержит одновременно два заливных криостата и огромное множество необходимого периферийного оборудования, при этом блоки питания многих вспомогательных устройств не отмечены на схеме для упрощения. Интересно отметить, что в случае исследования сигнала РДП (рис. 2.9 а) в экспериментальной установке используется одновременно два субТГц генератора на основе РДП, один из которых (РДП № 1) является объектом разработки и исследования в работе, а другой (РДП № 2) используется в качестве опорного генератора СИП. В установке также использованы две независимые системы стабилизации для обоих РДП при помощи гармонического смесителя и петли ФАПЧ. Таким образом, установка подразумевает возможность измерения спектральных характеристик исследуемого генератора в режиме стабилизации либо без нее двумя независимыми способами: через петлю обратной связи с использованием тракта ПЧ *on-chip* гармонического смесителя (сигнал на анализаторе спектра № 1), либо посредством внешнего спектрометра на основе СИП с

использованием выходного тракта ПЧ приемного СИС смесителя (сигнал на анализаторе спектра № 2). В установке для исследования BSCCO (рис. 2.9 б) в широком диапазоне температур от 4,2 К до ~70К предусмотрен резистивный нагреватель с сопротивлением 1 кОм.



(а)



(б)

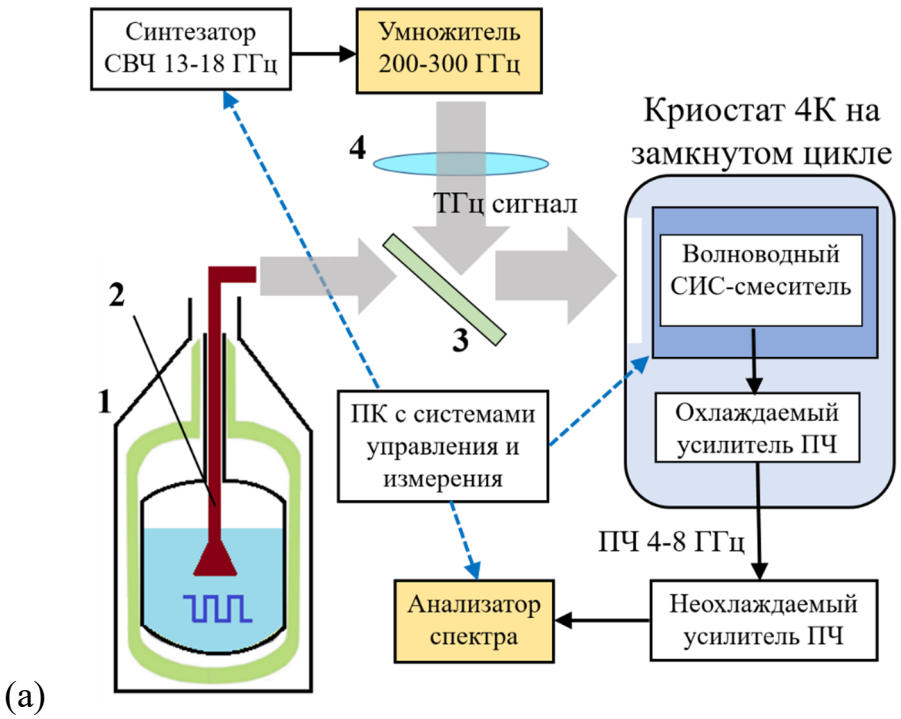
Рисунок 2.9 – Схема экспериментальной установки для исследования спектров излучения в открытое в пространство (а) источника на основе РДП, (б) источника на основе BSCCO при помощи СИП с высоким спектральным разрешением.

Следует отметить, что нижняя и верхняя границы рабочего диапазона СИП, – 500 и 700 ГГц, – как и практический в любой приемной системе, указаны условно с контекстом приемлемой эффективности приема, которая

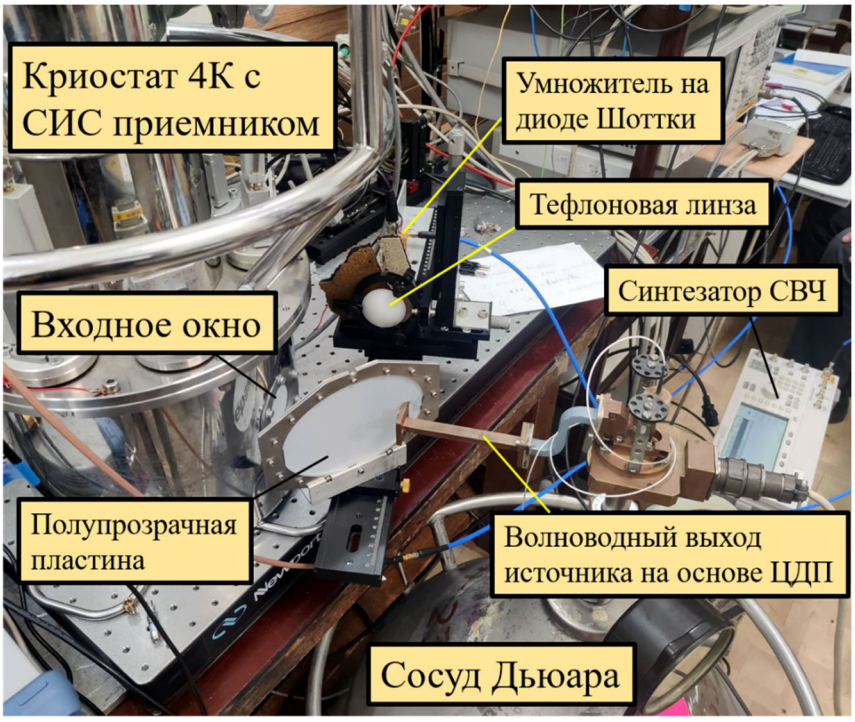
обусловлена двумя факторами – чувствительностью и возможностью стабилизации опорного сигнала. Так, например, при помощи СИП проводились исследования на частотах 475 ГГц и 720 ГГц, т.е. с отступом на 20-25 ГГц за условные границы рабочего диапазона, при этом на частоте 475 ГГц шумовая температура примерно в 5 раз выше (~800-1000 К), чем в пределах рабочего диапазона (см. рис. 1.22), а на частоте 720 ГГц в дополнение к спаду чувствительности становится практически невозможной стабилизация сигнала гетеродина из-за слишком слабого отношения сигнал/шум в тракте системы ФАПЧ вследствие сильного затухания в линиях передачи на основе Nb.

2.3.3. Спектральные исследования при помощи СИС приёмника в диапазоне 200-300 ГГц

Для спектральных исследований излучения цепочки джозефсоновских переходов с высоким разрешением на частотах ниже 300 ГГц, которые находятся за пределами рабочего диапазона СИП, использовался высокочувствительный СИС приемник с источником гетеродина на основе умножителя на диоде Шоттки. Схема приемника была разработана группой из Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН [32], после чего собрана и апробирована на базе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в группе диссертанта на примере регистрации спектров ЦДП Nb/NbSi/Nb **[A5]**. Схема установки представлена на рисунке 2.10. Полоса промежуточных частот приемника составляет 4-8 ГГц с возможностью расширения до 4-12 ГГц (диапазон определяется выходными усилителями ПЧ), а шумовая температура в двухполосном режиме, определенная стандартной лабораторной методикой измерения величины *Y-factor* (см. раздел 1.4), составляет менее 50 К в целевом диапазоне 211-275 ГГц [32,175,**A2**].



(а)



(б)

Рисунок 2.10 – (а) Схема и (б) фотография экспериментальной установки для исследования спектров излучения в открытое в пространство источника на основе цепочки джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb. На схеме цифрами обозначены следующие неподписанные элементы: 1 – сосуд Дьюара с жидким гелием, 2 – волноводная зонд-вставка с источником на основе ЦДП, приемной рупорной антенной с передающим СВЧ волноводом, 3 – полупрозрачная пластина для заведения сигнала гетеродина, 4 – собирающая тефлоновая линза. Широкими серыми стрелками обозначен субТГц квазиоптический тракт, черными стрелками – СВЧ тракт, пунктирными стрелками – управление устройствами и обмен данными с ПК.

Замечание об условности граничных частот рабочего диапазона данного приемника, приведенное в предыдущем подразделе для СИП, полностью справедливо и для данного приёмника. Приемная система разрабатывалась для работы в диапазоне 211-275 ГГц согласно техническим требованиям для радиоастрономических применений, однако приемник способен также принимать сигнал на частотах, например, 200 ГГц и 300 ГГц, т.е. с отступом на 10-25 ГГц за условные границы рабочего диапазона, с пониженной эффективностью.

2.4. Исследование сверхпроводниковых структур под воздействием внешнего ТГц сигнала лампы обратной волны

В разделе 1.3.5 были описаны причины резкого роста затухания сигнала в сверхпроводящих линиях передачи при превышении щелевой частоты электродов, которая составляет около 0,7 ТГц для Nb. Для исследования возможностей накачки СИС переходов на частоте выше 1 ТГц, встроенных в линии передачи на основе структуры NbTiN/SiO_2/Al с щелевой частотой около 1,2 ТГц, а также возникающих тепловых эффектов в интегральной схеме, была использована установка с относительно мощным источником ТГц излучения на основе ЛОВ. Схема установки представлена на рисунке 2.11; в данной схеме может быть использован источник другого типа и/или частотного диапазона при условии работы приемной схемы в выбранном диапазоне и достаточной мощности сигнала для накачки СИС смесителя. В рамках эксперимента была использована ЛОВ диапазона 0,95-1,1 ТГц, встроенная в постоянный магнит, с питанием от высоковольтного блока питания 4-6 кВ. На выходе ЛОВ установлен волновод прямоугольного сечения 0,125×0,25 мм (стандарт WR 1.0) и рупорная антенна. Микросхема, содержащая СИС смеситель на основе структуры Nb/AlN/NbN и планарную приемную антенну, установлена на кремниевую линзу. Приемный модуль установлен в заливной криостат 4,2 К, а для подавления критического тока в СИС переходе с целью

более точного определения экспериментальных параметров накачки внешним сигналом была использована сверхпроводящая катушка, состоящая из ~2500 витков проволоки NbTi диаметром 0,21 мм с изоляцией. Катушка была установлена на массивный медный держатель, который крепился непосредственно к охлаждаемой плите криостата. С учётом вводных кабелей в криостат, изготовленная катушка позволяла задавать ток до ~0,9 А без существенного нагрева системы. Для фокусировки квазиоптического пучка ТГц излучения были установлены две собирающие тефлоновые линзы, формирующие квазипараллельный пучок между ними.

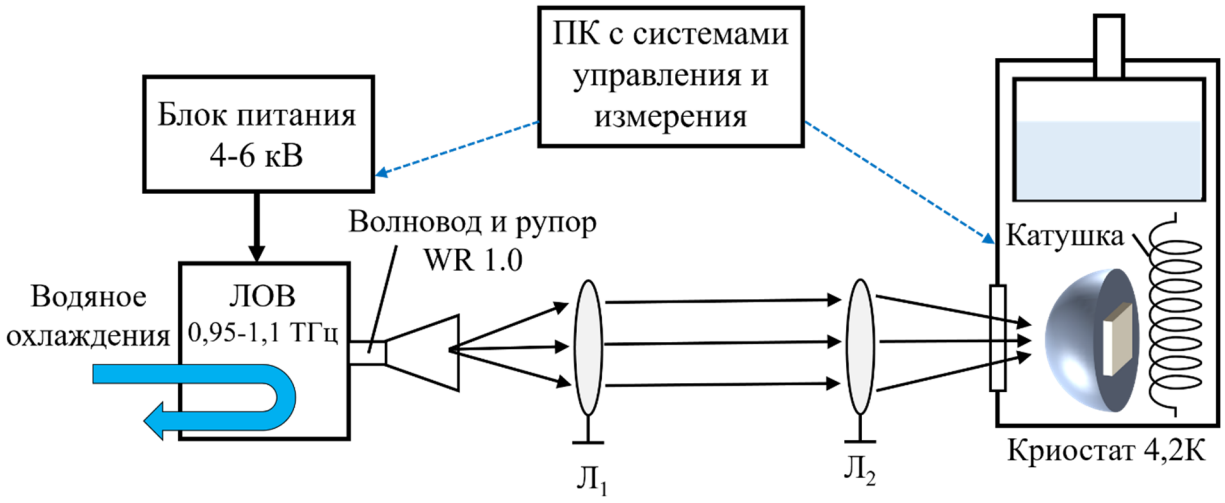


Рисунок 2.11 – Схема экспериментальной установки для исследования накачки СИС переходов внешним высокочастотном сигналом лампы обратной волны. Приемная микросхема расположена внутри катушки, несмотря на схематичное изображение рядом с катушкой. Фокусное расстояние собирающих линз $Л_1$ и $Л_2$ составляет 50 мм и 75 мм, соответственно. Стрелками между источником и приемной схемой обозначен квазиоптической тракт в приближении геометрической оптики; пунктирными стрелками отмечено управление устройствами и обмен данными с ПК.

Результат воздействия внешнего сигнала ЛОВ на систему «СИС переход + линии передачи» исследуется посредством анализа изменения вольтамперной характеристики СИС, а именно – по квазичастичным ступеням накачки (см. раздел 1.3.1), по измерению щелевого напряжения перехода, которое зависит от температуры (см. раздел 1.3.5), а также с учетом геометрии

и характеристик сверхпроводящих материалов и сред, таких как комплексная электрическая проводимость, теплопроводность, времена релаксации фононов и квазичастиц, и других.

2.5. Выводы главы

В данной главе описаны основные методы и экспериментальные установки, использованные в рамках диссертационной работы для исследования сверхпроводниковых генераторов субТГц диапазона с сигналом излучения в открытое пространство, а также для исследования сверхпроводниковых структур под воздействием внешнего сигнала на частоте выше 1 ТГц. Кратко перечислим описанные методы:

– Охлаждение сверхпроводниковых структур до температуры около 4,2 К производится при помощи жидкого гелия при нормальных условиях либо ожижаемого гелия в герметичной системе замкнутого цикла. Использованы три установки охлаждения: в погружном сосуде Дьюара, в вакуумном заливном криостате, в вакуумном криостате замкнутого цикла, – в зависимости от задач и конструктивной реализации эксперимента.

– Исследования АЧХ и спектров излучения в широкой полосе анализа производятся при помощи высокочувствительного прямого детектора на основе охлаждаемого до 4,2 К кремниевого болометра: как при непосредственной подаче сигнала известной частоты на детектор (при этом частота сигнала перестраивается в процессе измерений, т.е. исследуется АЧХ), так и при помощи Фурье-спектрометра на основе оптического интерферометра Майкельсона с делителем луча, подвижным и неподвижным зеркалом, с предельным спектральным разрешением около 0,75 ГГц и максимальной частотой регистрации порядка 30 ГГц (при этом частота сигнала зафиксирована, т.е. исследуется спектральный состав).

– Спектральные исследования субТГц сигнала с высоким разрешением (лучше 0,1 МГц) без вывода излучения в открытое пространство производятся при помощи гармонического смесителя, смешивающего исследуемый сигнал с гармоникой опорного синтезатора базовой частоты около 20 ГГц и дающего на выходе сигнал промежуточной частоты 0-1 ГГц (ширина полосы анализа 1 ГГц), при этом дополнительно используется система частотной и фазовой стабилизации сигнала и анализатор спектра диапазона СВЧ.

– Спектральные исследования с высоким разрешением (лучше 0,1 МГц) сигнала излучения в открытое пространство производится при помощи двух различных гетеродинных СИС приемников, работающих каждый в своём частотном диапазоне: 1) приемник диапазона 200-300 ГГц с гетеродином на основе умножителя частоты на диоде Шоттки, с шумовой температурой 30-50 К, и 2) интегральный приемник диапазона 500-700 ГГц с *on-chip* гетеродином на основе РДП, с шумовой температурой 150-400 К. Оба приемника работают в двухполосном режиме с диапазоном промежуточных частот 4-8 ГГц (ширина полосы анализа 4 ГГц). Верхняя и нижняя границы рабочих диапазонов частот указаны условно в контексте резкого падения эффективности приема (ухудшение чувствительности, отсутствие возможности стабилизации гетеродина) за пределами частотного диапазона.

– Исследование отклика сверхпроводниковых структур (СИС переходов и линий передачи) на воздействие внешнего ТГц сигнала производится с использованием лампы обратной волны в качестве источника мощного ТГц сигнала. Воздействие на систему внешним сигналом исследуется с помощью анализа вольтамперных характеристик СИС перехода, а также механизмов выделения тепла и его распределения.

Глава 3

Разработка и исследование субтерагерцового генератора на основе распределенного джозефсоновского перехода с излучением сигнала в открытое пространство

В Главе 1 (см. разделы 1.3.3, 1.4) было показано, что субТГц генератор на основе РДП был успешно реализован и доведен до практического применения в качестве *on-chip* гетеродина в составе интегрального приемника. Генератор обладает полосой перестройки от 250 до 700 ГГц (ширина полосы составляет порядка 100% от центральной частоты) и возможностью фазовой синхронизации выходного излучения, при этом технология его изготовления является отработанной и хорошо воспроизводимой. Поэтому была предложена идея **создания универсального субТГц источника на основе РДП с излучением в открытое пространство.** Данная глава посвящена решению широкого круга задач, связанных с реализацией этой идеи.

3.1. Конструкция *on-chip* генератора на основе РДП, вольтамперные характеристики и режимы работы

Общий литературный обзор динамики распределенного джозефсоновского перехода и генератора на его основе приведен в разделе 1.3.3. В данном разделе приведены характеристики конкретного дизайна РДП заданной геометрии и плотности туннельного тока, который (дизайн) использовался при разработке источника в открытое пространство.

В конце раздела 1.3.3 было отмечено, что длительный цикл работ по разработке и исследованию РДП привел к некоторому дизайну, оптимальному для задач международного проекта TELIS, с размерами 400×16 мкм и плотностью тока около 7 кА/см^2, с шириной «холостой области» $W_i = 10$ мкм и толщиной диэлектрика SiO_2 $d_i = 200$ нм (см. рис. 1.15 и выражение (1.18)). При этом данный дизайн оказался «универсальным» для многих других

лабораторных задач и применений. Чертёж дизайна (топология) такого генератора представлен на рисунке 3.1. Сужение перехода на концах выполнено для согласования импеданса по высокой частоте на выходном конце генератора. Открытый (ненагруженный) конец генератора представляет собой большой импеданс на высокой частоте, что, с учётом малого импеданса волны в переходе, создаёт условия для её отражения. Топология выходного трансформатора импеданса подбирается индивидуально для каждой схемы.

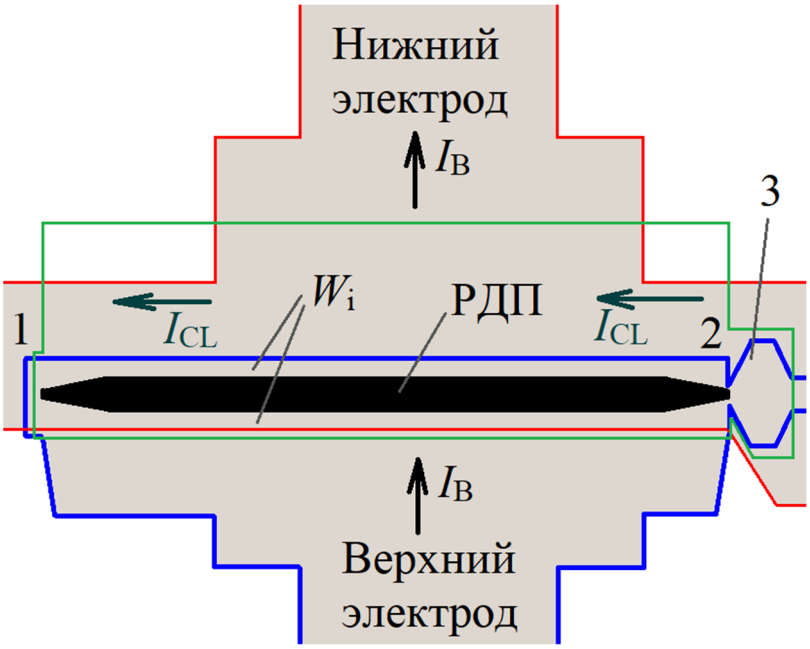
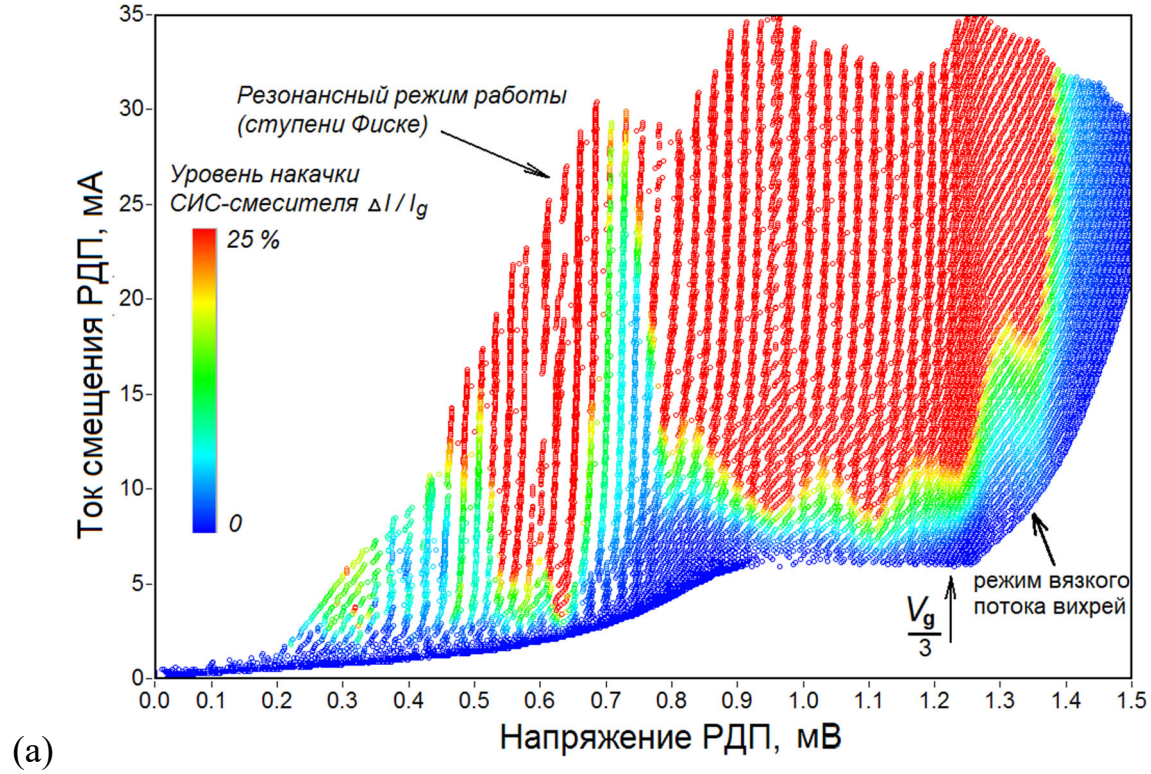
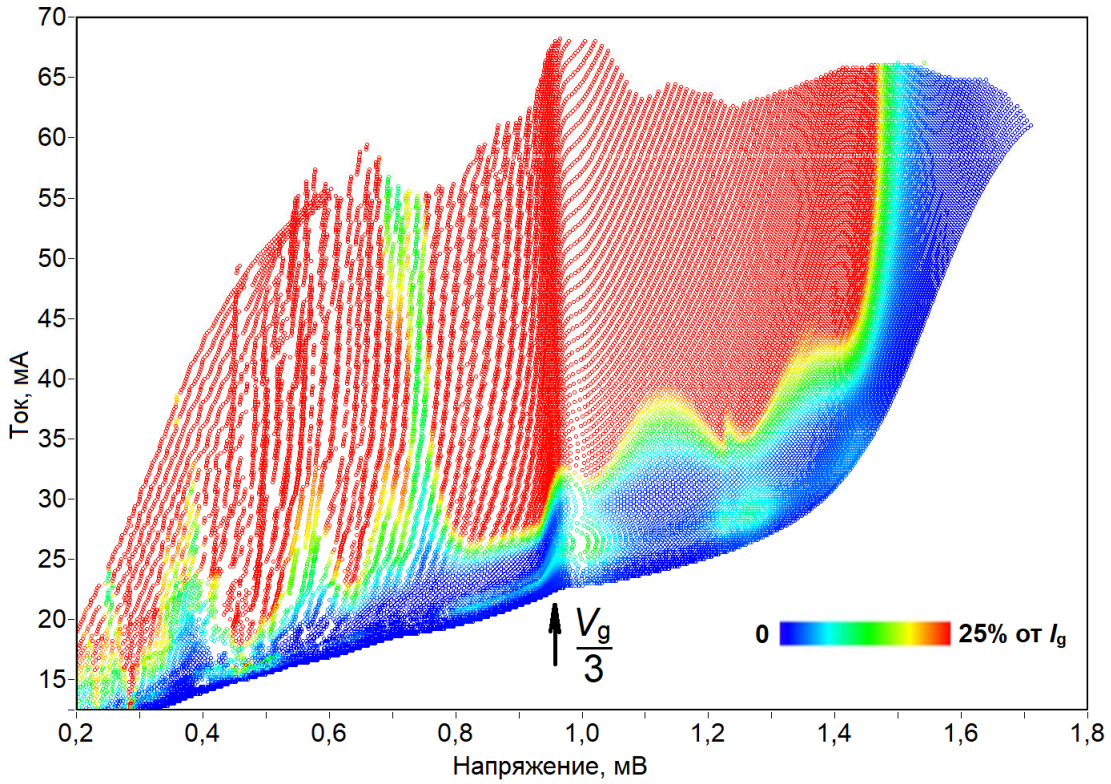


Рисунок 3.1 – Схема топологии *on-chip* генератора на основе РДП в геометрии *overlap*. 1 – открытый конец РДП (без нагрузки), 2 – выходной конец РДП на микрополосковую линию передачи, 3 – выходной трансформатор импеданса. Длина РДП L = 400 мкм, ширина W = 16 мкм, сужение на концах до 1,6 мкм. Красной и синей рамками обозначены нижний и верхний электроды схемы, соответственно. Ширина области перекрытия электродов за пределами РДП W_i = 10 мкм. Зелёной рамкой обозначена область с уменьшенной толщиной диэлектрика d_i = 200 нм между электродами; за пределами области толщина составляет 400 нм. Стрелками указано направление задания тока смещения I_B и тока линии управления магнитным полем I_{CL}.

Характерный вид серии экспериментальных ВАХ образцов РДП такого дизайна, изготовленных на основе высококачественных структур Nb/AlN/NbN и Nb/AlO_x/Nb, представлен на рисунке 3.2.



(а)



(б)

Рисунок 3.2– Семейства ВАХ РДП, измеренные при различных значениях магнитного поля, изменяемого с постоянным шагом по току I_{CL} (а) на основе Nb/AlN/NbN [124] и (б) на основе Nb/AlO_x/Nb [**A1**]. На обоих рисунках цветовая палитра обозначает величину тока квазичастичной ступени СИС детектора, вызванной сигналом накачки РДП, в процентах от щелевого скачка тока квазичастиц I_g (см. рис. 1.9). На рисунках указано «граничное» напряжение самонакачки $V_g/3$ [68], разделяющее резонансный режим работы и режим вязкого потока вихрей.

На семействе ВАХ обоих типов структур Nb/AlO_x/Nb и Nb/AlN/NbN имеется чётко выраженная резонансная область (область ступеней Фиске) ниже значения $V_g/3$, при превышении которого значительно растет затухание в переходе из-за эффекта самонакачки [68-70]. В случае, когда затухание распространяющейся электромагнитной волны в переходе настолько мало, что она, частично отразившись от выходного конца перехода, достигает противоположного края (открытого конца), образуются стоячие волны в переходе. В данном рассмотрении РДП представляет собой резонатор с набором мод, определяемых его геометрической длиной L и фактической (реальной) скоростью распространения волны c_{sw}. Набор частот f_n, при которых образуются стоячие волны, определяется простейшим выражением для резонатора

$$f_n = \frac{c_{sw}}{2L} n, \tag{3.1}$$

где n – номер моды и, соответственно, номер ступени. Поскольку основная частота генерации РДП фундаментально определяется напряжением рабочей точки на ВАХ, разница по частоте между соседними модами (резонансами Фиске) $\Delta f_{Fiske} = c_{sw} / 2L$ в точности определяет расстояние по напряжению между ступенями ΔV_{Fiske} :

$$\Delta V_{Fiske} = \frac{h}{2e} \Delta f_{Fiske} = \frac{h}{2e} \frac{c_{sw}}{2L} \equiv \frac{h c_{sw}}{4eL}, \tag{3.2}$$

откуда видно, что расстояние между ступенями зависит только от скорости волны в переходе и его длины, причём обратно пропорционально длине L. В частности, из выражения (3.2) экспериментально достаточно легко определяется значение c_{sw} , поскольку расстояние между ступенями известно из общего вида ВАХ. Методы независимого определения скорости Свайхарта из эксперимента по выражению (3.2) и из геометрических размеров, включая область перекрытия электродов, с учетом физических параметров материалов по выражению (1.18) позволяют строить набор зависимостей для переходов различной геометрии РДП (в первую очередь, длины), определять c_{sw} с

достаточной высокой точностью для различных трехслойных структур с различной плотностью тока j_c, а также определять такие параметры, как удельная ёмкость барьерного слоя и параметр затухания, последний из которых характеризует условия реализации резонансного режима в переходе в зависимости от его длины [124]. В большинстве случаев, РДП выбранной длины следует изготавливать с такой плотностью тока, при которой генерация на любой выбранной частоте в резонансном режиме будет возможна на нескольких ступенях Фиске с учетом их наклона. Так, например, из рисунка 3.2 видно, что для обеих структур РДП при напряжениях ниже $V_g/3$ реализуется ситуация, при которой генерация на любой фиксированной частоте (фиксированном напряжении) возможна на двух-трех ступенях за счёт их наклона.

При напряжении РДП выше $V_g/3$ реализуется режим вязкого потока джозефсоновских вихрей. В данном режиме перестройка частоты осуществляется изменением лишь тока управления магнитным полем I_{CL} при фиксированном токе смещения I_B. Возможность быстрой и простой перестройки частоты особенно важно, например, в космических миссиях, в условиях ограниченного времени работы прибора, узкого канала передачи данных между прибором и центром управления, а также с учетом наличия временны**х** задержек, связанных с передачей данных.

Как видно из теоретического выражения (1.22) и уточненной эмпирической формулы (1.24)-(1.25), ширина спектральной линии РДП сильно зависит от дифференциального сопротивления перехода R_d в рабочей точке генерации. Так, за счет слабого наклона ступеней Фиске (низкое R_d), ширина линии генерации в резонансном режиме составляет, как правило, от ~500 кГц до 2 МГц [116-120], в то время как в режиме вязкого потока (высокое R_d) она составляет от нескольких до двух десятков МГц.

3.2. Схема генератора на основе РДП с излучением сигнала в открытое пространство

Задача вывода излучения РДП из плоскости микросхемы в открытое пространство на уровне концепции решается достаточно тривиально – при помощи планарной передающей антенны. На практике же разработка интегральной схемы РДП, согласованного по импедансу с передающей антенной, согласованной, в свою очередь, с открытым пространством, представляется достаточно непростой научно-технической задачей. Кроме того, реализация схемы «РДП + антенна» не подразумевает возможности стабилизации частоты и фазы выходного излучения, поэтому такая схема пригодна, в лучшем случае, для проверки концепции в целом, но не для практических применений. Следовательно, для реализации возможности стабилизации необходимо ответвление части выходного сигнала РДП в цепь обратной связи с использованием гармонического СИС смесителя. Такая цепь позволяет, во-первых, непосредственно измерять спектр излучения генератора, во-вторых, использовать систему частотной стабилизации сигнала и систему ФАПЧ с использованием дополнительного опорного высокостабильного сигнала СВЧ.

Согласование элементов микросхемы с открытым пространством в ТГц диапазоне осуществляется, в основном, двумя способами – при помощи квазиоптического тракта («антенно-линзовая» система) либо при помощи волноводного тракта («чип-волноводная» система). Поскольку приемная антенно-линзовая система была хорошо отработана и апробирована диссертантом на примере работы СИП (см. раздел 1.4), в качестве передающей системы для источника на основе РДП была выбрана именно эта (антенно-линзовая) концепция.

Концепция вывода излучения РДП в открытое пространство с учетом криогенной системы в самом общем виде представлена на рисунке 3.3.

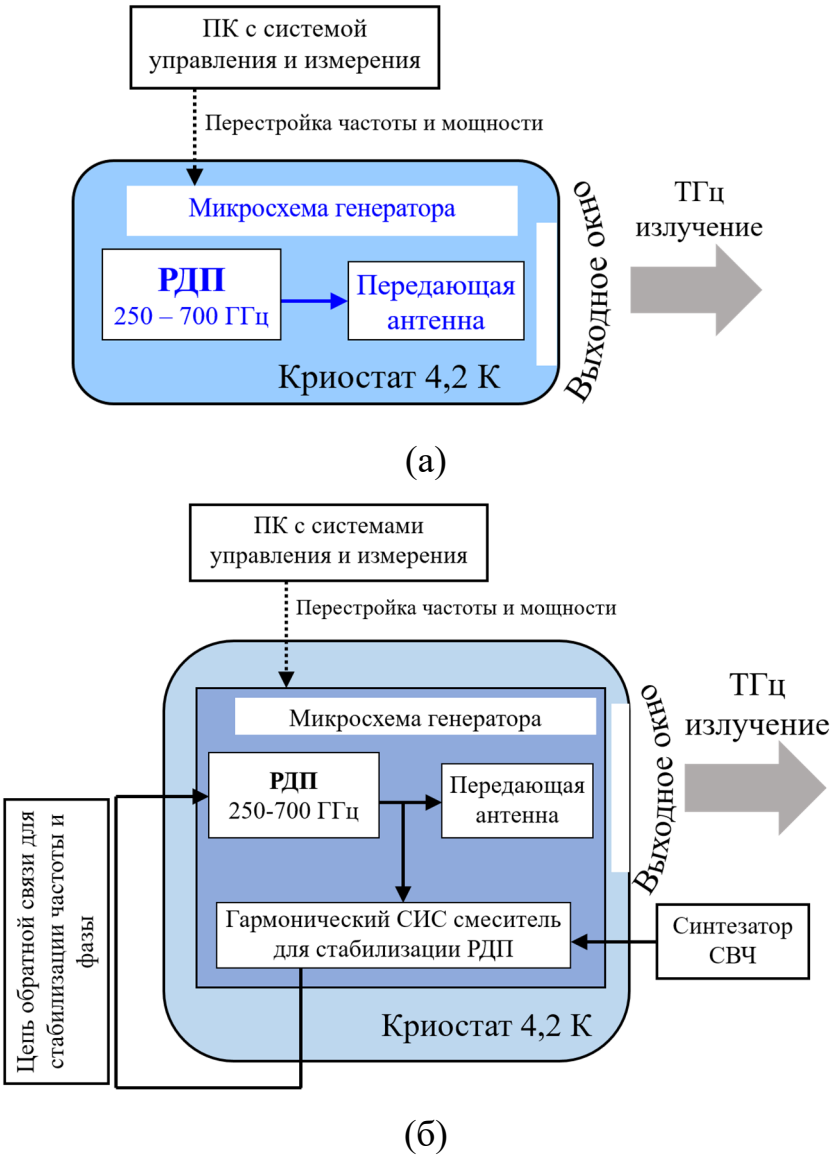


Рисунок 3.3 – Общая схема концепции вывода излучения генератора на основе РДП в открытое пространство при помощи передающей антенны – (а) без возможности стабилизации частоты и фазы сигнала, (б) с цепью обратной связи для стабилизации сигнала с использованием гармонического СИС смесителя. Концепция подразумевает установку микросхемы на линзу так, чтобы антенна размещалась в фокусе линзы («антенно-линзовая» передающая система).

В силу особенностей топологической конструкции РДП, из наиболее распространенных видов *on-chip* антенн – дипольной, щелевой, спиральной, логопериодической – как наиболее простой в реализации **выбран щелевой тип антенны**. Такая антенна изготавливается в виде выреза в нижнем электроде линии передачи и поэтому не ограничивает проектирование микрополосковой линии передачи с распределенным (условно «бесконечно

большим») нижним электродом, в то время как остальные типы антенн вынужденно изготавливаются либо в верхнем электроде, что накладывает существенные ограничение на геометрические размеры и расположение верхнего электрода микрополосковой линии, либо в дополнительном слое металлизации, что существенно усложняет технологический цикл изготовления.

Образцы микросхем изготавливаются на подложке из высокоомного кремния размером 4×4 мм и толщиной около 0,5 мм. Фотошаблоны с элементами топологии микронных и субмикронных размеров изготавливаются при помощи электронно-лучевой литографии. Сверхпроводниковые туннельные структуры выполняются на основе $Nb/AlO_x/Nb$, технологический процесс изготовления которых подробно описан в работах [176-177], либо на основе Nb/AlN/NbN, технология для которых описана в работе [178]. Для предотвращения подтрава подложки в процессе плазменного травления при формировании туннельных переходов используется осаждение буферного слоя Al_2O_3 толщиной около 100 нм. Далее производится осаждение трехслойной структуры $Nb/AlO_x/Nb$ (или Nb/AlN/NbN) методами магнетронного напыления. Геометрия электродов формируется посредством “*lift-off*” (в русскоязычной терминологии – «взрывной») литографии. Толщина нижнего и верхнего электродов на основе ниобия составляет около 200 нм и 400-450 нм, соответственно. Микрополосковые линии передачи выполняются на основе $Nb/SiO_2/Nb$ с толщиной изолятора порядка 400 нм, за исключением некоторых областей, где толщина составляет 200 нм (например, область, выделенная зелёной рамкой на рис.3.1). Вскрытие контактов к структурам производится также посредством «взрывной» литографии, после чего напыляются контактные площадки из золота.

Основная задача при проектировании источника с излучением в открытое пространство заключается в согласовании по мощности выходного сигнала РДП с низким импедансом (доли Ома) и квазиоптической линзовой

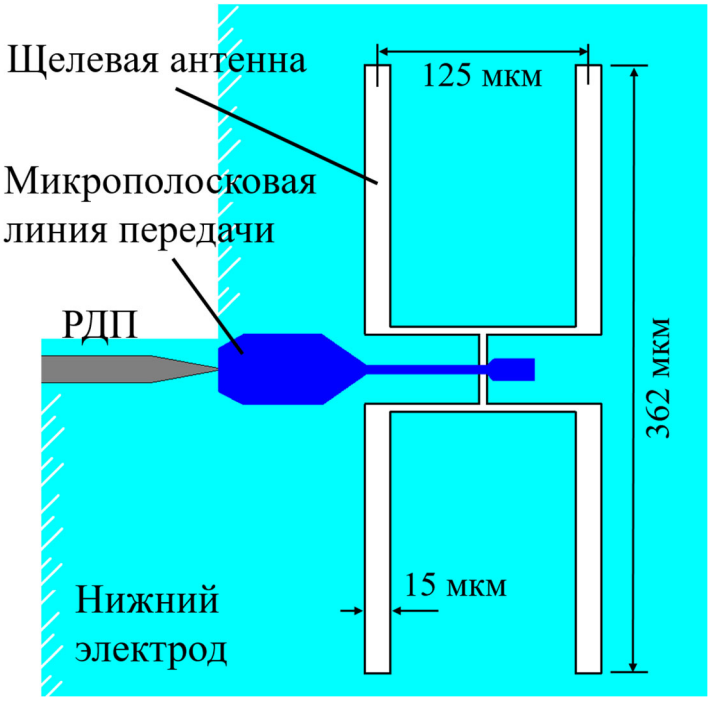
антенны с относительно высоким импедансом (десятки Ом), а также в создании требуемой диаграммы направленности излучения. В последующих разделах главы описаны разработанные и исследованные конструкции генератора на основе РДП, интегрированного с двойной щелевой антенной.

3.2.1. Дизайны генератора с щелевой антенной

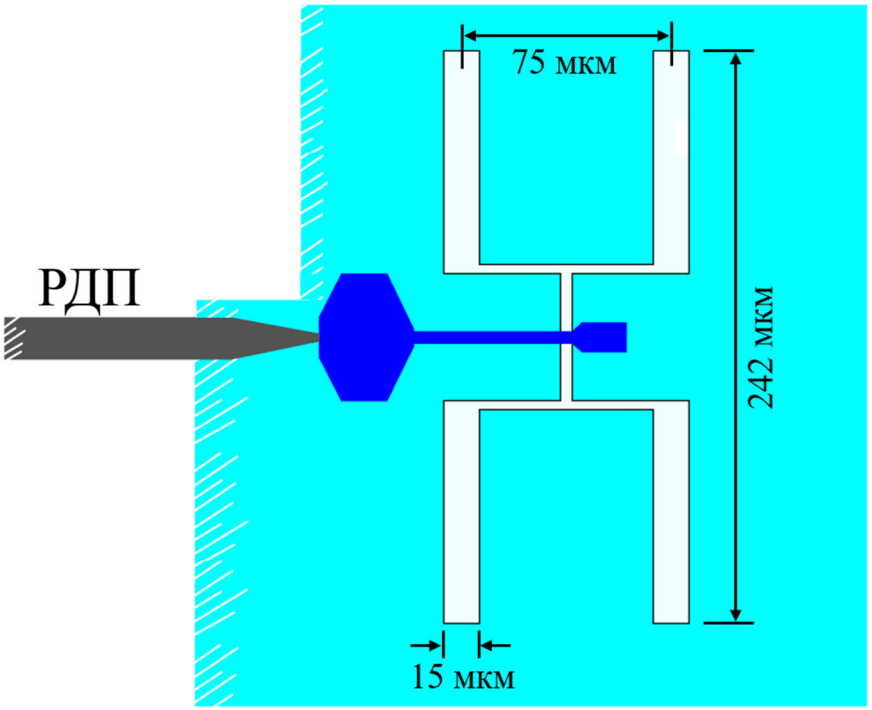
Двойная щелевая антенна является более узкополосной, чем используемый генератор: как правило, ширина АЧХ антенны ~30% от центральной частоты, в то время как РДП обладает областью перестройки частоты 250-700 ГГц (ширина полосы порядка 100%), поэтому «полный» рабочий диапазон РДП реализован тремя геометрическими конструкциями передающей антенны с центральными частотами 300 ГГц, 450 ГГц и 550 ГГц. Далее, для простоты (в т.ч. для использования в подписях к графикам) данные интегральные конструкции будут обозначаться **A-300**, **A-450** и **A-550** (литера «А» означает «Антенна», число – центральная частота), а вместо сочетаний «интегральная конструкция микросхемы» или «топология микросхемы» будет использоваться слово «дизайн» (понятия равнозначны по смыслу). Более того, никакой другой тип щелевой антенны, кроме *двойной* щелевой, не используется в рамках диссертации, поэтому слово «двойная» для простоты в большинстве случаев будет опущено, а под сочетанием «щелевая антенна» всегда подразумевается «двойная щелевая антенна».

Схемы трех разработанных дизайнов представлены на рисунке 3.4. Дизайны отличаются между собой геометрическими размерами щелевой антенны (длиной «щелевых вырезов» и расстоянием между ними), а также топологией микрополосковой линии передачи, в том числе выходного трансформатора импеданса. Диапазон рабочих частот определяется, прежде всего, длиной вырезов, а их ширина подбирается, прежде всего, на основе технологически допустимых параметров травления при изготовлении и влияет на диаграмму направленности антенны. Расстояние между вырезами

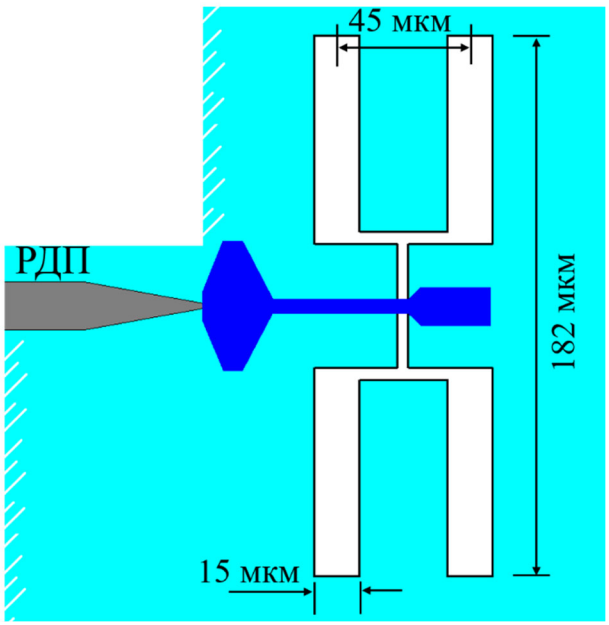
подбирается в процессе оптимизации при решении трехмерной численной модели таким образом, чтобы излучение отдельных вырезов получалось относительно синфазным (не противофазным).



(а)



(б)



(в)

Рисунок 3.4 – Топология интегральной конструкции РДП с передающей двойной щелевой антенной, рассчитанной для излучения в открытое пространство в диапазонах (а) 250-410 ГГц (дизайн **A-300**), (б) 330-570 ГГц (дизайн **A-450**), (в) 420-700 ГГц (дизайн **A-550**). Повторяющиеся элементы на схемах подписаны только для (а). Схемы приведены в масштабе. Для простоты на рисунках не показаны подводящие электроды РДП по постоянному току, а также не детализированы области с разной толщиной диэлектрика SiO_2 между электродами, которая составляет 200 нм и 400 нм.

Щелевая антенна представленного типа была использована, например, в работе [179] в качестве приемной линзовой антенны СИС приемника для центральных частот 100 ГГц, 246 ГГц и 500 ГГц. Антенны всех дизайнов выполнены в пленках ниобия толщиной 200 нм.

Расчёты излучающей структуры антенн проводились в специализированной программе трёхмерного численного моделирования высокочастотных структур *CST Studio*; методы и детали расчетов подробно описаны в работе [180]. Для учёта сверхпроводящего состояния антенн и микрополосковых линий передачи использовано значение лондоновской глубины проникновения магнитного поля для тонких плёнок ниобия λ_L = 85 нм. На рисунке 3.5 представлены результаты расчёта согласования по мощности для всех дизайнов **A-300**, **A-450** и **A-550** – показан процент

мощности излучения в открытое пространство от полной выходной мощности РДП, в зависимости от частоты. Более 70% мощности излучается антеннами в диапазонах 250 – 410 ГГц (дизайн **A-300**), 330 – 570 ГГц (дизайн **A-450**), и 420 – 700 ГГц (дизайн **A-550**), при этом характер зависимости достаточно равномерный в окрестности центральной частоты. Микрополосковая линия передачи проектировалась таким образом, чтобы согласовать низкий выходной импеданс генератора, положенный в расчётах равным 0,5 Ом и не зависящим от частоты, и высокий входной импеданс квазиоптической щелевой антенны.

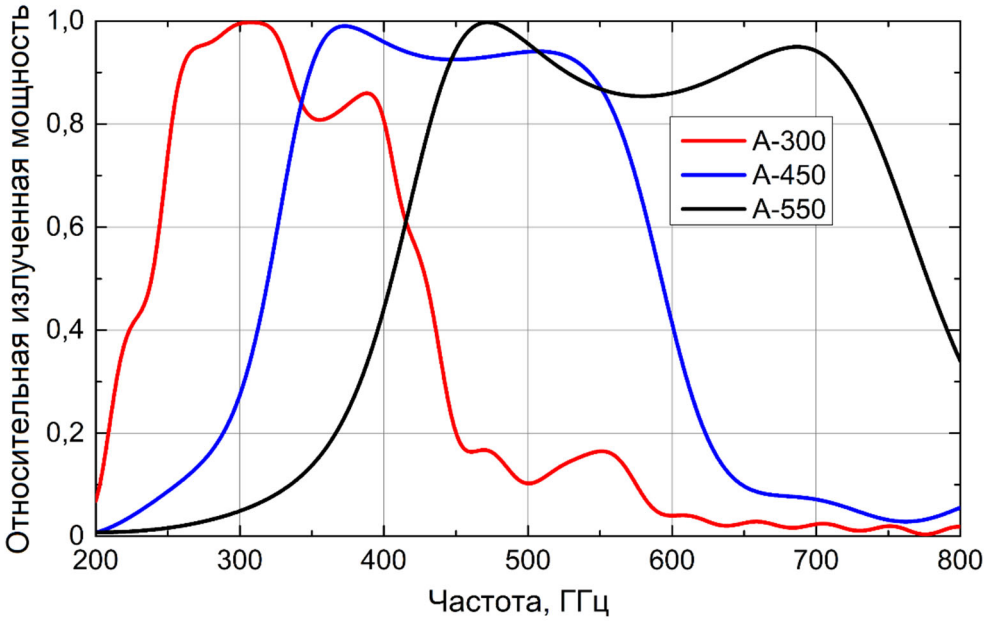
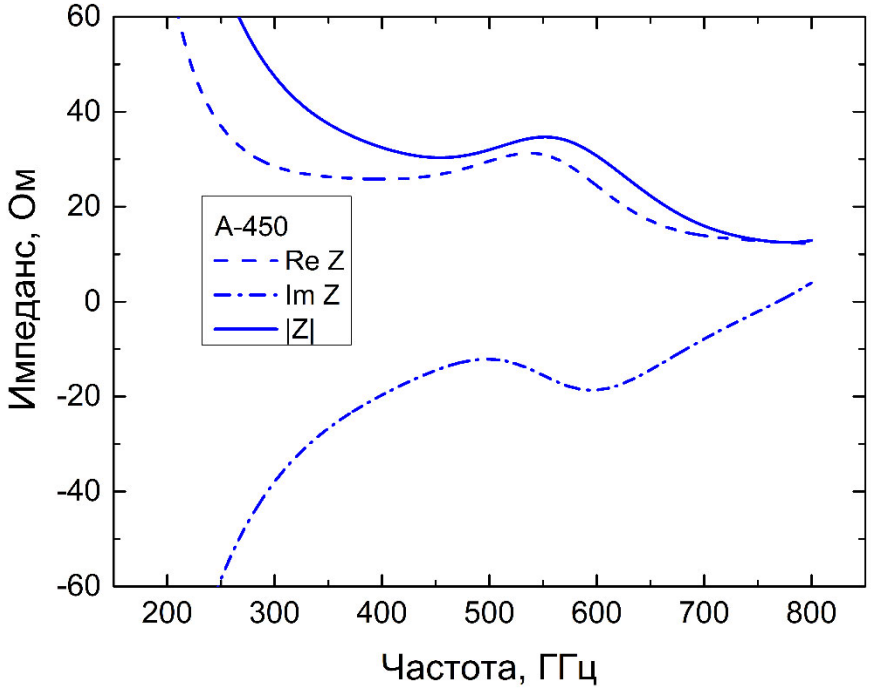
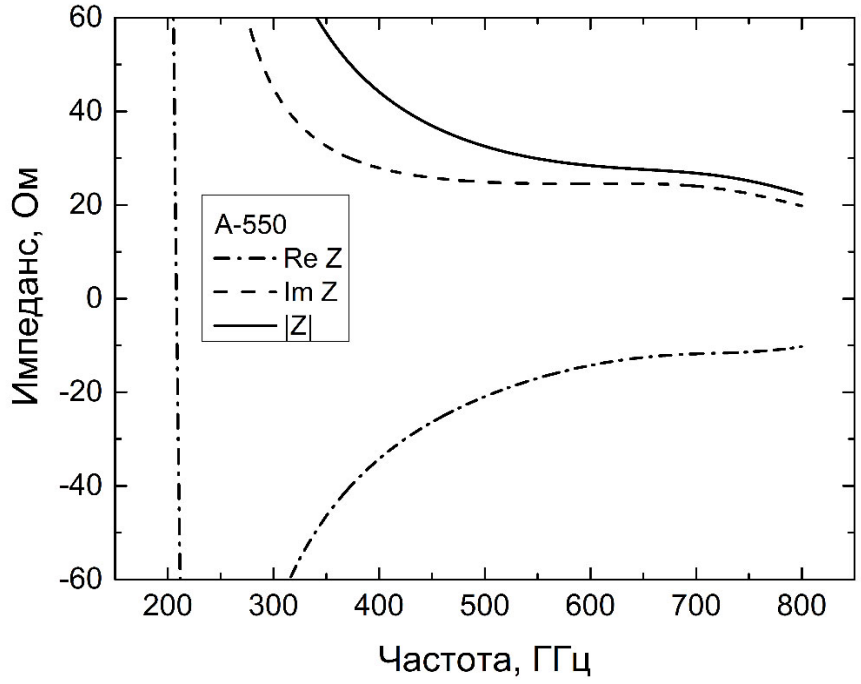


Рисунок 3.5 – Доля мощности, излученной антенной в полный телесный угол 4π, от полной выходной мощности РДП в зависимости частоты для трёх дизайнов структуры. Результаты численного моделирования.

На рисунке 3.6 представлен импеданс *Z* антенн дизайнов **A-450** и **A-550** в точке подключения к линии передачи, идущей от генератора. В обоих случаях зависимость импеданса от частоты в пределах рабочего диапазона является достаточно плоской (имеет форму плато), без скачков, полный импеданс меняется в пределах 15 Ом: от 30 Ом до 40 Ом для антенны **A-450** и от 26 Ом до 40 Ом для антенны **A-550**.



(а)



(б)

Рисунок 3.6 – Результаты численных расчетов импеданса антенны двух конструкций в зависимости от частоты: (а) дизайн **A-450**, (б) дизайн **A-550**. Показаны действительная, мнимая часть и модуль полного импеданса.

На рисунке 3.7 показаны рассчитанные диаграммы направленности антенн трёх дизайнов – **A-300, A-450** и **A-550** – для каждого на выбранной частоте вблизи максимальной рабочей частоты, а на рисунке 3.8 – наглядная трехмерная визуализация диаграммы направленности для дизайна **A-450** на

наборе частот рабочего диапазона от 400 ГГц до 600 ГГц через каждые 50 ГГц. Здесь и далее символ “@” (от англ. *at*) в легенде графиков означает «на/при частоте» (напр., *@400ГГц* означает «при частоте 400 ГГц»). Из рисунков 3.7, 3.8 видно, что подавляющая часть излучаемой мощности сосредоточена в центральном лепестке, направленном в сторону подложки и далее в сторону линзы. Из соотношения мощностей в «прямом» центральном пике (угол 0 градусов) и «противоположном» пике (угол ±180 градусов), которое составляет порядка -7 – -9дБ, видно, что более 70% мощности излучается в сторону линзы. Диаграммы на рис 3.7 рассчитаны без учета линзы, которая сужает фактическую диаграмму до угла расходимости в дальней зоне порядка нескольких градусов – например, в полетной миссии *TELIS* (статья [4]) в приемном канале СИП 500-700 ГГц была использована идентичная кремниевая линза и подложка микросхемы.

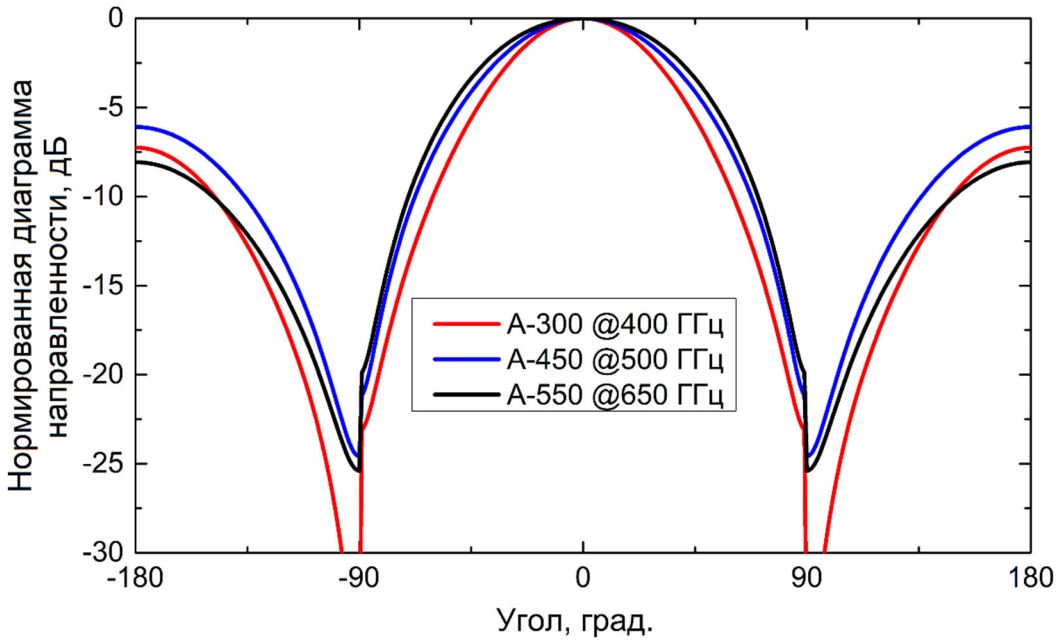


Рисунок 3.7 – Диаграммы направленности разработанных конструкций антенны (**A-300, A-450** и **A-550**) в плоскости, перпендикулярной плоскости антенны, при частотах излучения, близких к максимальной частоте каждого дизайна (значения частоты указаны в подписи). Направление 0 градусов – в сторону подложки; направление ±180 градусов – в сторону открытого вакуума.

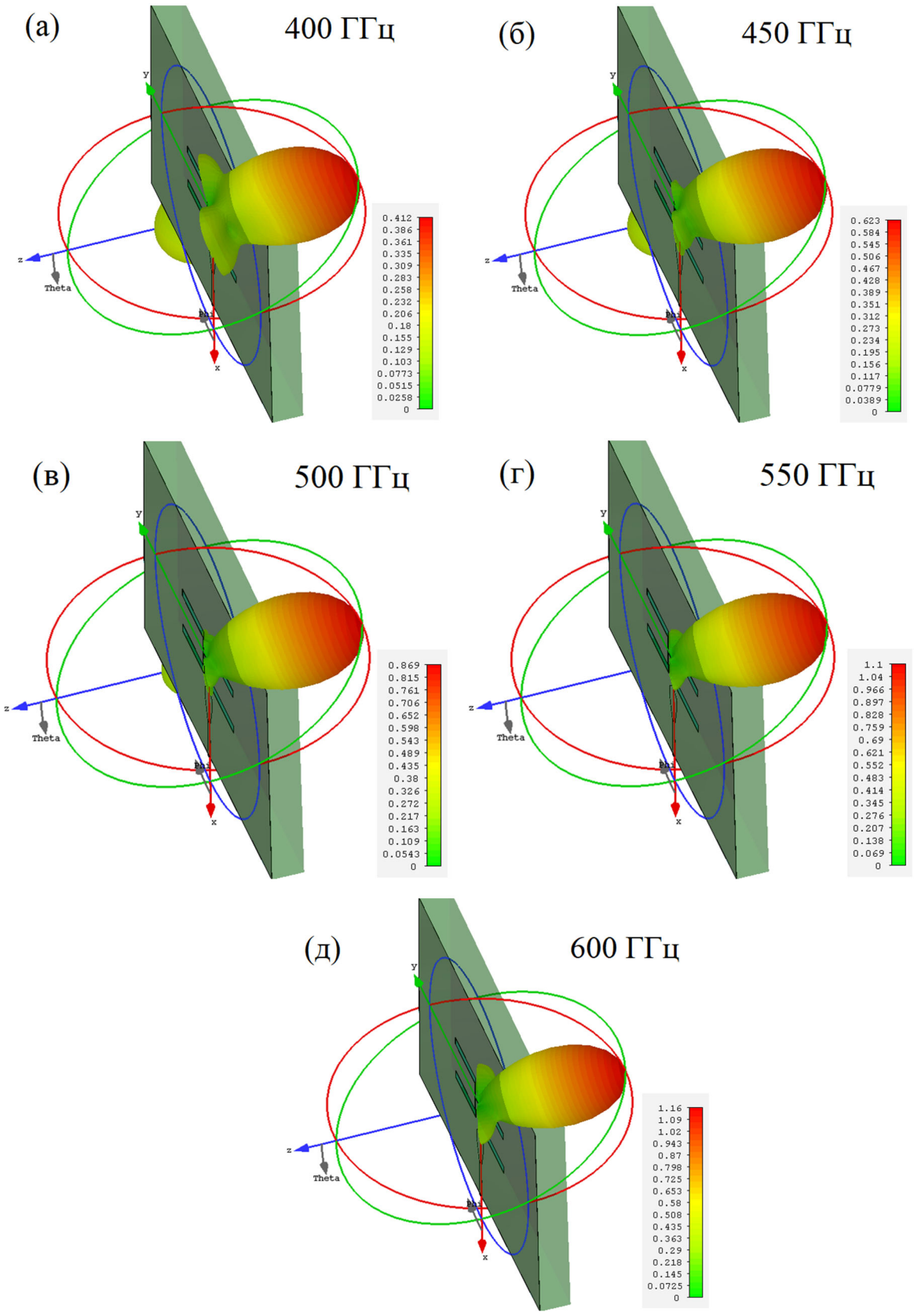


Рисунок 3.8 – Трехмерная визуализация диаграммы направленности дизайна **А-450** на частотах (а) 400 ГГц, (б) 450 ГГц, (в) 500 ГГц, (г) 550 ГГц и (д) 600 ГГц в виде скриншотов из программы численного моделирования. Цветовой палитрой обозначен уровень излучаемой мощности в относительных единицах.

3.2.2. Дизайн генератора с двойным фидером и щелевой антенной

В рамках работы был предложен и исследован альтернативный дизайн двойной щелевой антенны, представленный на рисунке 3.9. Физически это такой же тип антенны, что и в предыдущем разделе, но с другим способом подключения фидера на высокой частоте с использованием двух микрополосковых линий передачи. Антенна с таким типом подключения к приемному СИС смесителю, имеющему импеданс порядка 4 Ом, была использована в качестве приемной линзовой антенны в работе [181]. В дальнейшем для обозначения данного дизайна будет использовано сокращение **ДА-450** (литеры «ДА» – от «**Д**войной фидер с **А**нтенной», число – центральная частота).

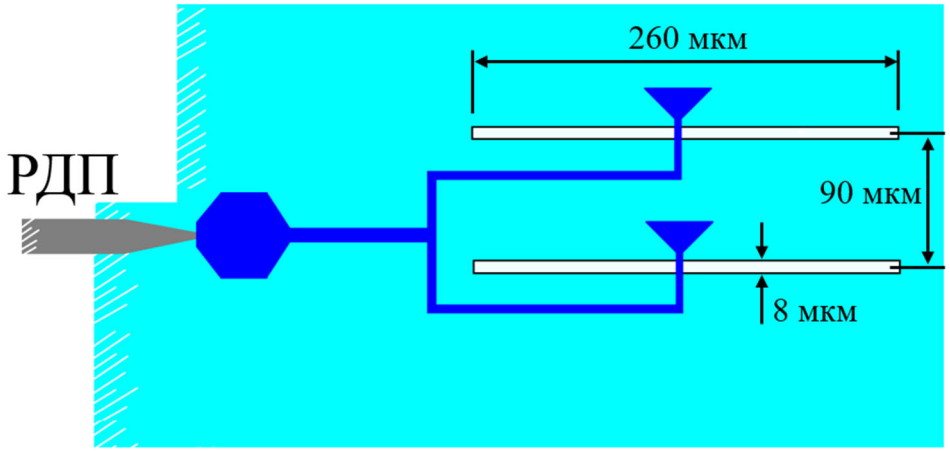
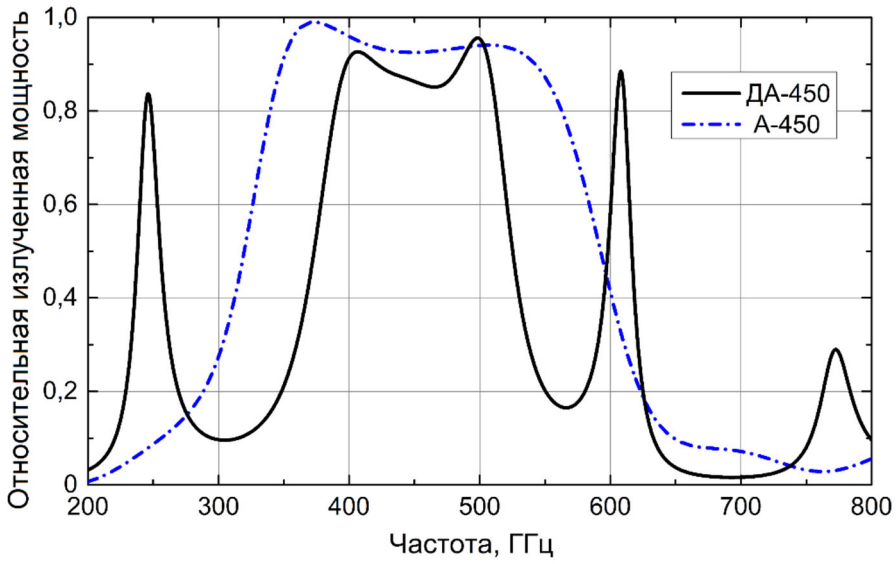
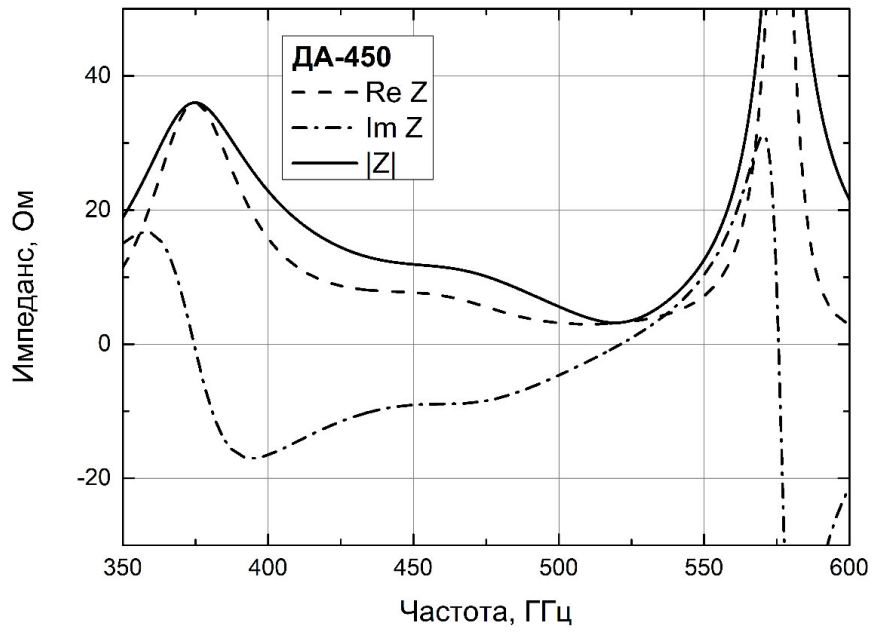


Рисунок 3.9 – Топология интегральной конструкции РДП с передающей щелевой антенной и двойным фидером, рассчитанной для излучения в открытое пространство в диапазоне 380-520 ГГц (дизайн **ДА-450**). Схема приведена в масштабе. Для простоты на рисунках не показаны подводящие электроды РДП по постоянному току, а также не детализированы области с разной толщиной диэлектрика SiO_2 между электродами, которая составляет 200 нм и 400 нм.

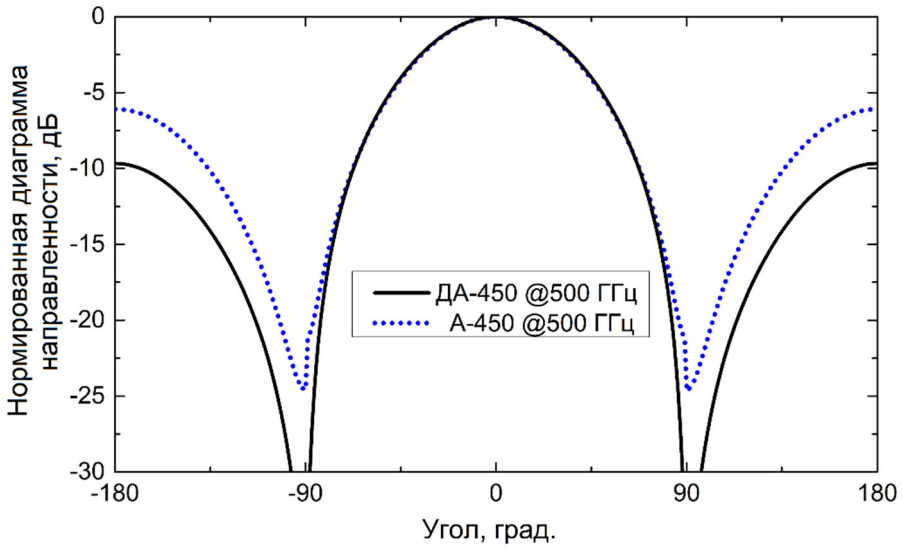
Набор рассчитанных ключевых характеристик разработанного дизайна в полной аналогии с характеристиками для предыдущих дизайнов – АЧХ интегральной схемы, импеданс антенны, диаграммы направленности на различных частотах – представлен на рисунке 3.10.


Относительная излученная мощность
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
200
300
400
500
600
700
800
Частота, ГГц
ДА-450
А-450

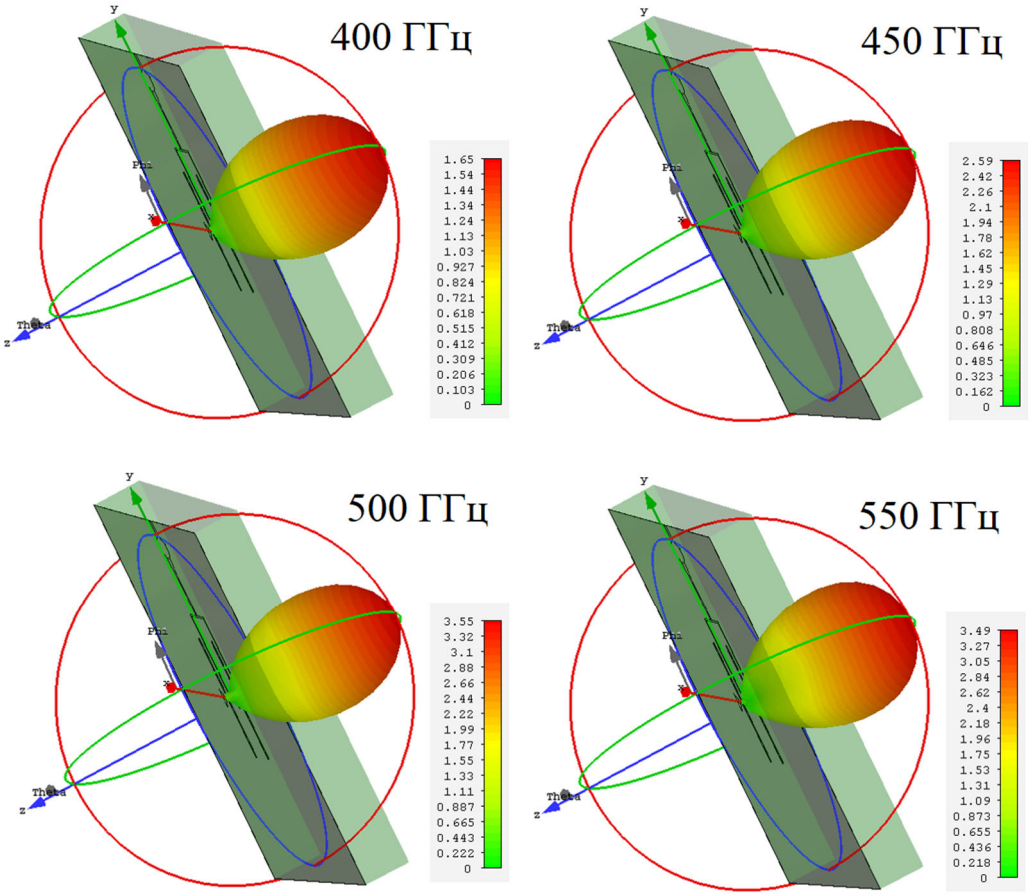
(а)


Импеданс, Ом
40
20
0
-20
350
400
450
500
550
600
Частота, ГГц
ДА-450
Re Z
Im Z
|Z|

(б)


Нормированная диаграмма направленности, дБ
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-180
-90
0
90
180
Угол, град.
ДА-450 @500 ГГц
А-450 @500 ГГц

(в)



(г)

Рисунок 3.10 – Электрофизические и квазиоптические характеристики антенны дизайна **ДА-450**: (а) АЧХ; кривая для дизайна **А-450** дублирует синюю кривую из рис. 3.5, (б) импеданс (частотная зависимость); (в) диаграмма направленности на частоте 500 ГГц в плоскости излучения, кривая для дизайна **А-450** дублирует синюю кривую из рис. 3.7; (г) трехмерная визуализация диаграммы направленности на частотах 400 ГГц, 450 ГГц, 500 ГГц и 550 ГГц, шкала мощности приведена в относительных единицах.

На рисунках 3.10 (а) и (в) для наглядного сравнения приведены характеристики антенны **А-450**, описанной разделом выше и имеющей такую же центральную частоту. Так, из рис. 3.10 а видно, что антенна дизайна **ДА-450** имеет более узкополосную АЧХ, чем описанная ранее **А-450** с одной линией передачи для подключения к антенне, этот результат будет подтвержден экспериментально далее. Из рис. 3.10 в видно, что мощность излучения дизайна **ДА-450** в противоположную сторону (открытый вакуум) примерно на 4 дБ меньше, чем для **А-450**, и составляет около -10 дБ от основного «лепестка», что соответствует излучению более 90% мощности в

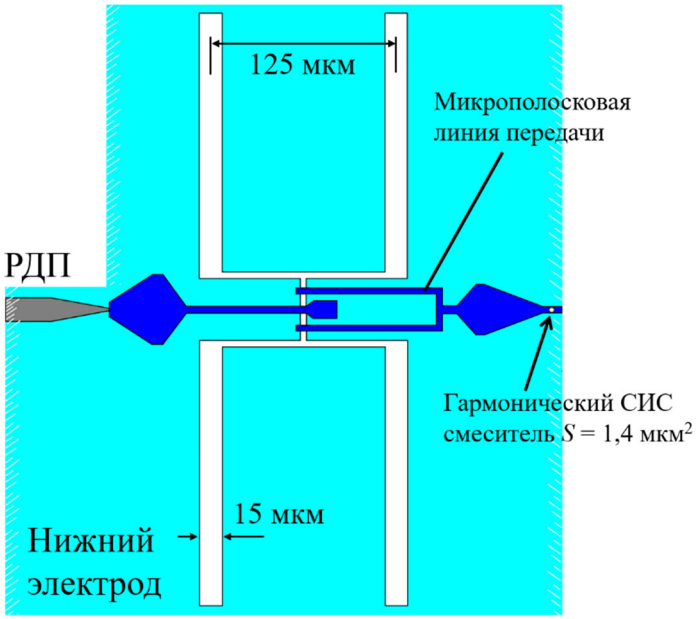
направлении линзы и означает более высокий уровень «полезной» излучаемой мощности в сравнении с дизайном **A-450**. Этот результат качественно соответствует трехмерной визуализации из рисунка 3.10 г, на котором, в сравнении с 3D-диаграммами из рисунка 3.8, практически отсутствуют «лепестки» излучения в сторону открытого вакуума.

3.2.3. Дизайны генератора с щелевой антенной и гармоническим смесителем

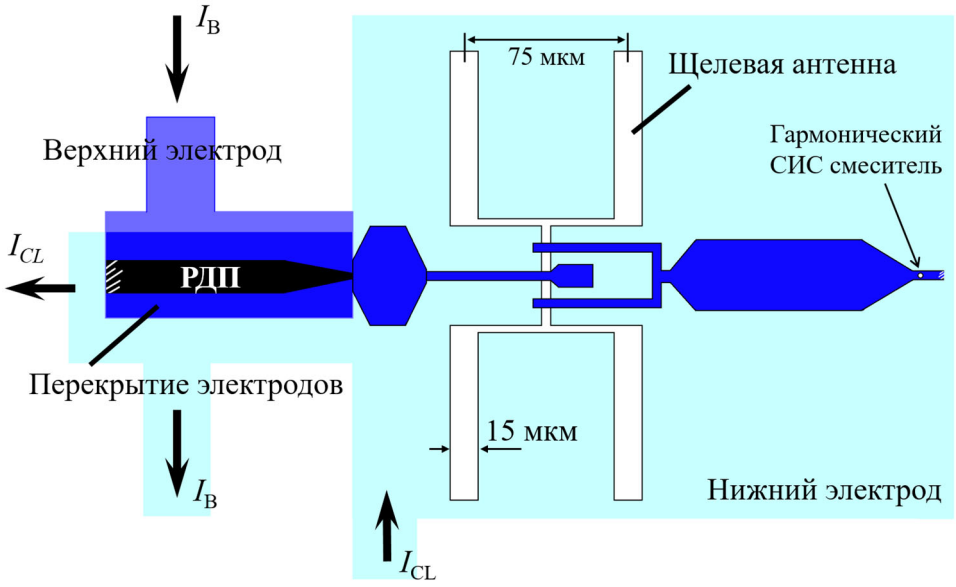
Выше было отмечено, что конструкции генератора с антенной, не включающие дополнительных элементов для частотной и фазовой синхронизации, полезны для проверки работоспособности концепции, но едва ли могут быть практически применены в качестве субТГц источника по причине низкой стабильности сигнала. Поэтому, после успешной экспериментальной апробации концепции (представлено в разделе 3.3), были разработаны модернизированные конструкции интегральной схемы на основе апробированной конструкции антенн с дополнительным включением гармонического смесителя. ГС представляет собой сосредоточенный СИС смеситель площадью ~1-1,5 мкм^2; конкретное значение площади выбирается по результатам численного моделирования исходя из целевых параметров схемы с учетом емкости перехода, его импеданса на рабочей частоте и, как следствие, степени согласования по импедансу с внешней электродинамической системой, включающей микрополосковую линию передачи от РДП и выходную копланарную линию передачи на промежуточной частоте, а также с учётом других расчётных параметров схемы. Таким образом, задача численного моделирования интегральной конструкции формулировалась следующим образом: во-первых, согласование по импедансу в целевом диапазоне на субТГц частотах сигнала РДП (низкий импеданс) с передающей щелевой антенной (высокий импеданс), во-вторых,

согласование сигнала РДП с гармоническим смесителем, обладающим промежуточным значением импеданса, – выше, чем у РДП, и ниже, чем у антенны. При расчетах следует добиваться максимально возможной ширины полосы согласования элементов. При этом согласование РДП с антенной должно быть наилучшим по эффективности передачи сигнала (мощности) в широкой полосе, в то время как согласование с ГС должно быть достаточным для работы систем ЧД и ФАПЧ в цепи обратной связи, но не слишком «идеальным», чтобы не отводить заметную часть полезной мощности сигнала. Известно, что для работы систем стабилизации частоты и фазы (ЧД и ФАПЧ) достаточным уровнем накачки ГС является значение квазичастичного тока ~5-10% от щелевого скачка тока на 1-й «подщелевой» квазичастичной ступени. На практике, достаточная мощность накачки составляет от одного до нескольких десятков нановатт для используемых СИС переходов с характерной плотностью тока ~5 кА/см^2 и площадью ~1-2 мкм^2.

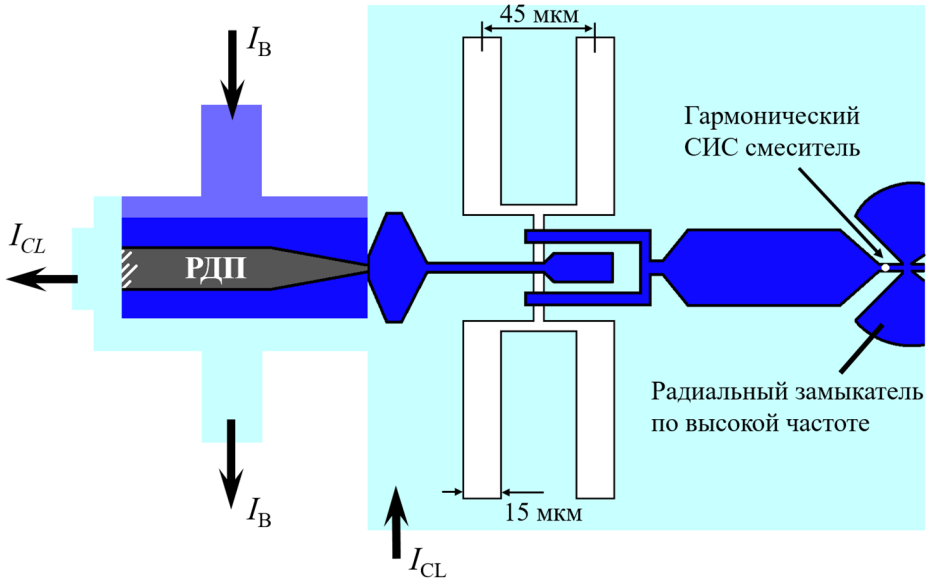
Конструкции разработанных интегральных схем, включающих РДП с передающей щелевой антенной и гармоническим смесителем, представлены на рисунке 3.11. Дизайны конструкций здесь и далее обозначены с добавленными литерами: «АГС» – от «**А**нтенна и **Г**армонический **С**меситель», а дизайны антенн использованы уже разработанные в предыдущем разделе. Таким образом, обозначения новых дизайнов с гармоническим смесителем, рассчитанных на разные частотные диапазоны: **АГС-300**, **АГС-450**, **АГС-550**, а также **ДАГС-550** – дизайн с двойным фидером антенны.


125 мкм
Микрополосковая
линия передачи
РДП
Гармонический СИС
смеситель S = 1,4 мкм^2
15 мкм
Нижний
электрод

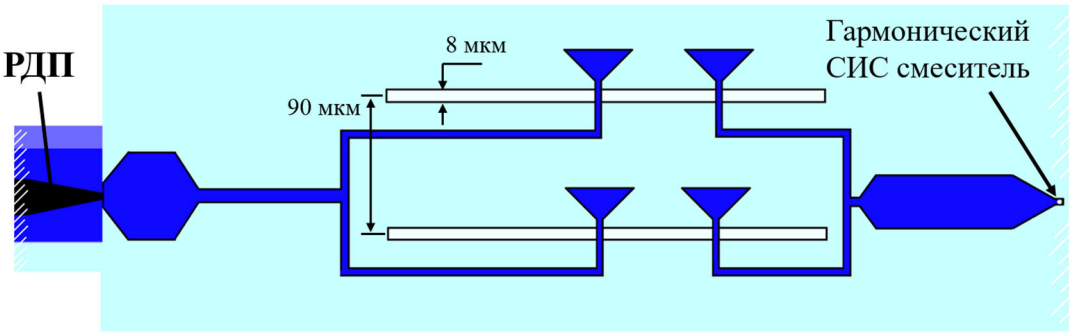
(а)


I_B
75 мкм
Щелевая антенна
Верхний электрод
Гармонический
СИС смеситель
I_{CL}
РДП
Перекрытие электродов
15 мкм
I_B
Нижний электрод
I_{CL}

(б)


45 мкм
I_B
Гармонический
СИС смеситель
I_{CL}
РДП
Радиальный замыкатель
по высокой частоте
I_B
15 мкм
I_{CL}

(в)



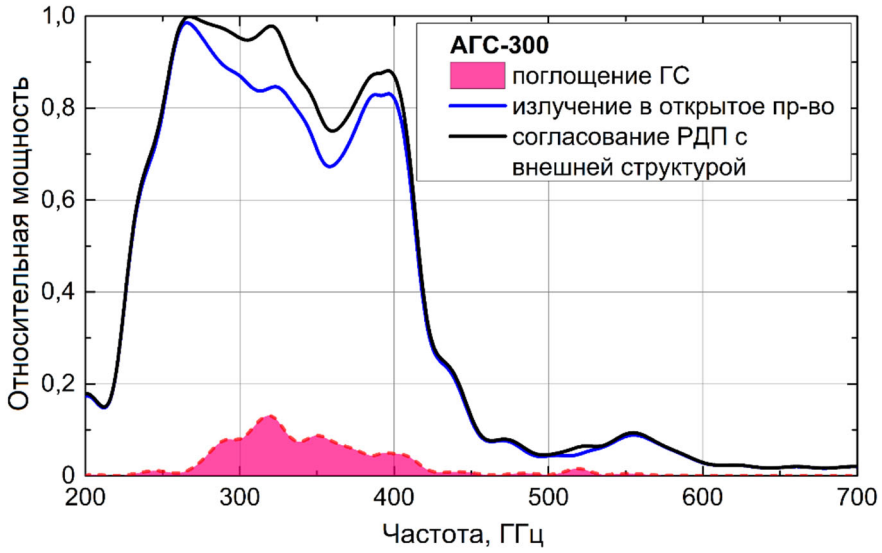
(г)

Рисунок 3.11 – Топология интегральной конструкции РДП с передающей щелевой антенной и гармоническим смесителем, рассчитанной для излучения в открытое пространство в диапазоне (а) 250-410 ГГц (дизайн **АГС-300**), (б) 330-540 ГГц (дизайн **АГС-450**), (в) 390-700 ГГц (дизайн **АГС-550**), (г) 400-480 ГГц (дизайн **ДАГС-450** в одной из вариаций). Длина антенны для всех дизайнов идентична представленной ранее на рис. 3.4, рис. 3.9. Наиболее детальные пояснения схемы приведены на рисунке (б), в остальных случаях повторяющиеся элементы не приведены. Схемы приведены в масштабе. Для простоты на рисунках не детализированы области с разной толщиной диэлектрика SiO_2 между электродами.

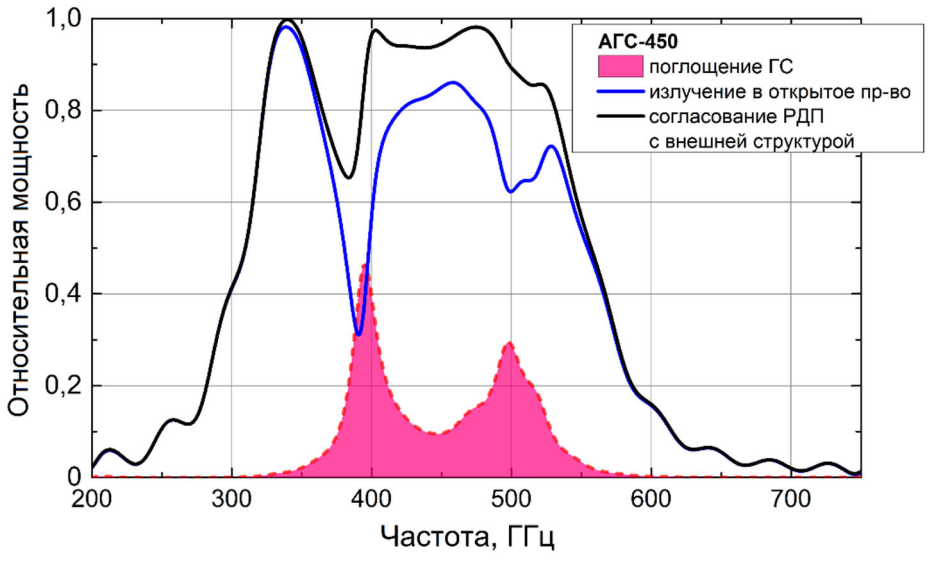
Рисунок топологии с обозначениями в наиболее полном виде с указанием направления токов I_B, I_{CL} приведен на рисунке 3.11 б (для дизайна **АГС-450**): голубым цветом обозначен нижний электрод схемы, фиолетовым – верхний электрод схемы, синим – их перекрытие через слой диэлектрика SiO_2, формирующее как микрополосковую линию передачи, так и «холостую» область (“*idle region*”) в окрестности РДП. На рисунке 3.11 в в правой части также показан радиальный «замыкатель» на высокой частоте в тракте гармонического смесителя с радиусом порядка 1/4 длины волны сигнала на рабочей частоте; элемент является условным замыканием на землю субТГц сигнала и препятствует шунтированию полезного сигнала РДП мнимой частью импеданса ГС. Замыкатель спроектирован для подсоединения отрезка микрополосковой линии с отличным от нуля значением индуктивности, которая компенсирует собственную ёмкость ГС на рабочей частоте. Выход ГС выполнен в виде копланарной линии передачи, через которую на смеситель подаётся опорный сигнал внешнего синтезатора на частоте порядка 20 ГГц и выводится выходной сигнал на промежуточной частоте в диапазоне до 1 ГГц.

Доля мощности генератора, ушедшая в копланарную линию, согласно расчету, составляет менее 2% от общей выходной мощности генератора для всех дизайнов.

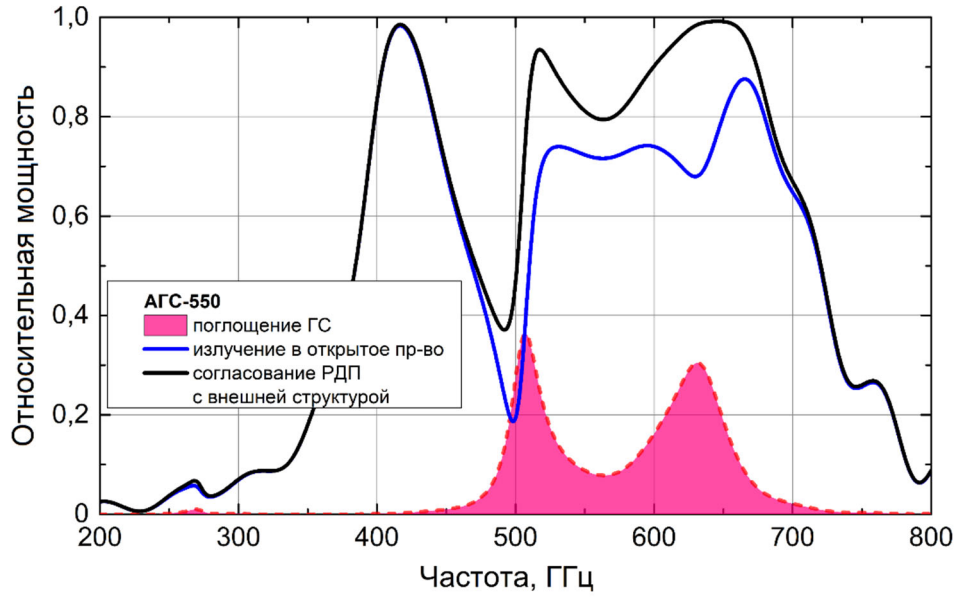
На рисунке 3.12 представлены АЧХ разработанных дизайнов: в дополнение к мощности, излученной антенной в открытое пространство, на графиках представлена мощность поглощения гармоническим смесителем, которая составляет ~10-20% от полной выходной мощности РДП. Следует отметить, что при расчетах АЧХ мощность излучения РДП полагалась не зависящей от частоты; импеданс был выбран равным 0,5 Ом и также не зависящим от частоты.



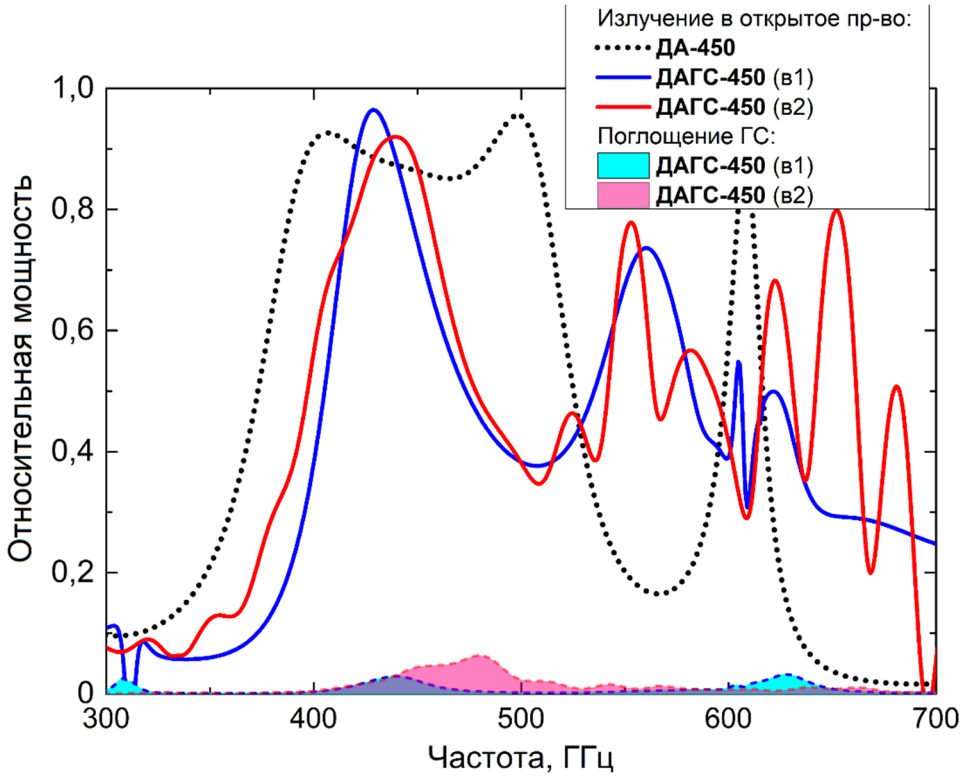
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 3.12 – Результаты численного моделирования АЧХ конструкций интегральной схемы, содержащей РДП, передающую щелевую антенну и гармонический смеситель, для различных дизайнов: (а) **АГС-300**, (б) **АГС-450**, (в) **АГС-550**, (д) **ДАГС-450** в двух вариациях (также добавлена АЧХ дизайна **ДА-450** для сравнения**)**. По оси ординат на всех рисунках представлена доля мощности по отношения к полной выходной мощности РДП. Расчёт мощности излучения в открытое пространство и мощности согласования с внешней структурой проведен с учетом небольшой части мощности (порядка 1-2%), ушедшей через выходную копланарную линию гармонического смесителя.

Из рисунка 3.12 видно, что добавление в структуру гармонического смесителя с согласующей микрополосковой линией передачи для дизайнов с одной линией подключения РДП к антенне (**АГС-300**, **АГС-450** и **АГС-550**) практически не меняет частотную полосу согласования РДП с антенной (в сравнении с АЧХ из рис. 3.5), в то время для дизайна с двумя линиями подключения (**ДАГС-450**) не удаётся включить в структуру гармонический смеситель без существенного изменения рабочей полосы АЧХ. Попытка оптимизации дизайна **ДАГС-450** проводилась путем подбора геометрии линий передачи, выбора различных точек подключения линии передачи по высокой частоте ГС на отрезке вырезов «двойной» антенны, а также площади и электрофизических параметров ГС. Результат наилучших вариаций представлен на рис. 3.12 г, а схема топологии из рисунка 3.11 г соответствует синей кривой АЧХ из рисунка 3.12 г (вариация №1). Таким образом, с точки зрения ширины рабочей полосы источника, тип топологии антенны, представленный на рисунках 3.4 а-в и 3.14 а-в с одной линией подключения РДП к антенне по высокой частоте, оказался более перспективным для практических применений, чем тип топологии с двумя линиями подключения, представленный на рисунках 3.9 и 3.11 г.

Включение дополнительной микрополосковой линии передачи с ГС не влияет на импеданс антенны и практически не влияет на диаграмму направленности антенны, поэтому частотные зависимости импедансов и диаграммы направленности для **АГС-300**, **АГС-450**, **АГС-550** и **ДАГС-450** соответствуют представленным на рисунках 3.6, 3.7, 3.8, 3.10 для соответствующих дизайнов без гармонического смесителя.

3.2.4. Дизайны генератора с щелевой антенной и гармоническим смесителем, встроенными в ТГц линии передачи NbTiN/SiO_2/Al

Для проверки возможности реализации джозефсоновской генерации на частоте, превышающей щелевую частоту одного из электродов РДП, были

специально разработаны дизайны с линиями передачи на основе $NbTiN/SiO_2/Al$ с предельной рабочей частотой ~1,2-1,4 ТГц [158,159], которая значительно выше предельной рабочей частоты ~700 ГГц линий передачи на основе $Nb/SiO_2/Nb$ (см. рисунок 1.18). В таких линиях верхний электрод из алюминия при рабочей температуре около 4 К является нормальным металлом и обеспечивает отвод тепла от СИС переходов (в том числе РДП) за счет коэффициента теплопроводности на 1-2 порядка выше, чем у сверхпроводника.

Схемы дизайнов, содержащих РДП и передающую антенну, как без гармонического смесителя, так и с его наличием, с линиями передачи на основе $NbTiN/SiO_2/Al$ представлены на рисунке 3.13. В данных дизайнах использован РДП с меньшей длиной, чем во всех ранее описанных дизайнах (разделы 3.2.1-3.2.3), с целью уменьшения затухания бегущей волны в переходе и уменьшения тепловыделения за счет более низкого тока смещения. При этом «перекрытие» ступеней Фиске в резонансном режиме работы при фиксированном напряжении (частоте), как и их наличие в целом, перестало быть «желательным требованием» к вольтамперной характеристике РДП, потому как дизайн разрабатывался для целевого рабочего диапазона выше 750 ГГц, в котором реализован режим вязкого течения вихрей. Так, для проверки концепции использовались длины переходов 250 мкм и 120 мкм вместо использованной ранее длины 400 мкм. Другим отличием данного дизайна от ранее представленных является использование гармонического смесителя в виде двойного СИС перехода (по постоянному току переходы включены параллельно) с площадью 2×1 мкм^2 и иной способ его подключения к микрополосковой линии передачи при помощи волноводного зонда вместо радиального замыкателя. Расстояние между СИС переходами гармонического смесителя составляет 4 мкм. Разработанные дизайны обозначены как **А-850** и **АГС-850** в полной аналогии с ранее описанными дизайнами.

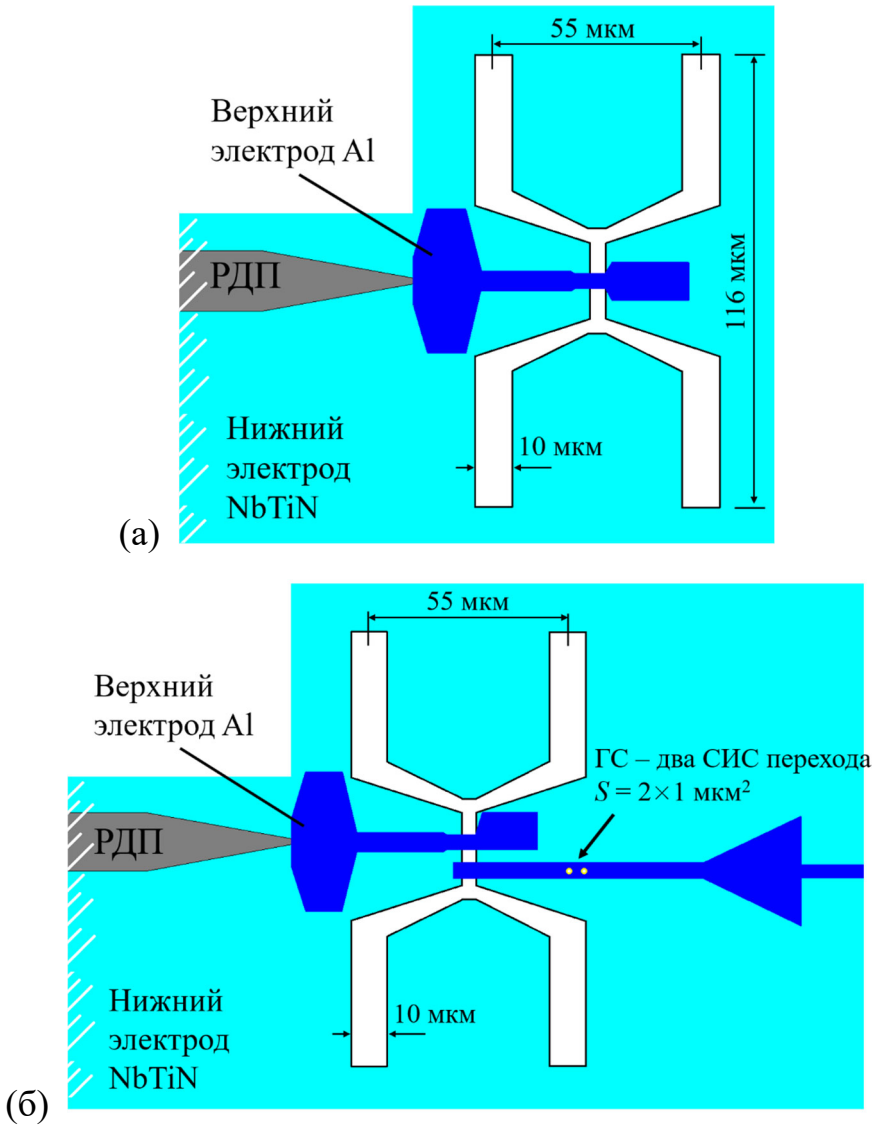
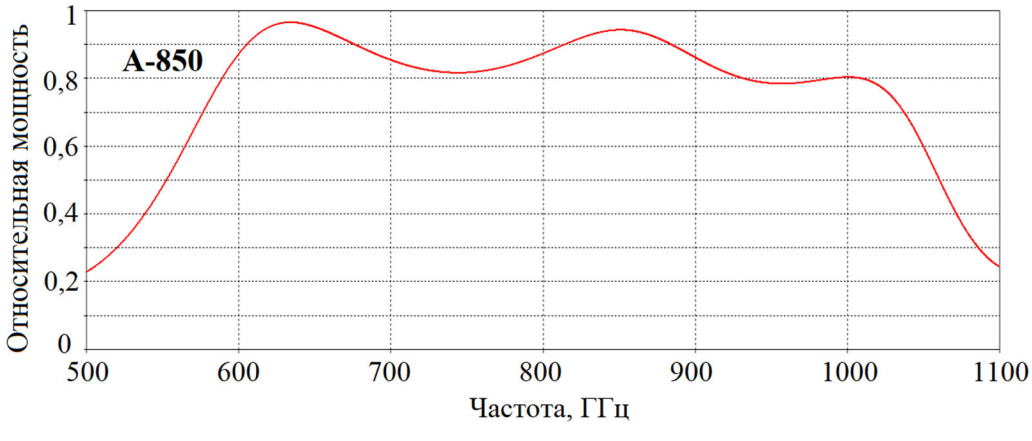


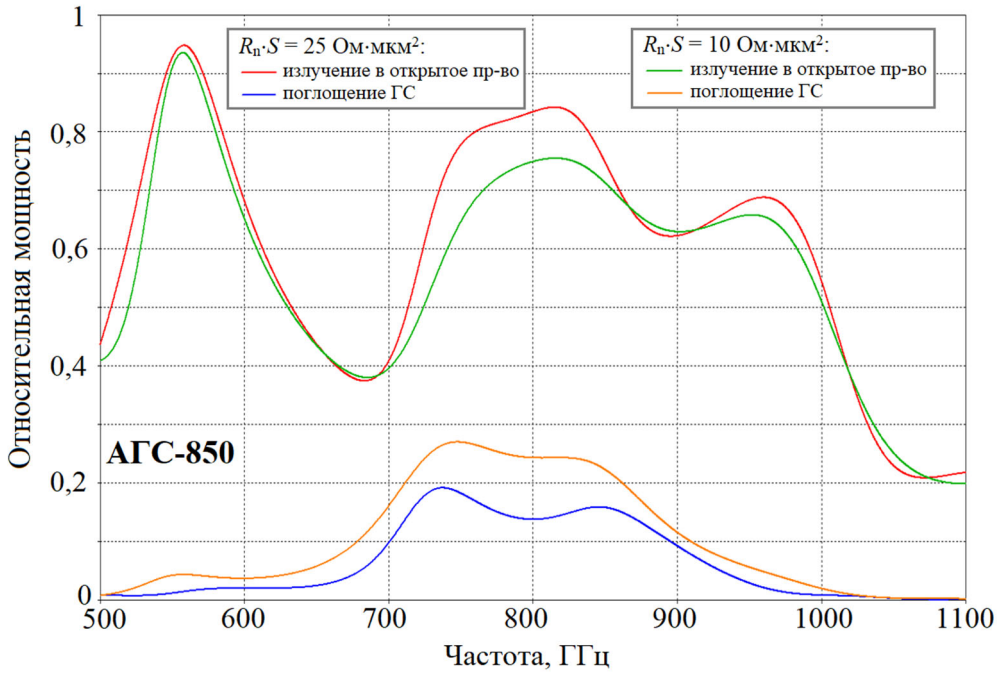
Рисунок 3.13 – Топология интегральной конструкции РДП с передающей щелевой антенной и ТГц линиями передачи на основе NbTiN/SiO_2/Al, рассчитанной для излучения в открытое пространство в диапазоне 0,6-1 ТГц (а) без гармонического смесителя (дизайн **А-850**); (б) с гармоническим смесителем в виде двух параллельно соединенных СИС переходов с площадью каждого 1 мкм^2 (дизайн **АГС-850**). Схемы приведены в масштабе. Для простоты на рисунках не показаны подводящие электроды РДП по постоянному току, а также не детализированы области с разной толщиной диэлектрика SiO_2 между электродами.

Численные расчеты АЧХ дизайнов **А-850** и **АГС-850** представлены на рисунке 3.14, а трехмерные визуализации диаграммы направленности при различных частотах – на рисунке 3.15. Из диаграмм направленности видно, что излучение в направлении «главного лепестка» с наибольшей

эффективностью происходит при приближении по частоте к верхней границе АЧХ (~0,9-1 ТГц).



(а)



(б)

Рисунок 3.14 – Результаты численного моделирования АЧХ конструкций интегральной схемы генератора на основе РДП и передающей щелевой антенны (а) для дизайна **А-850**: показана доля мощности РДП, излучаемой в открытое пространство; (б) для дизайна **АГС-850**: показана доля излучаемой мощности и доля мощности, поглощенной ГС, при двух различных расчетных параметрах нормального сопротивления СИС перехода площадью 1 мкм^2 (25 Ом и 10 Ом). По оси ординат на всех рисунках представлена доля мощности по отношения к полной выходной мощности РДП. Расчёт мощности излучения в открытое пространство проведен с учетом небольшой части мощности (порядка 1-2%), ушедшей через выходную копланарную линию гармонического смесителя.

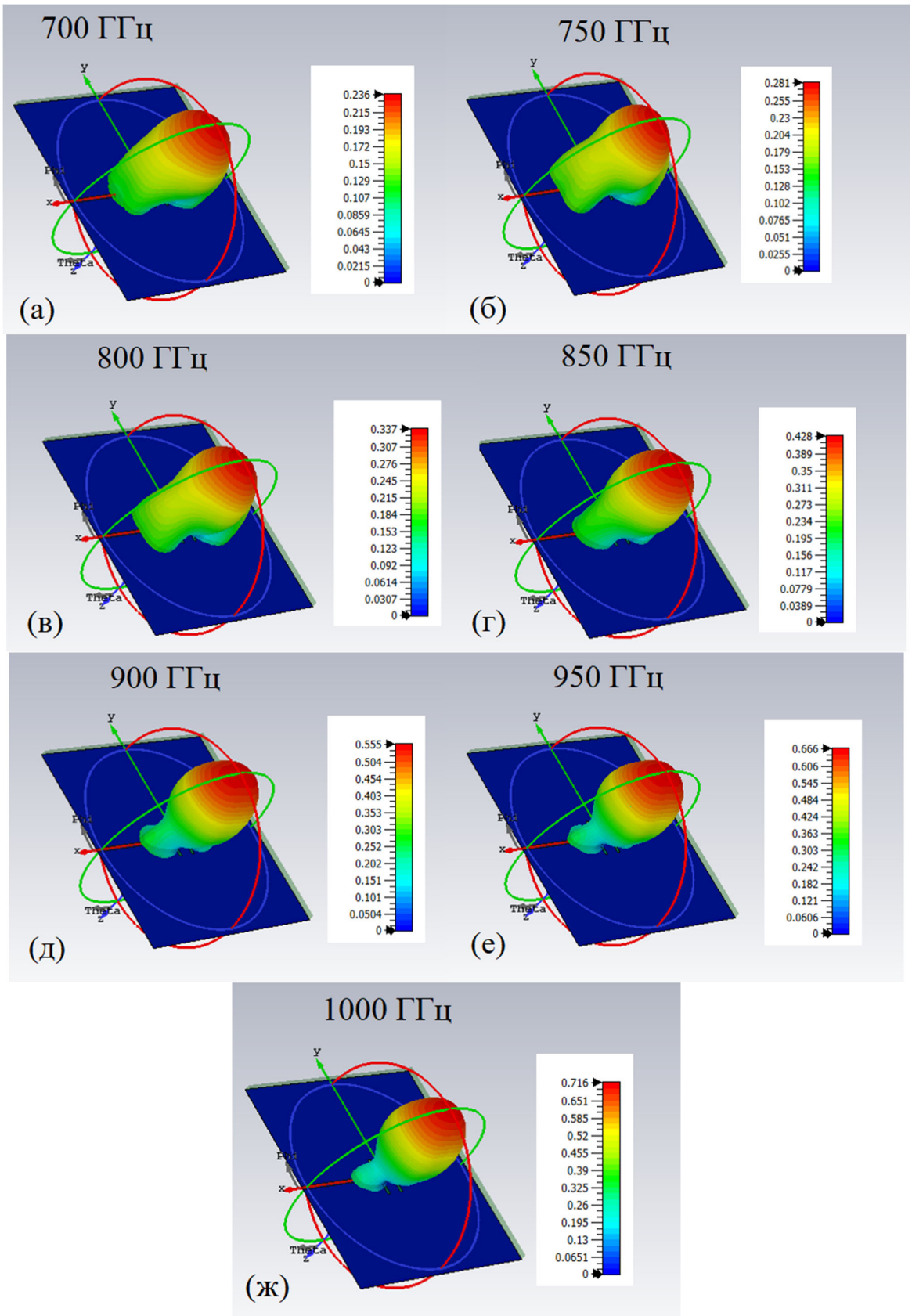
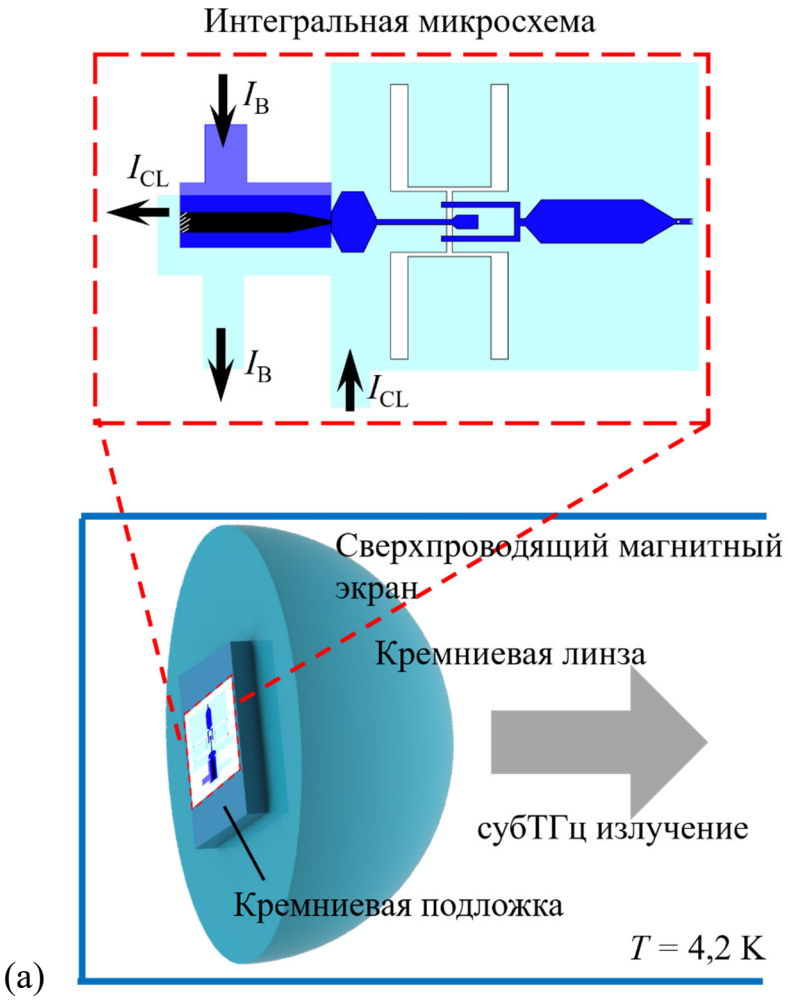


Рисунок 3.15 – Трехмерная визуализация диаграммы направленности дизайна **A-850** на частотах (а) 700 ГГц, (б) 750 ГГц, (в) 800 ГГц, (г) 850 ГГц, (д) 900 ГГц, (е) 950 ГГц и (ж) 1000 ГГц в виде скриншотов из программы численного моделирования. Цветовой палитрой обозначен уровень излучаемой мощности в относительных единицах.

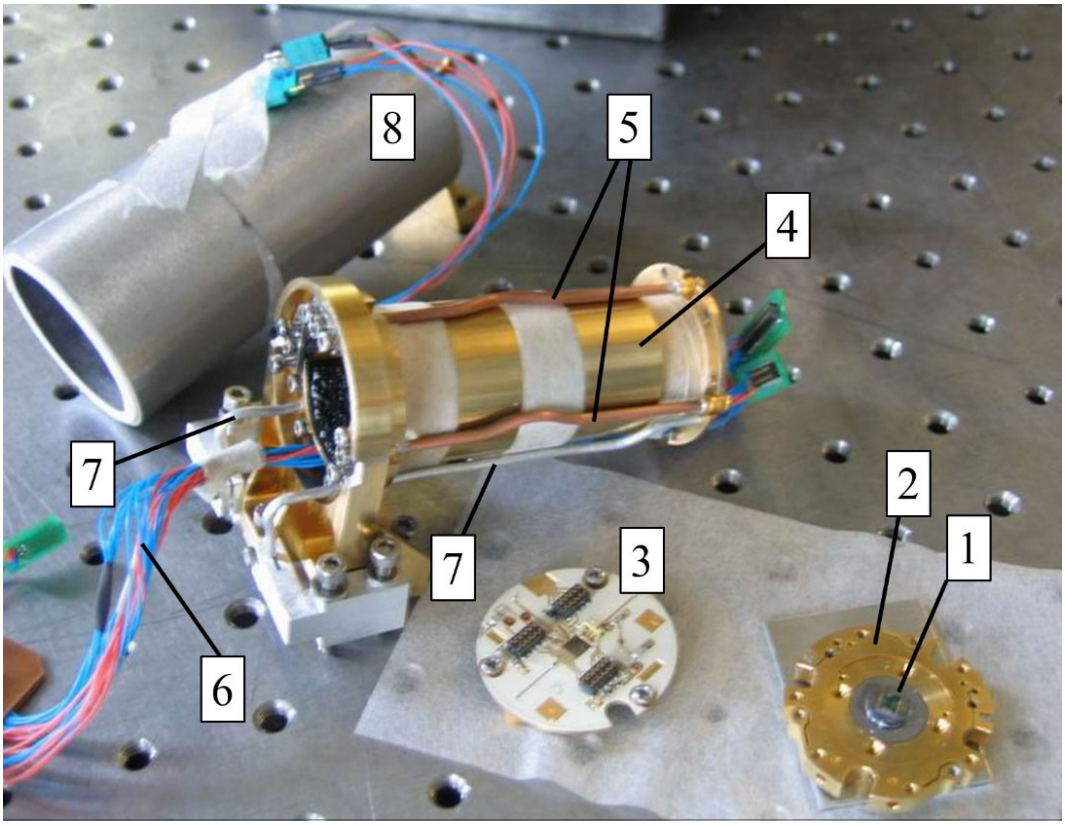
3.2.5. Криогенный модуль генератора

Схема конструкции криогенного модуля генератора на основе РДП с излучением сигнала в открытое пространство и его фотографии показаны на рисунке 3.16. Интегральная микросхема размером 4×4×0,5 мм размещается на задней плоской поверхности собирающей полуэллиптической линзы из кремния так, чтобы антенна попадала в фокус линзы. Чип приклеивается к линзе при помощи цианоакрилатного клея, стойкого к большому количеству термоциклирований между 4 К и 300 К. Материал подложки микросхемы и линзы выбран одинаковым – кремний с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 11{,}7$, для минимизации отражений и преломления луча внутри конструкции системы. Размеры криогенного модуля в собранном виде составляют примерно 120×45×60 мм, а масса – около 0,4 кг.



(а)

(б)



(в)



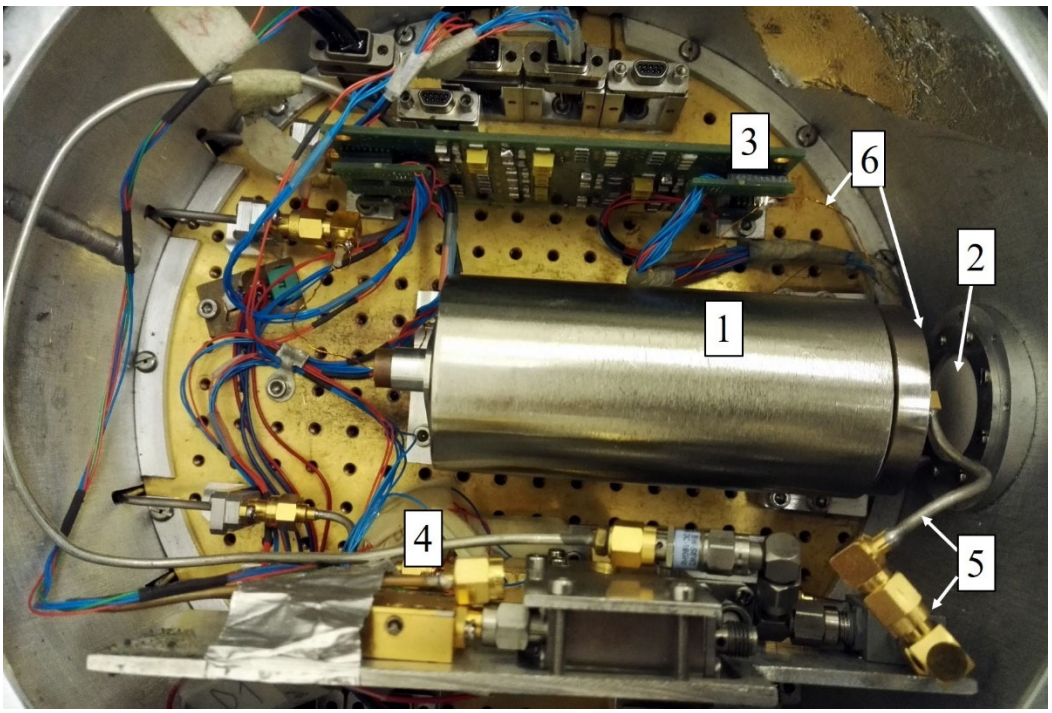
(г) 

Рисунок 3.16 – **(а)** Схема криогенного модуля субТГц источника на основе РДП с излучением в открытое пространство. **(б)** Фотография криогенного модуля в разобранном виде: 1 – микросхема, установленная на линзу; 2 – держатель линзы; 3 – плата управления; 4 – держатель элемента с поз. №2 в форме полой трубки для вывода субТГц/ТГц излучения; 5 – СВЧ кабели; 6 – провода управления по постоянному току; 7 – два алюминиевых хладопровода; 8 – магнитный экран. **(в)** Фотография криогенного модуля в собранном виде. **(г)** Фотография криогенного модуля, установленного на охлаждаемой плите криостата: 1 – криогенный модуль в сборе; 2 – выходное окно криостата; 3 – плата низкочастотных фильтров; 4 – коаксиальный кабель ввода сигнала 19-21 ГГц от синтезатора СВЧ; 5 – выходной СВЧ тракт гармонического смесителя на промежуточной частоте (кабель, направленный ответвитель, каскад усилителей); 6 – СВЧ кабель обратной связи с РДП от системы ФАПЧ.

Для охлаждения линзы с микросхемой используется набор алюминиевых держателей, форма которых обеспечивает приёмный квазиоптический тракт, а также два параллельных хладопровода из проволоки чистого алюминия, крепящихся к охлаждаемой плите криостата. Задание и измерение постоянного тока и напряжения элементов микросхемы происходит через плату управления; образец соединен с платой при помощи алюминиевых проволочек диаметром 25 мкм, установленных методом ультразвуковой

сварки. Плата также содержит элементы СВЧ тракта для цепи обратной связи с РДП.

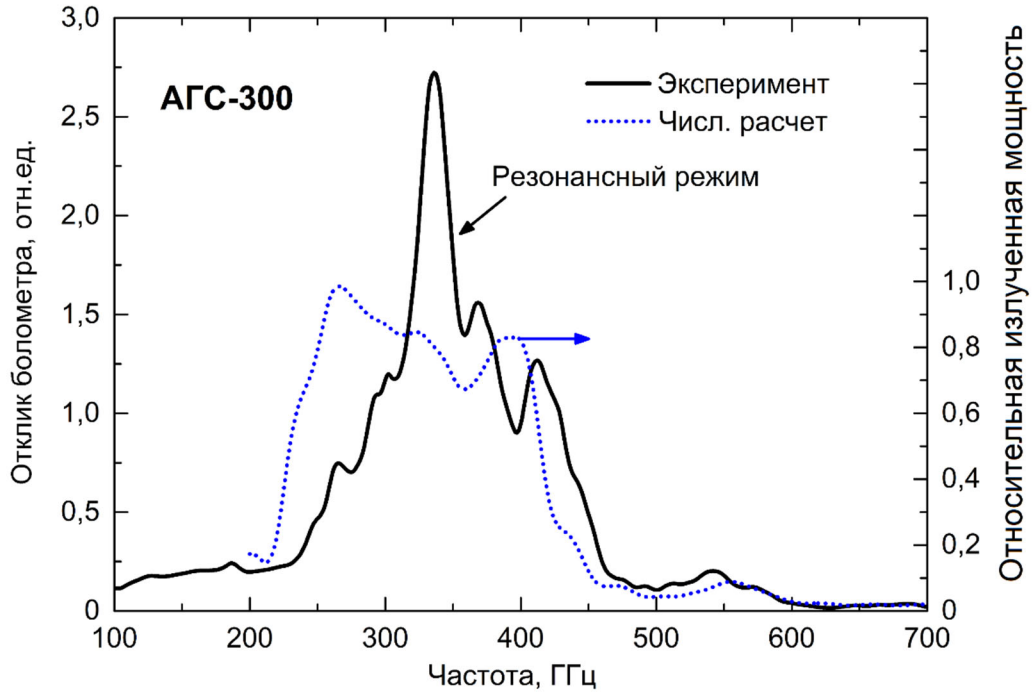
Поскольку РДП крайне чувствителен к магнитному полю, необходимо его экранирование от внешних электромагнитных наводок. Поэтому сборочный модуль с микросхемой генератора помещается внутрь экрана, представляющего собой два концентрических цилиндра, которые обеспечивают экранизацию от магнитного поля. Внешний цилиндр изготовлен из криопермаллоя, внутренний – из меди, покрытой слоем гальванически осажденного свинца толщиной 100 мкм, переходящего в сверхпроводящее состояние. Криогенный модуль генератора в собранном виде размещается на охлаждаемую плиту заливного криостата (см. рис. 3.16 г) либо криостата замкнутого цикла с рабочей температурой ~4,2 К.

3.3. Экспериментальные исследования излучения в широкой полосе при помощи высокочувствительного охлаждаемого ИК болометра

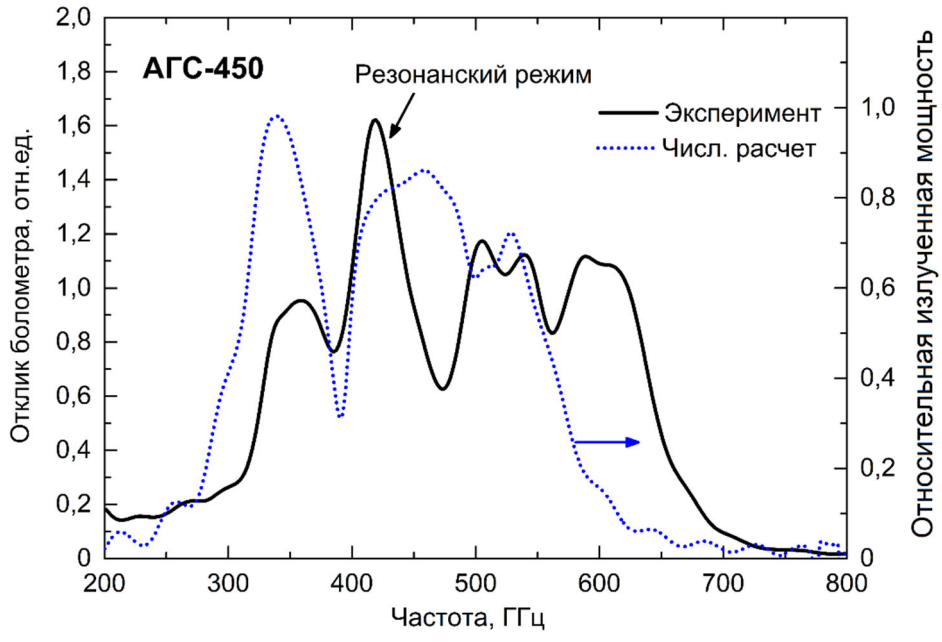
Схема экспериментальной установки для исследования излучения в открытое пространство источника на основе РДП при помощи широкополосного болометра представлена и описана в Главе 2 – см. рисунок 2.5 а. Поскольку частота джозефсоновского генератора известна с достаточно хорошей точностью (точность измерения напряжения ±1 мкВ соответствует точности определения частоты ±0,5 ГГц), прямые измерения мощности излучения генератора в режиме перестройки частоты при помощи высокочувствительного детектора фактически являются измерением АЧХ системы с учетом известной частоты в каждой рабочей точке. С установленным ИК фильтром на входе детектора максимальный диапазон исследования составляет 150-1050 ГГц, а фактический диапазон исследования определяется диапазоном перестройки частоты РДП.

Экспериментальные результаты исследования АЧХ различных дизайнов генератора представлены на рисунке 3.17, на всех графиках для сравнения

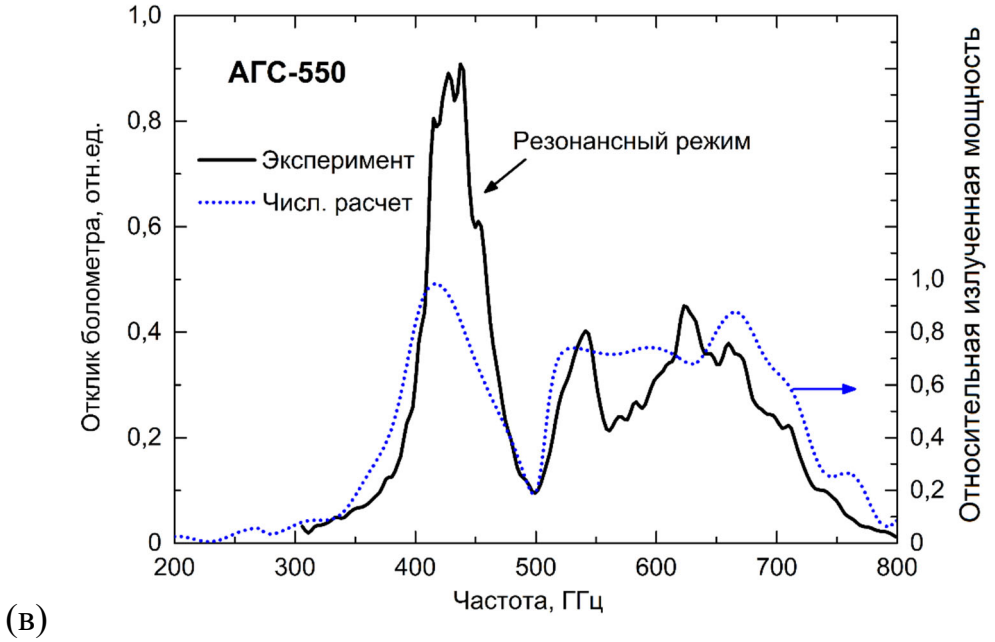
показаны численные расчеты (из разделов 3.2.2, 3.2.3). Несмотря на наличие гармонического смесителя в составе исследованных конструкций, в данном эксперименте с широкой перестройкой частоты генератора ГС не используется. РДП и ГС в представленных результатах были изготовлены на основе туннельных структур Nb/AlO_x/Nb для дизайнов **АГС-300**, **АГС-450** и **АГС-550**, и из структур Nb/AlN/NbN для дизайна **ДА-450**.



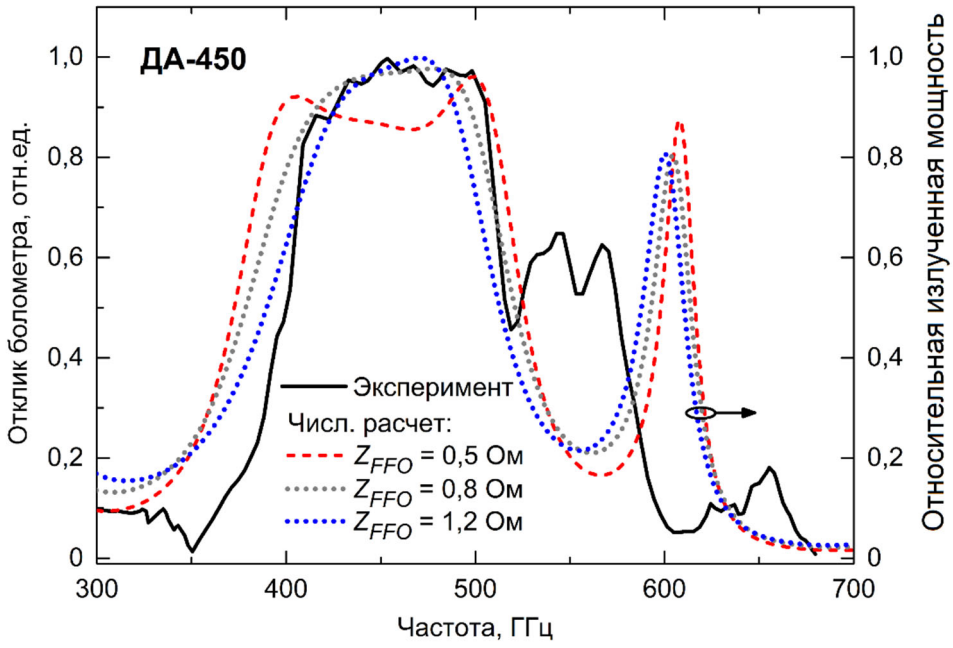
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 3.17 – Экспериментальные результаты исследования АЧХ излучения в открытое пространство при помощи широкополосного болометра различных дизайнов источника на основе РДП (схема установки приведена на рис.2.5 а): (а) дизайна **АГС-300**; (б) дизайна **АГС-450**; (в) дизайна **АГС-550**; (г) дизайна **ДА-450**.

Из рисунка 3.17 видно, что для некоторых дизайнов удалось добиться практически идеального совпадения экспериментальных АЧХ с результатами расчёта по полосе рабочих частот (напр., для дизайна **АГС-550**), в то время как для других дизайнов наблюдается отклонение по частотной полосе на

~20-50 ГГц (напр., для дизайнов **АГС-300**, **АГС-450**). Расхождение экспериментальных и численных результатов объясняется большим числом факторов. Приведем несколько ключевых факторов, влияющих как на результаты численного моделирования, так и на измеряемую АЧХ системы описанным методом.

Во-первых, в расчетной модели мощность РДП полагалась одинаковой во всей частотной полосе (РДП в программе задавался как излучающий порт 3D-структуры), в то время как на практике выходная мощность РДП зависит от частоты за счет наличия резонансного режима и поглощения, которое растёт вместе с частотой (см. ВАХ РДП на рис. 3.2). Так, например, во всех случаях на рис. 3.17 видно, что «левый пик» АЧХ (при более низкой частоте) мощнее, чем «правый пик» (при более высокой частоте), – это легко объясняется тем, что в резонансном режиме, который реализуется ниже 430 ГГц для Nb/AlO_x/Nb и ниже 580 ГГц для Nb/AlN/NbN, мощность генерации выше, чем в режиме вязкого течения вихрей. **Во-вторых**, в расчетной модели было заложено значение импеданса РДП 0,5 Ом, не зависящее от частоты, при этом заложенное значение влияет на результаты моделирования. Так, на рис.3.17 г в качестве демонстрации приведены результаты расчётов при трёх выбранных значениях импеданса РДП – 0,5, 0,8 и 1,2 Ом; наиболее близкие экспериментальные и расчетные результаты для данного образца соответствуют импедансу 0,8 Ом. Если учесть, что точное значение импеданса РДП неизвестно, а также то, что оно зависит как от материалов РДП, так и от рабочей частоты, то становится понятно, что неизвестный импеданс является значительным фактором расхождения экспериментальных и численных результатов. **В-третьих**, при изготовлении экспериментальных образцов по спроектированному дизайну имеются технологические отклонения размеров. Так, например, при целевой площади СИС переходов 1,4 мкм^2 фактическая площадь может отклониться на ±0,15 мкм^2; при целевой ширине полоски микрополосковой линии передачи 4 мкм фактическое значение может отклониться на ±0,5 мкм. Кроме того,

элементы из разных слоёв многослойной структуры могут быть изготовлены со сдвигами (отклонениями) до 1 мкм относительно друг друга в сравнении с «проектными» расстояниями по чертежу дизайна; каждое из таких отклонений может давать разный вклад как по сдвигу частоты АЧХ, так и по величие мощности.

Следующие два фактора относятся к особенностям измерительной схемы. **В-четвертых**, болометр не обладает частотной селекцией внутри рабочей полосы, т.е. интегрирует общую поглощенную мощность спектра, в то время как наличие гармоник РДП может приводить может приводить к накачке болометра на более высокой частоте; на измеряемой же АХЧ мощность выходного сигнала детектора регистрируется на основной частоте генератора. **В-пятых**, болометр сам по себе может обладать неравномерной АЧХ в области границ рабочего диапазона. Нижняя рабочая частота болометра специфицирована на 150 ГГц (длина волны 2 мм), при этом, как известно, падение чувствительности на границах рабочей полосы происходит «постепенно» (не скачкообразно). Следовательно, на частотах ниже 200 ГГц чувствительность детектора может быть заметно ниже, чем на частотах 300 и выше, что также влияет на величину отклика и результат исследуемой АЧХ.

Таким образом, приведены пять причин, которые могут проявляться как по отдельности, как и совместно. Тем не менее, для столь сложной интегральной конструкции источника с использованием сверхпроводящих материалов, с учетом распределенной электродинамической многопараметрической системы с большим числом неизвестных параметров, многие из которых зависят от частоты, – уровень соответствия численных расчетов и экспериментальных результатов можно считать достаточно высоким.

3.4. Спектральные исследования излучения с высоким спектральным разрешением

В данном разделе приведены результаты спектральных исследований излучения разработанного источника на основе РДП двумя независимыми способами, которые могут проводиться как независимо, так и совместно (одновременно). Первый способ подразумевает использование СВЧ цепи обратной связи с генератором при помощи гармонического смесителя и системы ФАПЧ, без квазиоптического вывода излучения в открытое пространство. Во втором способе измеряется непосредственно спектральная линия излучения РДП в открытом пространстве при помощи субТГц спектрометра на основе СИП.

3.4.1. Исследование спектральной линии генерации с использованием частотной и фазовой стабилизации

Частотная и фазовая стабилизация генератора осуществляется при помощи гармонического СИС смесителя, который принимает часть мощности РДП и направляет его в цепь обратной связи с генератором – см. рисунок 3.3б (концепция) и рисунок 2.8 (экспериментальная установка). Доля мощности, поглощенная ГС, была численно рассчитана при проектировании дизайнов (см. рис. 3.12), а экспериментальные результаты представлены на рисунках 3.18 и рисунке 3.19. Так, рисунок 3.18 демонстрирует характерную форму ВАХ гармонического смесителя под действием сигнала накачки РДП; данные представлены для дизайна **АГС-300** и частоты накачки 340 ГГц. На рисунке 3.19 показаны результаты исследования диапазона накачки ГС сигналом РДП в зависимости от частоты для всех разработанных дизайнов генератора – **АГС-300**, **АГС-450**, **АГС-550**, а также **ДАГС-450** в двух вариациях.

Для работы систем ЧД и ФАПЧ достаточным уровнем накачки ГС является отношение квазичастичного тока накачки к щелевому скачку тока

$I_p / I_g \sim 5\text{-}10\%$, где ток накачки I_p (индекс p от англ. *pumpimg* – «накачка») определяется на первой подщелевой квазичастичной ступени при некотором значении напряжения. Как правило, для СИС переходов Nb/AlO_x/Nb удобно использовать значение напряжения 2,5 мВ для определения тока I_p, а для СИС переходов Nb/AlN/NbN – 3,0 мВ, однако оптимальное значение для мониторинга тока накачки следует определять из формы ВАХ конкретного экспериментального образца. Так, в представленном случае на рисунке 3.18 уровень накачки ГС составляет порядка 10%, 20% и 35% для трёх представленных кривых с различной мощностью накачки.

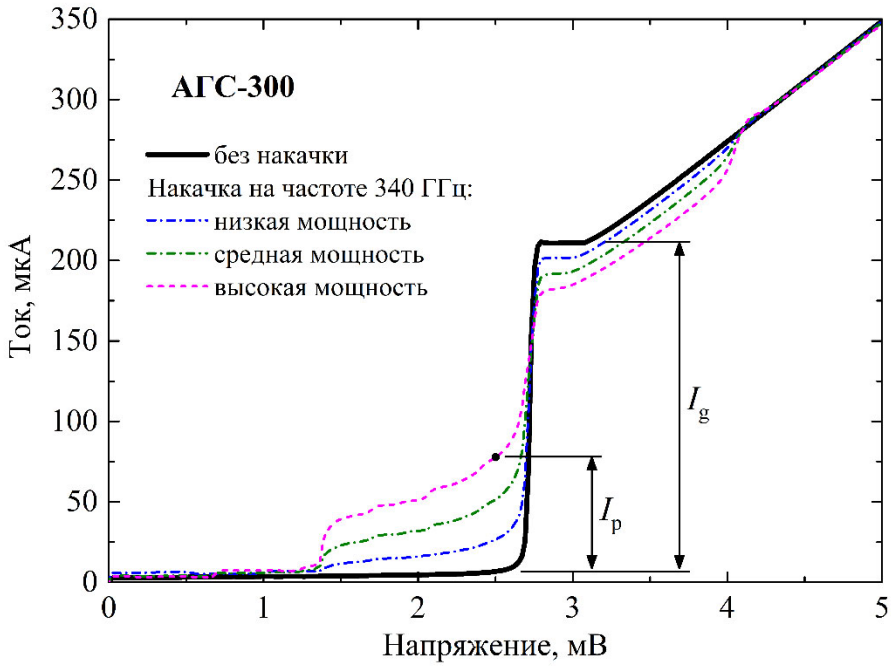
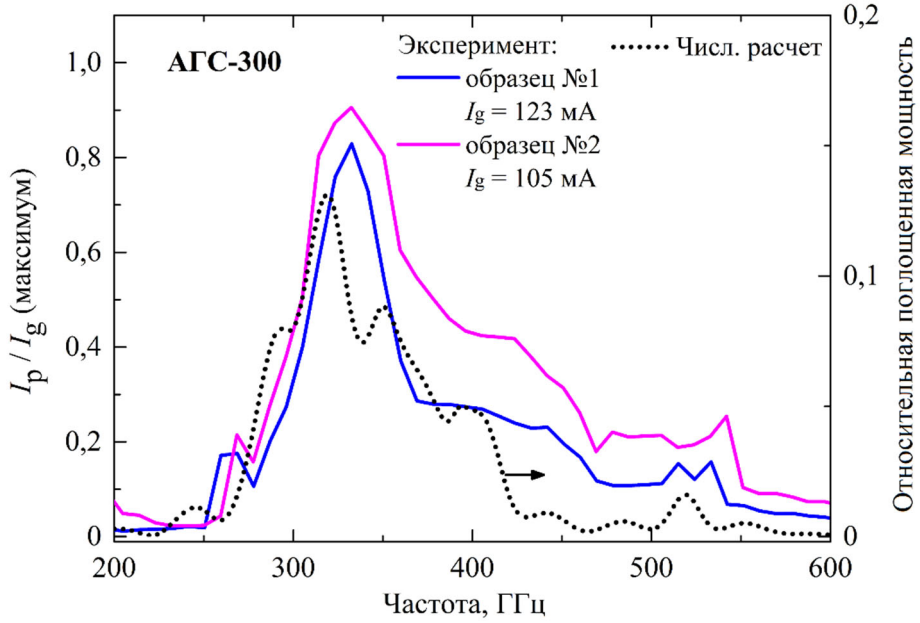
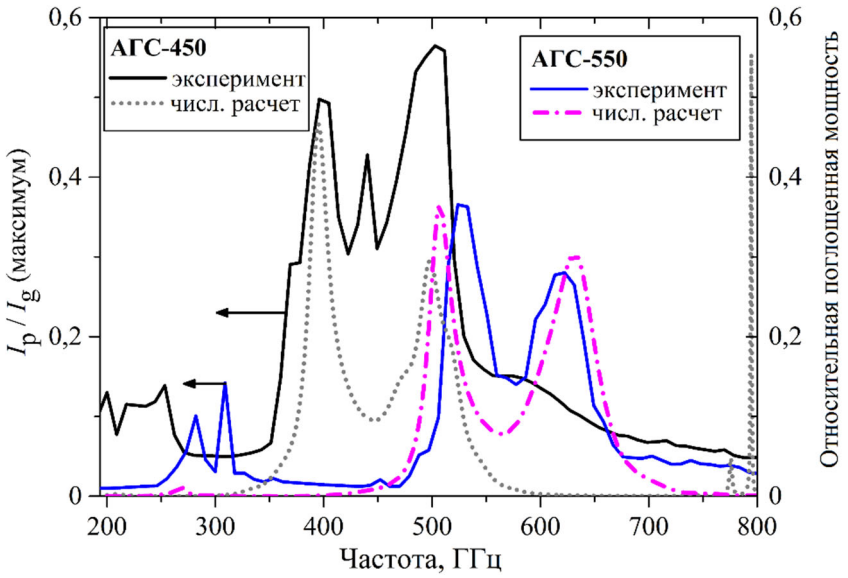


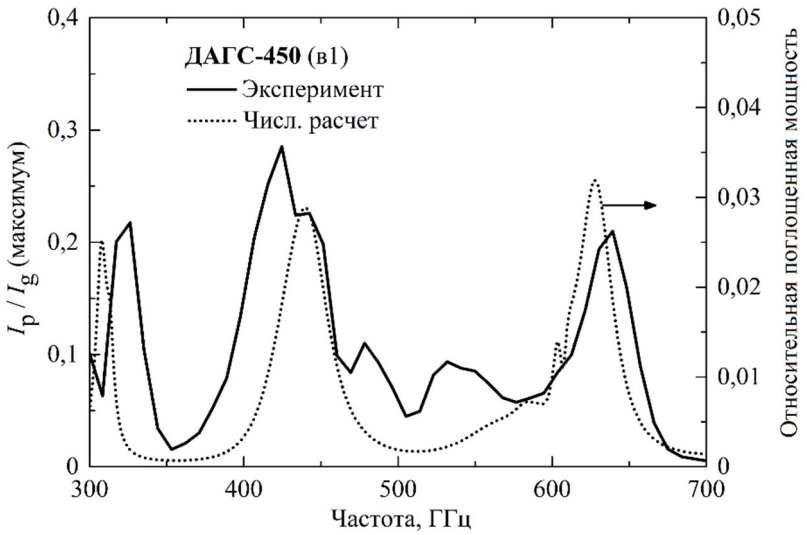
Рисунок 3.18 – Серия ВАХ гармонического СИС смесителя площадью ~1,4 мкм^2 на основе Nb/AlO_x/Nb экспериментального образца дизайна **АГС-300**: сплошная кривая (черная) – без воздействия внешнего сигнала, штрихпунктирные кривые (в цвете) – с накачкой сигналом РДП различного уровня мощности на частоте 340 ГГц. Показан щелевой скачок тока I_g и ток накачки первой подщелевой квазичастичной ступени I_p при напряжении 2,5 мВ для розовой кривой накачки.


АГС-300
Эксперимент:
образец №1
I_g = 123 мА
образец №2
I_g = 105 мА
Числ. расчет
I_p / I_g (максимум)
Относительная поглощенная мощность
Частота, ГГц

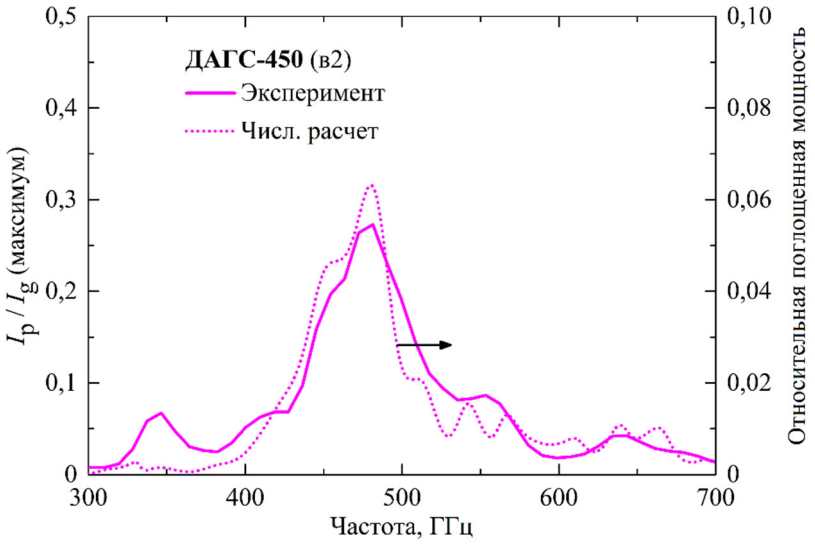
(а)


АГС-450
эксперимент
числ. расчет
АГС-550
эксперимент
числ. расчет
I_p / I_g (максимум)
Относительная поглощенная мощность
Частота, ГГц

(б)


ДАГС-450 (в1)
Эксперимент
Числ. расчет
I_p / I_g (максимум)
Относительная поглощенная мощность
Частота, ГГц

(в)



(г)

Рисунок 3.19 – Экспериментальные результаты максимальной накачки ГС в сравнении с результатами численного моделирования для различных дизайнов: (а) **АГС-300**; (б) **АГС-450** и **АГС-550**; (г) **ДАГС-450** в вариации №1; (д) **ДАГС-450** в вариации №2. Кривые для численных расчетов поглощения ГС повторяют соответствующие кривые из рисунка 3.12 раздела с описание дизайнов.

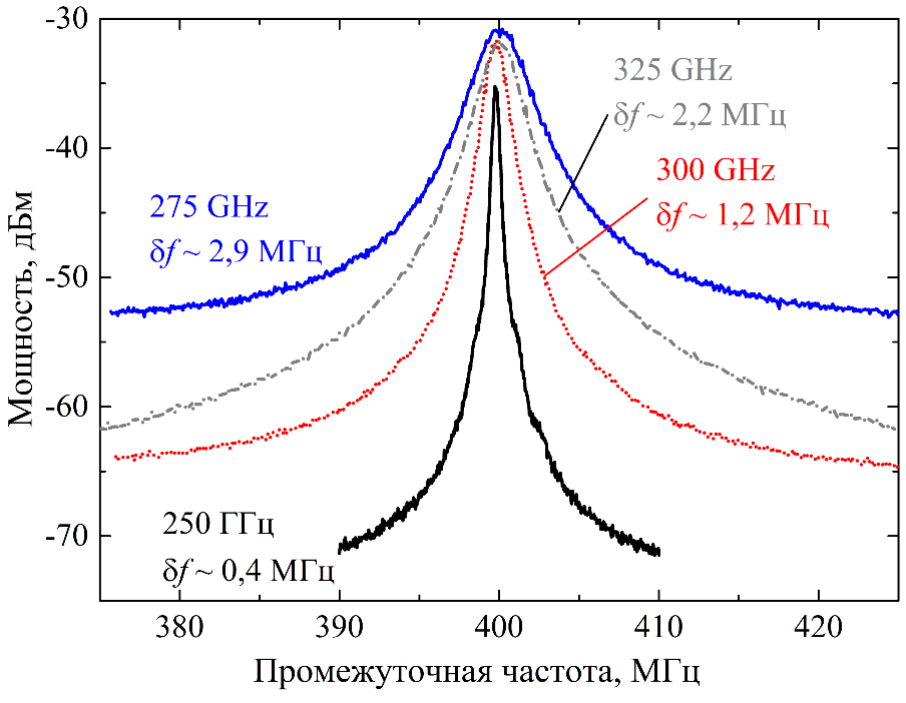
Из рисунка 3.19 видна достаточно высокая степень соответствия экспериментальных и численных результатов. Здесь следует также отметить несколько причин некоторого их расхождения, отчасти полностью аналогичных причинам расхождения результатов для АЧХ мощности излучения в открытое пространство. **Во-первых**, мощность РДП в расчетах полагалась не зависящей от частоты; **во-вторых**, из-за технологических отклонений площади СИС переходов и их сопротивления могут отличаться в пределах 20%, а их точное расположение на микросхеме могут варьироваться на ±1 мкм; **в-третьих**, измеряемый ток накачки соответствует мощности поглощения на всех частотах, в том числе на второй гармонике РДП (накачка ГС на второй гармонике отчётливо видна на рис. 3.19 б на синей кривой в области 300 ГГц), в то время как в численных расчетах поглощенная мощность учитывается только на основной частоте излучающего порта. Так, например, эффект технологических отклонений продемонстрирован на рис. 3.19 а для двух экспериментальных образцов одного дизайна **АГС-300**, изготовленных на одной подложке; различие щелевого тока на величину порядка ~15% (105 и

123 мА) обусловлены именно различием фактической площади СИС переходов, потому как плотность туннельного тока j_g считается практически одинаковой для всей туннельной структуры на подложке (градиент плотности тока составляет не более нескольких процентов). Важно также отметить, что, несмотря на прямую зависимость величины квазичастичной ступени накачки от мощности внешнего сигнала, непосредственное сравнение тока накачки (в эксперименте) и доли поглощенной мощности (в расчете) не полностью корректно, поскольку их зависимость сильно нелинейна [67]. Именно поэтому на всех графиках рисунка 3.19 приведены две оси ординат для расчетов и эксперимента, а их масштаб выбран по высоте «пиков» для удобства сравнения.

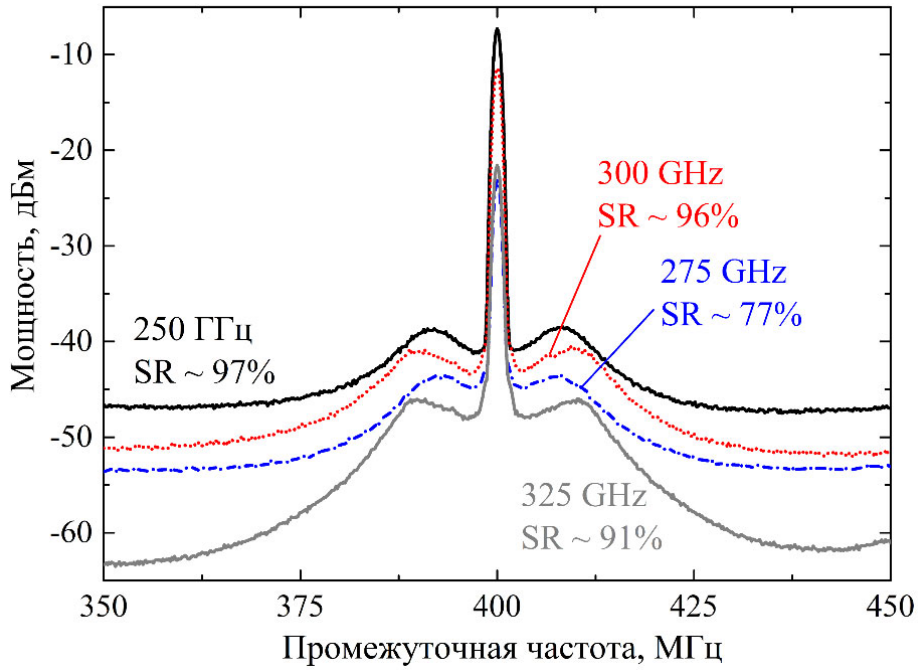
Фактически, диапазон накачки гармонического смесителя для каждого дизайна определяет полосу, в которой сигнал РДП может быть успешно стабилизован по частоте (системой ЧД) или синхронизирован по фазе (системой ФАПЧ). В ряде случаев эффективность преобразования смесителя настолько велика, что даже слабая накачка на уровне $I_p/I_g \sim$ 1-2% оказывается достаточной для работы систем стабилизации (ЧД и ФАПЧ), что существенно расширяет частотный диапазон исследования спектральных характеристик и практических применений генератора.

На рисунках 3.20, 3.21 приведены спектральные линии генерации РДП на основе $Nb/AlO_x/Nb$ на некоторой выборке рабочих частот для двух дизайнов источника: **АГС-300** при частотах в области нижней границы рабочего диапазона (от 250 до 325 ГГц с шагом 25 ГГц), и **АГС-450** в широком диапазоне на наборе частот от 300 до 700 ГГц через каждые 100 ГГц, а также 750 ГГц и 760 ГГц – в области верхней границы рабочего диапазона. Во всех случаях на рабочей частоте представлены два спектра – автономный, который регистрируется в режиме частотной стабилизации при помощи частотного детектора, и в режиме фазовой синхронизации к опорному сигналу на частоте 400 МГц при помощи системы ФАПЧ. Измерение спектральных характеристик производится на промежуточной частоте ГС в диапазоне

0-800 МГц, который определяется АЧХ используемых усилителей в тракте ПЧ. Спектр сигнала в автономном режиме с высокой степенью точности имеет лоренцеву форму [58,118,119]. В режиме ФАПЧ форма сигнала представляет собой практически δ-функцию с шириной меньше максимального спектрального разрешения используемого анализатора (1 Гц) [119,123], поэтому для характеризации такой линии пользуются понятием спектрального качества (в подписи на графиках – *SR*, от ***S**pectral **R**atio*), которое определяется как доля мощности, сосредоточенной в δ-пике синхронизированного по фазе сигнала. Чем более узкая автономная линия генерации, тем выше спектральное качество. Так, для ширины линии генератора $\delta f \approx 0{,}4$ МГц величина SR составила около 97%, а для $\delta f \approx 2{,}9$ МГц – около 77%.

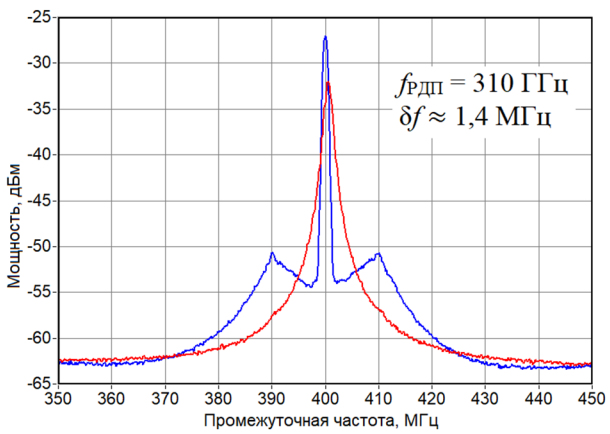


(а)

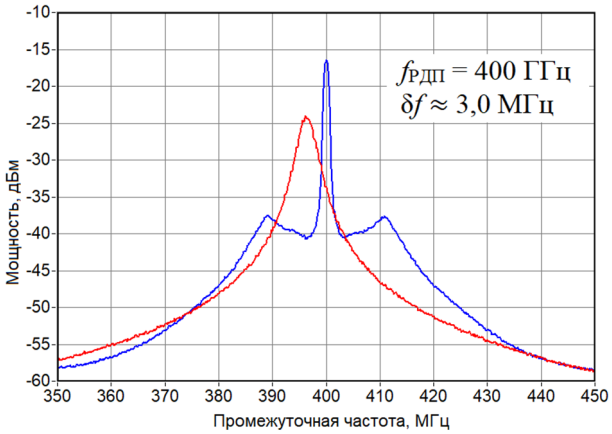


(б)

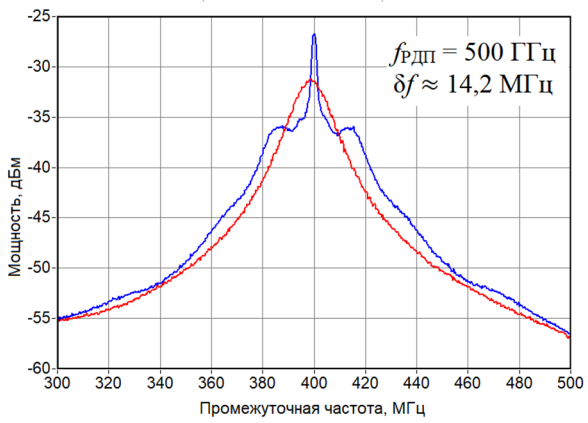
Рисунок 3.20 – Спектры излучения источника дизайна **АГС-300**, зарегистрированные при помощи анализатора спектра (см. схему установки на рис. 2.8) : (а) в автономном режиме генерации; (б) в режиме ФАПЧ. Рабочая частота излучения $f_{РДП}$, а также ширина линии δf для (а) и спектральное качество SR для (б) обозначены на графиках для каждой спектральной линии.



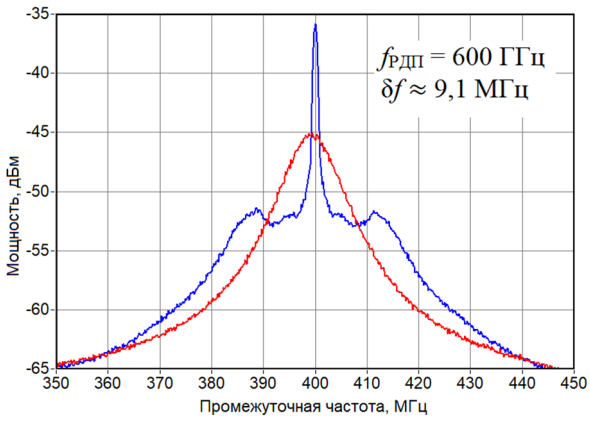
(а)



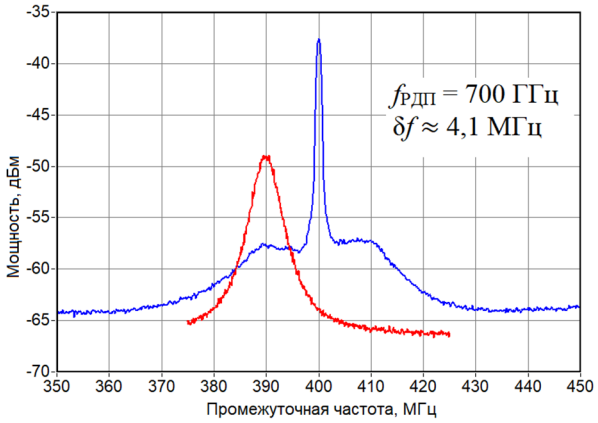
(б)



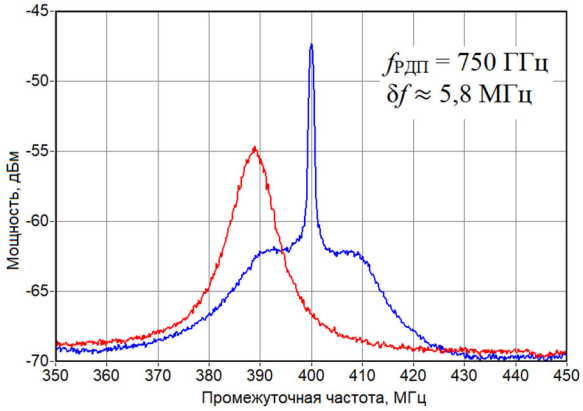
(в)



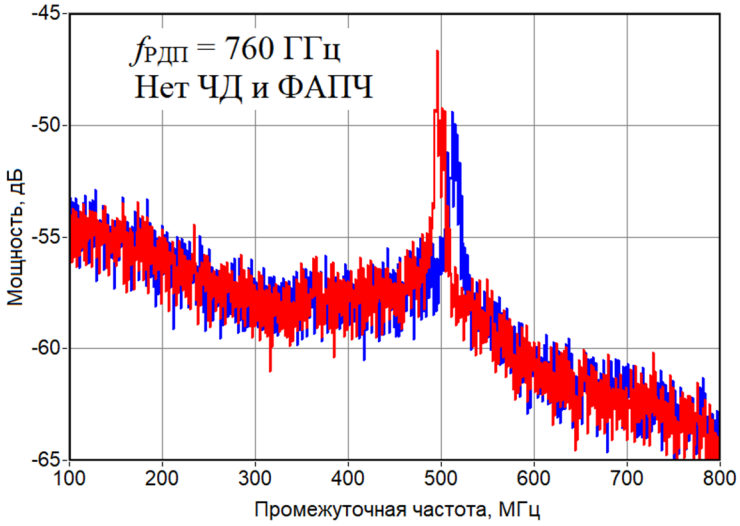
(г)



(д)



(е)



(ж)

Рисунок 3.21 – Спектры излучения источника дизайна **АГС-450** в автономном режиме генерации (красная кривая) и в режиме ФАПЧ (синяя кривая) на различных рабочих частотах: (а) 310 ГГц; (б) 400 ГГц; (в) 500 ГГц; (г) 600 ГГц; (д) 700 ГГц; (е) 750 ГГц. Для случая (ж) 760 ГГц режим ЧД и ФАПЧ не реализовался, обе кривые представлены в автономном режиме без усреднения при считывании (запись кривой в случайный момент времени). Рабочая частота излучения $f_{РДП}$ и ширина линии δf (кроме случая (ж)) обозначены на графиках для каждой спектральной линии.

Из рисунка 3.21 видно, что фактическая рабочая частота ЧД, на которой происходит стабилизация сигнала в тракте ПЧ, не является постоянной и может отклоняться от целевого значения 400 МГц на величину до 10 МГц – напр., на рис.3.21 (д) и (е) частотная синхронизация произведена на частоте 390 МГц. Эта частота обусловлена многими факторами, основные из которых – резонансная частота встроенного в систему *LC*-резонатора и мощность анализируемого сигнала. Характерное отношение мощностей сигнал/шум в тракте ПЧ гармонического смесителя составляет от ~30 дБ (напр., рис. 3.21 а) до ~ 15 дБ (напр., рис. 3.21 д,е). При совместной работе систем ЧД и ФАПЧ, последняя из которых использует опорный сигнал строго заданной частоты 400 МГц, в условиях отклонения частоты ЧД от 400 МГц, фазовая синхронизация происходит только для той части спектра, которая попадает в окрестность 400 МГц с шириной рабочей полосы ФАПЧ ~15-20 МГц.

Также из представленного на рис. 3.21 набора спектральных линий виден заметный рост ширины линии δf начиная с частоты 500 ГГц (при данной выборке): данный рост δf обусловлен переходом от резонансного режима (ступени Фиске) к режиму вязкого потока вихрей при напряжении $V_g/3$, для структур $Nb/AlO_x/Nb$ он происходит на частотах в окрестности 450 ГГц (см. рисунок 3.2 б). Следует отметить, что на частотах выше 700 ГГц линия генерации по-прежнему достаточно узкая (~4-5 МГц) для работы системы ФАПЧ, но мощность сигнала резко падает при превышении щелевой частоты ниобия (см. раздел 1.3.5). Предельная возможная частота для синхронизации для данного экспериментального образца составила 750 ГГц (рис. 3.21 е), в то время как на частоте 760 ГГц частотная и фазовая синхронизация оказалась невозможной из-за слабого сигнала (рис. 3.21 ж без стабилизации; отношение мощности сигнал/шум около 10 дБ).

Для демонстрации непрерывной перестройки частоты сигнала РДП с возможностью частотной и фазовой стабилизации проведен цикл работ по регистрации спектров на большой выборке частот: пример такой выборки для

экспериментальных образцов дизайна **АГС-300** и **АГС-450** представлен в Таблице 3.1.

Таблица 3.1. Результаты исследований спектральной линии излучения РДП на основе $Nb/AlO_x/Nb$ в составе экспериментального образца дизайнов **АГС-300** и **АГС-450** на большой выборке рабочих частот в широком диапазоне. Цветом выделены ячейки, соответствующие частотам за пределами рабочего диапазона дизайна (низкий уровень мощности для анализа).

Рабочая частота $f_{РДП}$, ГГц	**Наименьшая ширина линии δf при данной частоте, МГц**	**Отношение мощностей сигнал/шум, дБ**	**Спектральное качество (SR) в режиме ФАПЧ, %**
Образец дизайна **АГС-300**			
250	0,4	> 36	97
275	2,9	> 28	77
300	1,2	> 38	96
325	2,2	> 40	91
350	1,1	> 35	94
375	2,4	> 40	89
400	2,5	> 36	89
420	2,9	> 32	85
440	1,5	> 38	94
460	11	> 28	33
480	22	> 25	< 10
500	13	> 25	21
520	10,9	> 25	29
540	9,6	> 20	26
560	10	> 15	17

Рабочая частота $f_{РДП}$, ГГц	**Наименьшая ширина линии δf при данной частоте, МГц**	**Отношение мощностей сигнал/шум, дБ**	**Спектральное качество (SR) в режиме ФАПЧ, %**
580	11	> 12	10
600	–	< 10	–
Образец дизайна **АГС-450**			
285	6	> 16	24
310	1,4	> 34	90
330	1,0	> 40	95
350	1,1	> 40	93
370	4,3	> 45	79
390	1,9	> 35	91
400	3,0	> 45	84
420	1,3	> 34	94
440	1,1	> 40	97
460	20	> 28	< 10
480	26	> 25	–
500	14,2	> 34	20
520	11,1	> 30	35
540	12,1	> 25	29
560	10,6	> 25	39
580	10,6	> 24	38
600	9,1	> 25	48
620	7,5	> 24	51
640	7,1	> 22	50

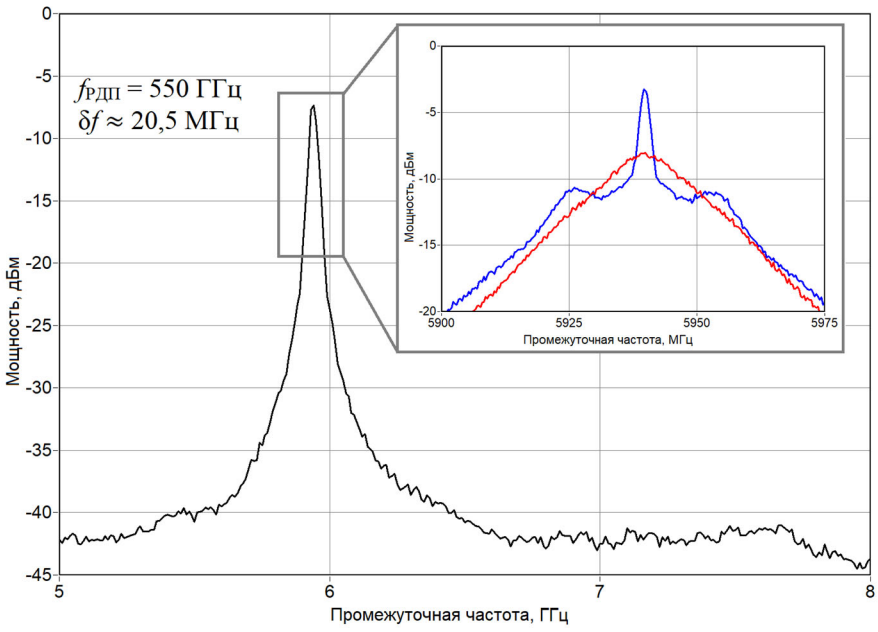
Рабочая частота $f_{РДП}$, ГГц	**Наименьшая ширина линии δf при данной частоте, МГц**	**Отношение мощностей сигнал/шум, дБ**	**Спектральное качество (SR) в режиме ФАПЧ, %**
660	5,5	> 24	66
680	4,9	> 22	64
700	4,1	> 20	67
720	3,6	> 20	61
740	4,3	> 20	53
750	5,8	~ 15	39
760	–	< 10	–

Таким образом, с учетом представленных раннее АЧХ, которые были измерены при помощи прямого болометрического детектора мощности (рис. 3.17), удалось реализовать рабочий диапазон излучения РДП в открытое пространство в диапазоне 250-750 ГГц при помощи нескольких дизайнов интегральной схемы «РДП + антенна + гармонический смеситель». Во всем диапазоне продемонстрирована возможность непрерывной перестройки частоты и стабилизации частоты и фазы сигнала, вплоть до частоты 750 ГГц. Для верификации результатов, а также непосредственного сравнения спектров излучения в открытое пространство, был проведен эксперимент по регистрации спектров сигнала в открытом пространстве при помощи субТГц сверхпроводникового интегрального приемника. Результаты такого исследования представлены в следующем разделе.

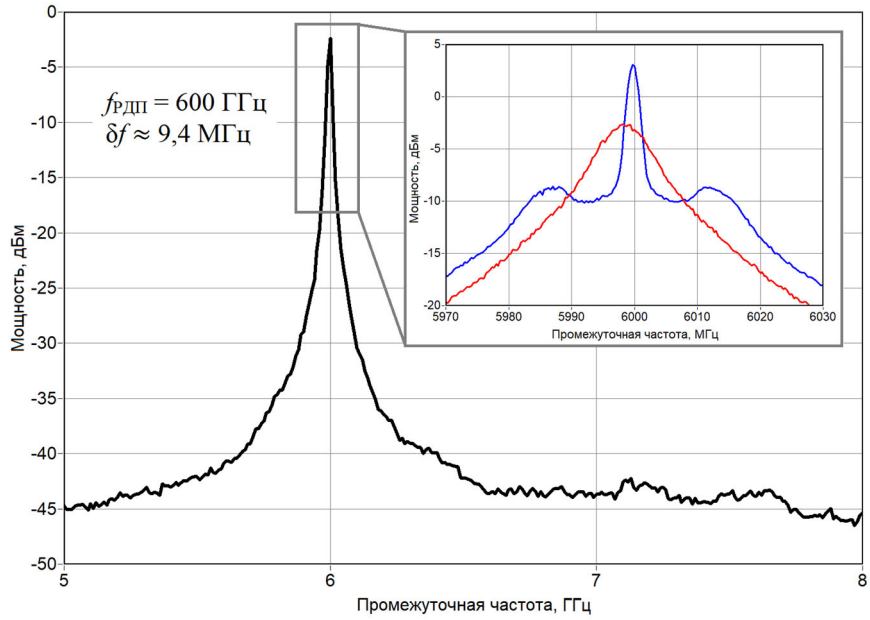
3.4.2. Исследование спектральной линии генерации с использованием внешнего спектрометра субТГц диапазона на основе сверхпроводникового интегрального СИС приемника

Схема экспериментальной установки была представлена на рисунке 2.9 а в соответствующем разделе диссертации. Следует отметить, что

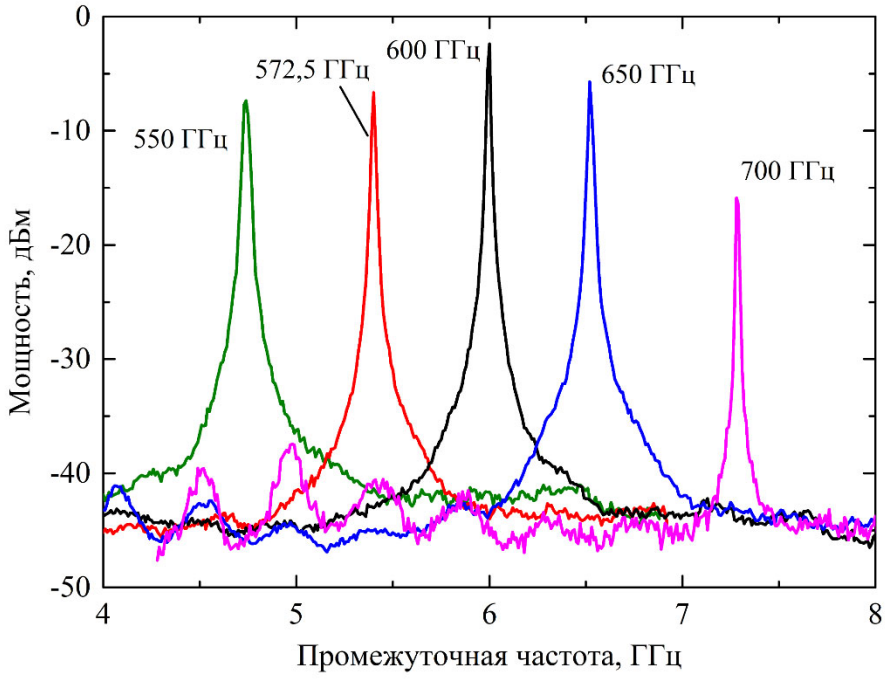
данная установка полностью **включает** в себя установку из предыдущего раздела по регистрации спектров РДП через цепь обратной связи с системами ЧД и ФАПЧ. Форма спектральной линии в данном эксперименте излучения регистрируется двумя независимыми способами: анализатором спектра №1 через цепь обратной связи при помощи ГС и систем ЧД/ФАПЧ на промежуточной частоте в диапазоне 0 – 800 МГц, и анализатором спектра №2 на выходе СИП в диапазоне ПЧ 4 – 8 ГГц. Рабочий диапазон СИП 500-700 ГГц наиболее близок к рабочему диапазону источника дизайна **АГС-550** и пересекается с диапазоном дизайна **АГС-450** лишь частично, в то время как рабочий диапазон дизайна **АГС-300** полностью находится за пределами диапазона СИП (см. АЧХ дизайнов на рис. 3.17). Поэтому исследование при помощи СИП проводилось преимущественно для экспериментальных образцов дизайна **АГС-550**. Пример регистрации спектров РДП для набора частот в широком диапазоне от 550 ГГц до 700 ГГц при помощи СИП представлен на рисунке 3.22. Гетеродин СИП на основе «собственного» *on-chip* РДП стабилизован по фазе при помощи системы ФАПЧ в процессе измерения принимаемого сигнала.



(а)



(б)

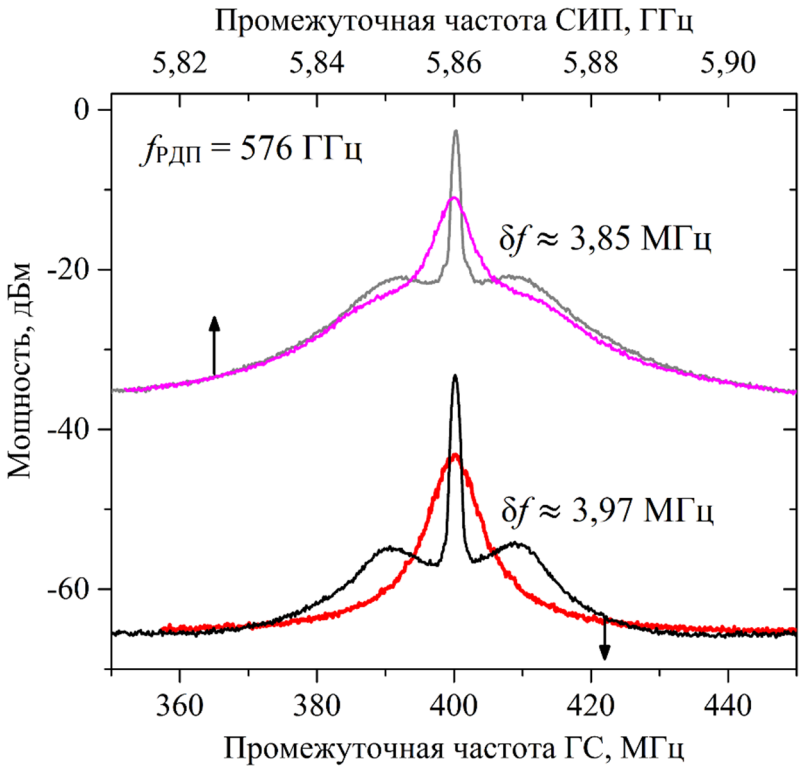


(в)

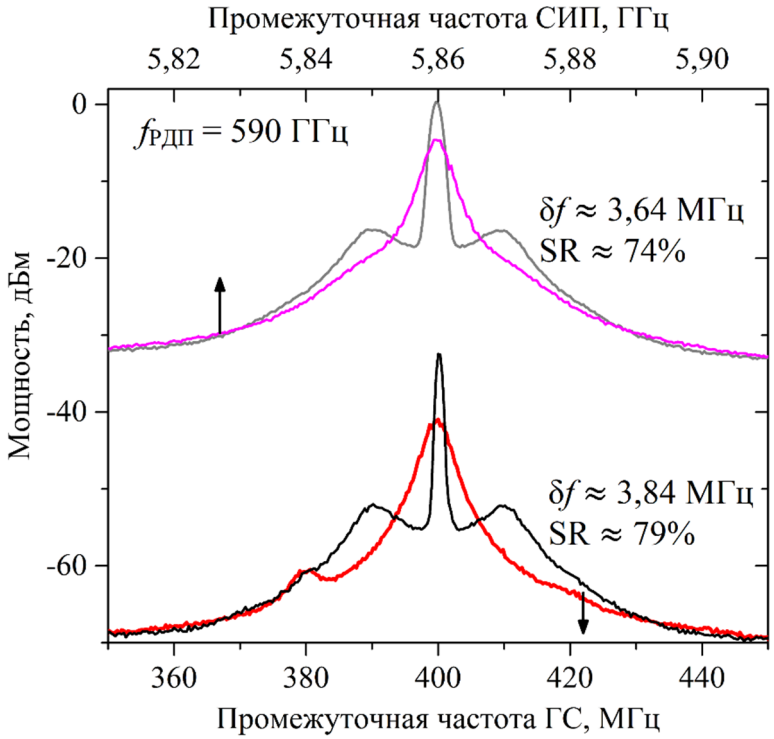
Рисунок 3.22 – Спектры излучения в открытое пространство источника на основе РДП дизайна **АГС-550**, зарегистрированные при помощи СИП на рабочей частоте источника (а) 550 ГГц; (б) 600 ГГц; (в) от 550 ГГц на 700 ГГц на представленной выборке частот. Вставкой на (а), (б) показана форма линии в увеличенном масштабе в автономном режиме (красная кривая) и в режиме работы ФАПЧ (синяя кривая); ширина спектральной линии указана на графиках. На (в) представлены спектры в автономном режиме генерации, ширина линии составляет: 14,7 МГц для 550 ГГц, 13,7 МГц для 572,5 ГГц; 9,4 МГц для 600 ГГц; 12 МГц для 650 ГГц, и 4,3 МГц для 700 ГГц. Гетеродин СИП в процессе измерений стабилизирован по фазе при помощи «собственной» системы ФАПЧ с опорным сигналом 400 МГц.

3.4.3. Сравнение результатов

Интересным представляется сравнение результатов измерения спектральной линии на одной рабочей частоте двумя независимыми методами – через цепь обратной связи с использованием ГС и ЧД (анализатором спектра № 1 на рисунке 2.9 а), и при помощи СИП непосредственно из открытого пространства (анализатором спектра № 2 на рисунке 2.9 а). Пример такого сравнения спектров на едином графике представлен на рисунке 3.23. Различный абсолютный уровень мощности для двух методов обусловлен различным коэффициентом усиления в тракте промежуточных частот для ГС и выходного сигнала СИП, а различные горизонтальные оси спектров обусловлены различными диапазонами ПЧ гармонического смесителя и СИП.



(а)



(б)

Рисунок 3.23 – Спектральные характеристики источника на основе РДП дизайна **АГС-550**, измеренные с помощью *on-chip* ГС и системой ФАПЧ в цепи обратной связи (нижняя пара кривых) и с помощью СИП (верхняя пара кривых), на частотах (а) 576 ГГц; (б) 590 ГГц. На обоих графиках: красная и розовая кривые – спектр генерации в автономном режиме; черная и серая – в режиме фазовой синхронизации. Ширина спектральной линии в автономном режиме указана на графиках. Гетеродин СИП в процессе измерений стабилизирован по фазе при помощи «собственной» системы ФАПЧ с опорным сигналом 400 МГц.

Из рисунка 3.23 видно, что результат измерения ширины спектральной линии генерации двумя различными способами совпадает в пределах погрешности её определения: из-за большого числа усреднений «зашумленной» линии при считывании анализатором спектра значение δf, вычисляемое автоматизированным алгоритмом по уровню ½ от мощности пика (около -3 дБ), может отличаться на несколько десятых долей МГц. В тракте обратной связи (через гармонический смеситель) к собственному шуму генератора добавляется небольшой шум опорного синтезатора, пропорциональный квадрату номера смешиваемой гармоники $\sim n^2$, однако данное уширение мало и также находится в пределах погрешности определения δf [123]. Форма автономной линии генерации при измерении

двумя способами отличается с точностью до свертки (конволюции) собственного спектра исследуемого РДП и спектра гетеродина СИП, близкого к δ-функции, но отличного от неё. Ширина линии стабилизированного сигнала при помощи системы ФАПЧ определяется выбранным разрешением используемого анализатора спектра [119,123], которое на рисунке 3.23 составляет 1 МГц для чёрной кривой (измерение через цепь обратной связи) и 1,8 МГц для серой кривой (измерение при помощи СИП). Реальная ширина линии стабилизированного по фазе сигнала составляет порядка 100 кГц, что является δ-функцией с хорошей степенью точности для большинства практических применений.

Важным результатом проведенного сравнения является подтверждение того, что квазиоптический передающий тракт выходного сигнала генератора не вносит искажений в собственный спектр джозефсоновских осцилляций РДП – например, дополнительных шумов на антенне или артефактов из-за локальных отражений от границ сред. Данный тезис, хоть и являлся ожидаемым, был продемонстрирован экспериментально.

3.5. Оценка выходной мощности излучения генератора

В распоряжении диссертанта отсутствует прямой калиброванный метод измерения мощности излучаемого субТГц сигнала. На практике возможно было бы использовать некоторое усредненное значение вольтватнной чувствительности ИК болометра, использованного при измерении АЧХ источника, однако, во-первых, чувствительность болометра может сильно отличаться для разных частотных диапазонов, что не специфицировано производителем (указано лишь одно, судя по всему, усредненное значение), во-вторых, точно неизвестен процент (доля) мощности, попавшая в приемный тракт болометра, с учетом расходящихся квазиоптических пучков (диаграмм направленности) как генератора, так и детектора. Кроме того, доля мощности, попавшая в приемный тракт болометра, может также быть различной на

разных частотах. В-третьих, в системе считывания сигнала болометра имеются дополнительные каскады АЦП и ЦАП, как в считывающей электронике от производителя, так и при использовании усилителя с синхронным детектором, что затрудняет восстановление точных значений усиления в цепи считывания. Так, использование оценки на основе вольтватнной чувствительности болометра и коэффициента усиления в цепи считывания, при условии, что оба значения точно неизвестны, может привести к ошибке определения мощности в 1-2 порядка.

Для оценки мощности излучения генератора был использован другой метод «калибровки», основанный на определении абсолютного значения мощности $P_{\text{НМ}}$, поглощенной гармоническим смесителем, по величине квазичастичной ступени тока накачки (индекс *НМ* – от ***H**armonic **M**ixer*). Далее, из известного (расчетного) соотношения мощности, поглощенной ГС, и мощности, излученной в открытое пространство, производится калибровка излученной мощности с учетом известной формы АЧХ, измеренной болометром в относительных единицах.

3.5.1. Описание метода оценки

Существуют различные приближения для определения высокочастотной мощности, поглощенной (продетектированной) СИС смесителем, некоторые из них обсуждены в классической работе [67]. Наиболее используемой в настоящее время является оценка в соответствии с моделью вынужденного квазичастичного туннелирования Тьена и Гордона, детально описанная, например, в [67,182]. Согласно модели, ток накачки СИС перехода I_{p} (см., напр., рисунок 3.18) под действием внешнего излучения определяется как функция постоянного напряжения V_{dc} смещения и частоты внешнего сигнала f в соответствии с выражением

$$I_p(V_{dc}, f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n^2\left(\frac{eV_f}{hf}\right) I_{dc}\left(V_{dc} + n\frac{hf}{e}\right), \qquad (3.1)$$

где J_n – функция Бесселя n-го порядка, зависимость $I_{dc}(V)$ представлена вольтамперной характеристикой СИС перехода без воздействия внешнего сигнала, а V_f – амплитуда высокочастотного сигнала, добавленная к постоянному напряжению смещения на переходе:

$$V(t) = V_{dc} + V_f \cos \omega t \,. \tag{3.2}$$

Если ввести безразмерный параметр накачки α как

$$\alpha = eV_f / hf \,, \tag{3.3}$$

«ширину» квазичастичной ступени на кривой ВАХ по напряжению

$$V_{qp} = hf / e, \tag{3.4}$$

и использовать в расчетах только ближайшие шесть квазичастичных ступеней тока, что дает достаточную степень точности, выражение (3.1) может быть записано в более простом виде:

$$I_p(V_{dc}, V_{qp}) = \sum_{n=-3}^{+3} J_n^2(\alpha) I_{dc}(V_{dc} + nV_{qp}) \,. \tag{3.5}$$

Выражение (3.5) достаточно точно аппроксимирует кривые ВАХ, вычисленные при различных значениях α и f, к экспериментально измеренным формам ВАХ гармонического смесителя, что дает возможность определения параметра накачки α и амплитуды внешнего сигнала V_f.

Когда значение α известно, поглощенная гармоническим смесителем мощность $P_{НМ}$ определяется как

$$P_{HM} = V_f{}^2 / R_{rf} = \alpha^2 (hf / e)^2 / R_{rf} \,, \tag{3.6}$$

где R_{rf} – сопротивление перехода на субТГц частоте накачки, определяемое как функция V_{dc} и α :

$$R_{rf}(V_{DC}, \alpha) = \frac{2V_{qp}}{I_p(V_{dc} + V_{qp}, \alpha) - I_p(V_{dc} - V_{qp}, \alpha)} \,, \tag{3.7}$$

где значение $I_p(V_{dc},\alpha)$ вычисляется из выражения (3.5) как функция α при постоянной «ширине ступени» V_{qp} , что соответствует постоянной частоте f. Приближение (3.7) корректно в случае компенсированной емкости перехода,

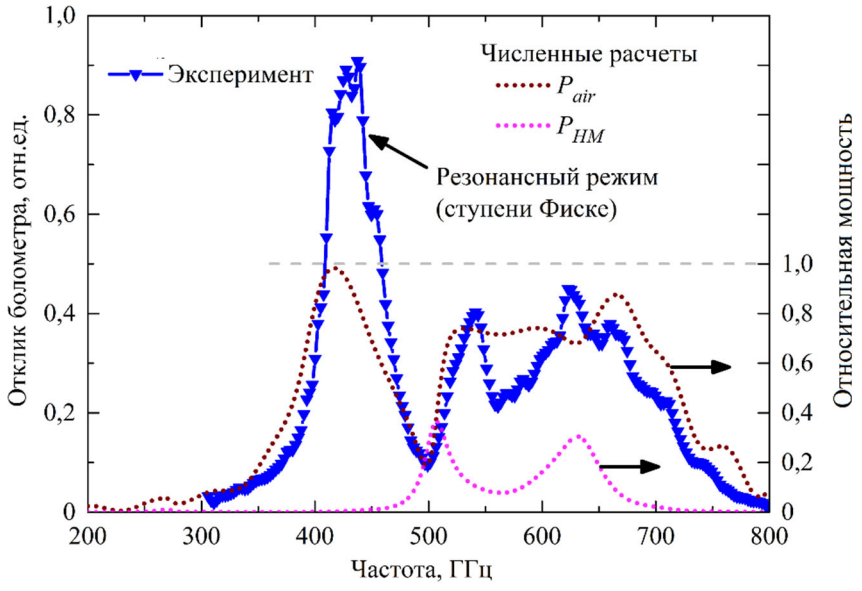
что произведено на уровне дизайна структуры, и не учитывает встроенный импеданс внешней электродинамической системы (цепи). На конкретной частоте, влияние встроенного импеданса может приводить к слишком высокому или, наоборот, отрицательному дифференциальному сопротивлению на первой квазичастичной ступени. На практике, динамическое сопротивление R_{rf}, вычисленное по соотношению (3.7), немного меньше нормального сопротивления R_n при характерных рабочих напряжениях и частотах накачки: $R_{rf} / R_n \sim 0{,}8\text{-}0{,}9$; R_n гармонического смесителя составляет около 25 Ом для изготовленных экспериментальных образцов.

Наконец, мощность сигнала излучения РДП в открытое пространство P_{air} (индекс *air* дословно означает «*в воздух*») в абсолютном выражении определяется («калибруется») из вычисленной мощности поглощения $P_{НМ}$ по соотношению (3.6) и известному отношению $P_{air} / P_{НМ}$ из численных расчетов соответствующих дизайнов (см. рис. 3.12). Когда значение мощности P_{air} в абсолютном выражении известно на некоторой частоте (например, 128 нВт на частоте 505 ГГц, что является практическим результатом для экспериментального образца одного из дизайнов), полная зависимость мощности излучения в открытое пространство от частоты восстанавливается исходя из известной экспериментально измеренной АЧХ образца (см. рис. 3.17), в предположении линейной зависимости отклика болометра от падающей мощности (для малых мощностей, т.е. вдали от насыщения детектора, данное допущение справедливо). Все расчеты производились в самостоятельно написанной программе в среде моделирования Mathcad 15.

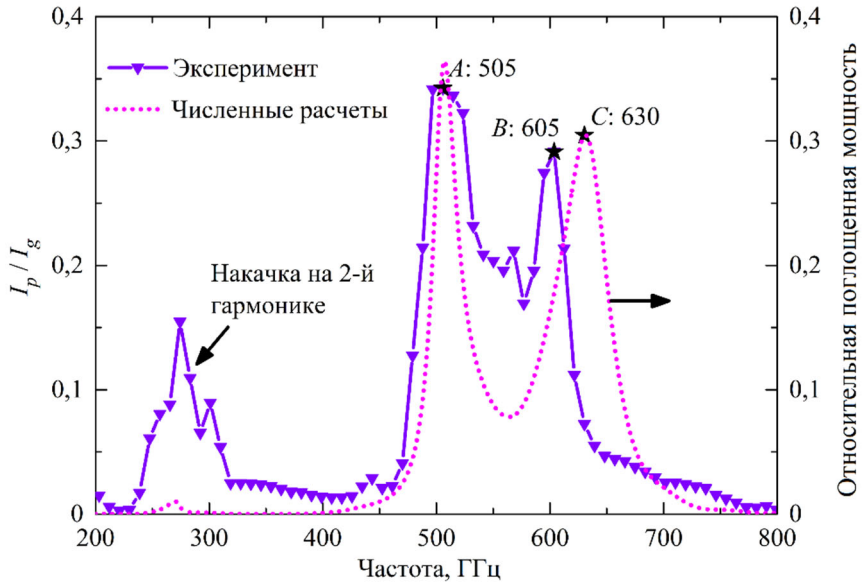
3.5.2. Результаты

Детально опишем получение результатов на примере экспериментального образца дизайна **АГС-550** (рабочий диапазон 400-700 ГГц), выполненного на основе трехслойной туннельной структуры

$Nb/AlO_x/Nb$ с плотностью туннельного тока около 6,5 кА/см^2; для образцов других дизайнов результат был получен полностью аналогичным образом. Первичные экспериментальные результаты для образца данного дизайна представлены на рисунке 3.17 в – отклик болометра в широкой полосе перестройки частоты РДП (фактически, АЧХ источника), и рисунке 3.19 б – накачка гармонического смесителя в зависимости от частоты, а исходные численные результаты для дизайна представлены на рисунке 3.12 в – частотная зависимости мощности излучения в открытое пространство и мощности поглощения ГС. На рисунке 3.24 приведен набор экспериментальных и численных данных для экспериментального образца дизайна **АГС-550** из рисунков 3.17 в и 3.19 б с некоторыми уточнениями и дополнительными деталями, которые будут использоваться далее в расчетах; в частности, вместе с экспериментальными результатами одновременно приведены соответствующие данные численного моделирования для наглядного и непосредственного сравнения.



(а)



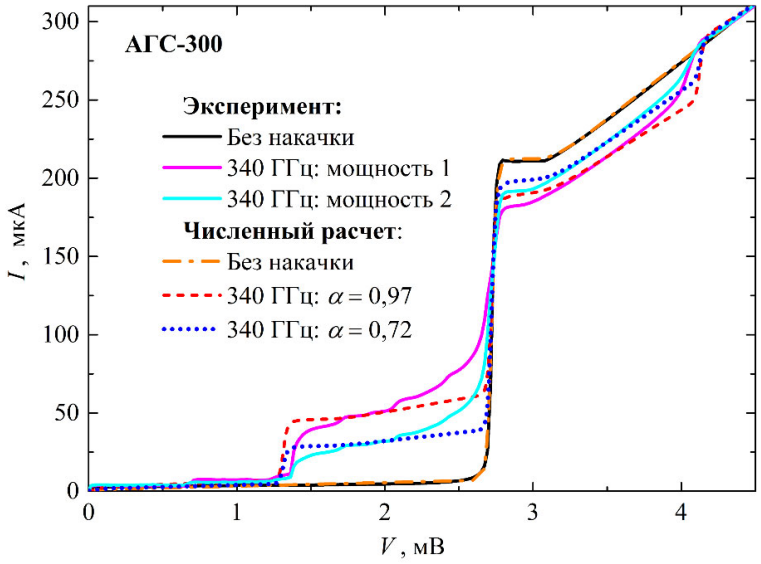
(б)

Рисунок 3.24 – Экспериментальные результаты и численные расчеты для дизайна **АГС-550** : (а) частотная зависимость отклика болометра, для наглядности на графике дополнительно приведена расчетная характеристика поглощенной мощности ГС; (б) частотная зависимость накачки ГС и расчетная частотная характеристика поглощенной мощности ГС. Ток накачки I_p нормирован на щелевой скачок тока I_g = 144 мкА. Представленная расчетная характеристика мощности поглощения ГС – одна и та же на (а) и (б), приведена в разных масштабах. На (б) отмечены несколько «опорных» для расчёта точек *A*, *B*, *C*, с указанием частоты в ГГц.

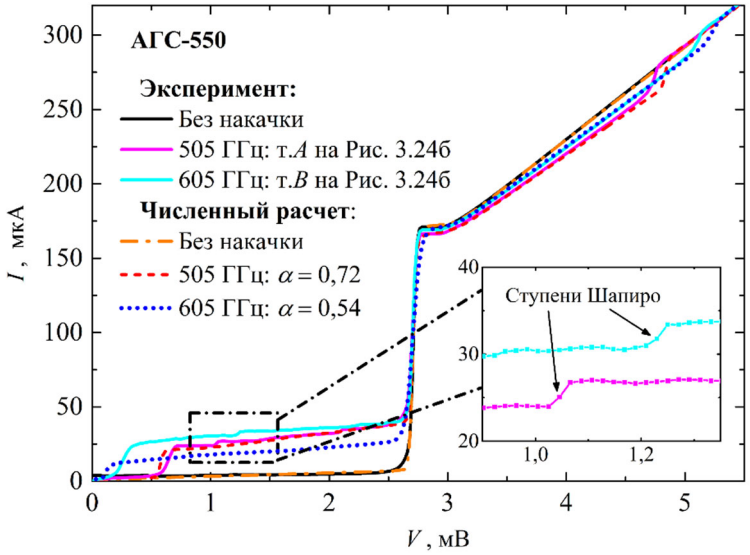
Ранее было отмечено, что при столь сложной интегральной конструкции уровень соответствия экспериментальных и численных результатов можно считать достаточно высоким, однако, для проведения дальнейших расчетов следует отметить ряд специфических моментов для результатов данного образца, часть из которых уже упоминались ранее применительно к общему случаю. Например, на рисунке 3.24 а первый пик болометрического отклика в окрестности частоты 420 ГГц приблизительно в 2 раза выше, чем платообразный пик с центром около 600 ГГц, что отличается от численных расчетов. Как ранее было отмечено, данное расхождение происходит благодаря более высокому уровню мощности РДП в резонансном режиме (на частотах ниже ~440 ГГц), чем в режиме вязкого течения вихрей, в то время как в расчетах мощность РДП положена не зависящей от частоты. Далее, на рисунке 3.24 б четко проявляется пик накачки ГС на частотах от 230-320 ГГц,

который отсутствует в численных расчетах. Данный пик относится к накачке на второй гармонике РДП: фактически накачка ГС происходит на частотах 460-620 ГГц, т.е. целевом диапазоне дизайна, а экспериментальный результат можно считать артефактом построения графика с пересчётом рабочего напряжения РДП в частоту генерации с джозефсоновским коэффициентом 483,6 ГГц/мВ; данный пересчёт справедлив только для основного сигнала и не отражает генерацию гармоник. На рисунке 3.24 б точки *A*, *B* (на экспериментальной кривой) и *C* (на численной кривой) а частотах 505 ГГц, 605 ГГц и 630 ГГц, соответственно, отмечены как опорные для дальнейших расчетов.

Результаты по определению параметра накачки α с использованием выражения (3.5) приведены на рисунке 3.25 для образцов двух дизайнов – **АГС-300** и **АГС-550**, чтобы наглядно продемонстрировать некоторые особенности. Так, например, наклон первой подщелевой ступени (n = -1) в численной аппроксимации ВАХ может хорошо соответствовать экспериментальному результату, как на рисунке 3.25 б, либо отличаться, как на рисунке 3.25 а. Различие вызвано тем, что при расчете в выражениях (3.1), (3.5) не учтена ёмкость СИС перехода, а в эксперименте эта ёмкость, как правило, скомпенсирована на рабочих частотах индуктивностью короткого отрезка микрополосковой линии, которая считается замкнутой на землю на высокой частоте за счет ёмкости радиального замыкателя (см. рисунок 3.11 в). Также можно заметить, что близкая аппроксимация надщелевой ступени (n = +1) не всегда соответствует близкой аппроксимации для подщелевой ступени (n = -1), как видно из рисунка 3.25 б. Данное расхождение также вызвано упрощенной численной моделью (3.1), (3.5) и отчасти тем, что критический (сверхпроводящий) ток в переходе не полностью подавлен, что приводит к появлению ступени Шапиро при напряжении около 1 мВ при частоте воздействия 505 ГГц и около 1,2 мВ при частоте воздействия 605 ГГц (см. вставку на рис. 3.25 б). Экспериментальные кривые накачки на рис. 3.25 б соответствуют рабочим точкам генерации *A*, *B* из рисунка 3.24 б.



(а)

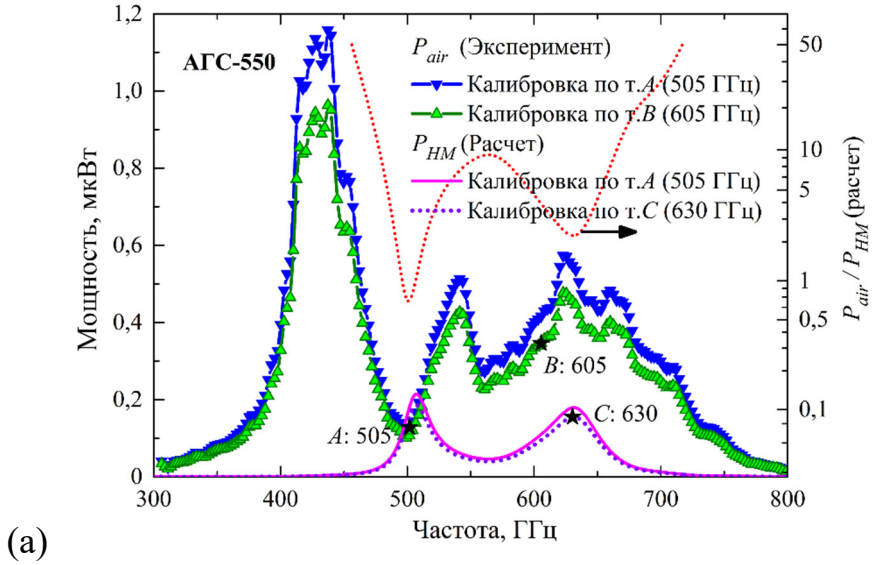


(б)

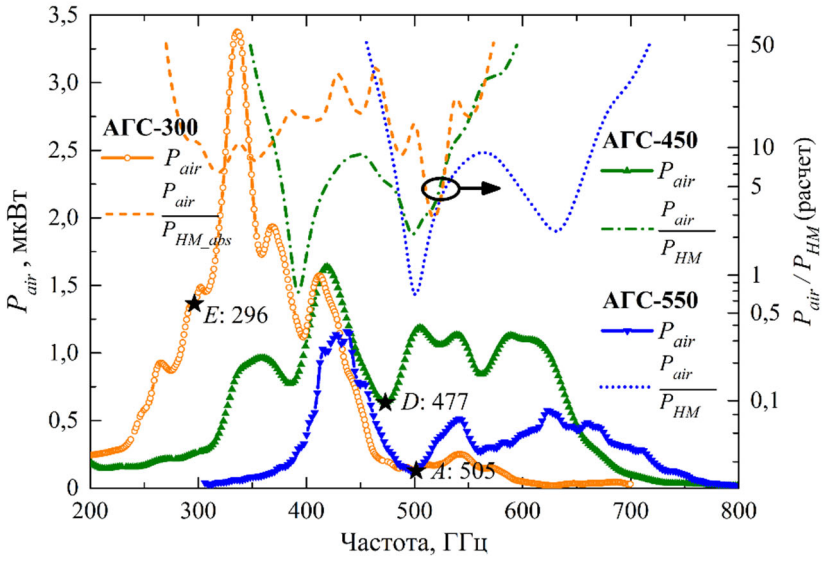
Рисунок 3.25 – Серия ВАХ гармонического смесителя без накачки и с накачкой экспериментальных образцов для дизайна (а) **АГС-300**; (б) **АГС-550**. На обоих графиках сплошными кривыми показаны экспериментальные ВАХ, пунктирными – результат численной аппроксимации. Значение определенного параметра накачки α для двух кривых накачки указаны на графике: (а) α = 0,97 (аппроксимация красной кривой) и α = 0,72 (аппроксимация синей кривой); (б) α = 0,72 (аппроксимация красной кривой) и α = 0,54 (аппроксимация синей кривой).

Результат вычисления («калибровки») мощности излучения в открытое пространство P_{air} с использованием соотношений (3.6),(3.7) для определения $P_{\text{НМ}}$ и с учетом известного соотношения $P_{\text{air}} / P_{\text{НМ}}$ (из результатов моделирования), а также известной форме АЧХ интегральной схемы, представлен на рисунке 3.26. Как и следовало ожидать, вычисление мощности

P_{air} по разным рабочим точкам накачки ГС ($P_{НМ}$, вычисленным в разных точках по частоте накачки) приводит к немного различным результатам, как продемонстрировано на рисунке 3.26 а – синяя и зеленая кривые соответствуют пересчёту из мощности накачки в т.*A* и т.*B*, соответственно. Тем не менее, различие в результатах вычисления составляет, как правило, не более 50% для всего набора проведенных экспериментов; такую точность можно считать достаточной для численной оценки.



(а)



(б)

Рисунок 3.26 – Результаты вычисления мощности излучения в открытое пространство в зависимости от частоты: (а) дизайна **АГС-550** (представлены результаты калибровки P_{air} по точкам *A*, *B*; $P_{НМ}$ – по точке *C*); (б) трех дизайнов **АГС-300**, **АГС-450** и **АГС-550**, с калибровками по указанным точкам *A*, *D* и *E*. На (а) и (б) в качестве дополнения по правой оси ординат показано соотношение P_{air} / $P_{НМ}$ для ясности проведенной оценки.

На рисунке 3.26 б представлены результаты для трёх разработанных и исследованных дизайнов источника с щелевой антенной и гармоническим смесителем – **АГС-300**, **АГС-450** и **АГС-550**; результат для **АГС-550** продублирован из рисунка 3.26 а для случая калибровки по точке *A*. Все кривые излучаемой мощности P_{air} в точности повторяют форму АЧХ, измеренную болометром в разделе 3.3 (рисунок 3.17), но теперь приведены в абсолютных единицах мощности. Для всех представленных дизайнов видно, что на частотах ниже 450 ГГц (вблизи границы резонансного режима $V_g/3$) мощность излучения существенно выше, чем при частотах выше этой границы, что является разумным и ожидаемым результатом. Таким образом, мощность излучения РДП в открытое пространство в направлении болометрического детектора составило от долей до единиц мкВт, что, например, близко к результату из работ другой группы [183], где сообщается о детектируемой мощности излучения РДП *on-chip* СИС смесителем на уровне 1,5 мкВт на частотах 600-700 ГГц. Согласно проведенной оценке, максимальная мощность излучения в открытое пространство, зарегистрированная детектором, составила 3,3 мкВт на частоте 340 ГГц для дизайна **АГС-300**, соответствующего «нижнему» из диапазонов разработанных дизайнов антенн.

3.6. Прямое наблюдение и исследование гармоник джозефсоновской генерации

Раздел 3.4 был посвящен исследованию спектров излучения РДП с высоким разрешением (лучше 0,1 МГц), однако вопрос спектрального состава излучения, т.е. наличия генерации на нескольких частотах одновременно, не затрагивался. Наличие гармоник джозефсоновской генерации известно достаточно давно: например, работы [60-64] посвящены теоретическим описаниям и моделям, а также косвенным экспериментальным наблюдениям гармоник нестационарного эффекта Джозефсона (более детальный обзор литературы представлен в разделе 1.3.1 Главы 1).

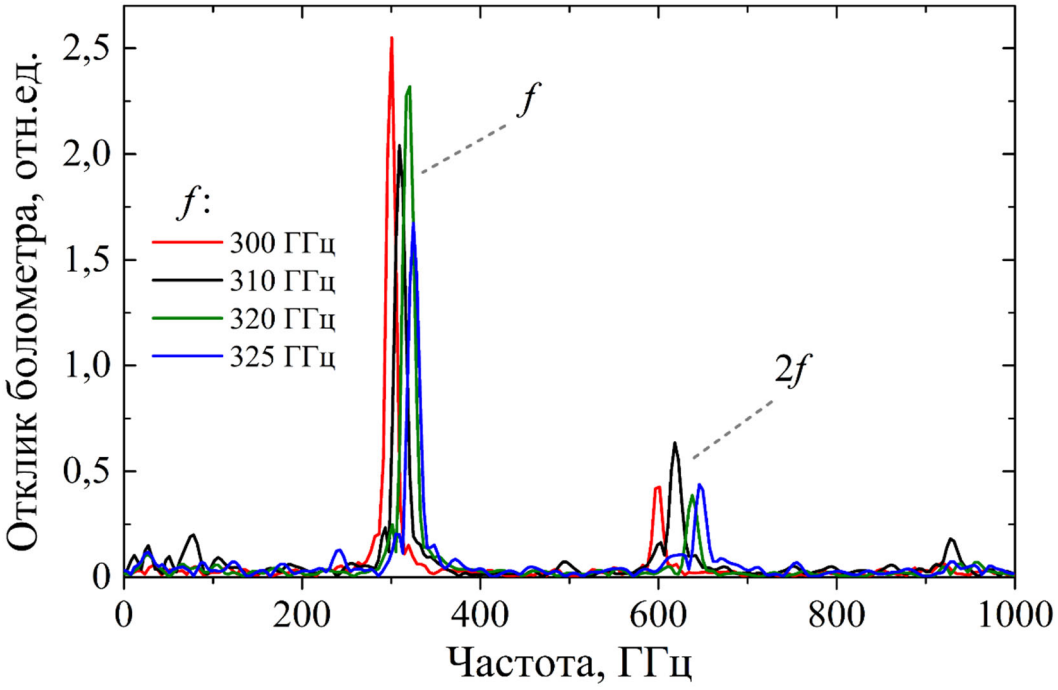
Разработанный в настоящей Главе источник субТГц излучения в открытое пространство на основе РДП обладает достаточно большой мощностью излучения в открытое пространство (порядка долей – единиц мкВт) для регистрации излучения детектором в составе оптического интерферометра, что **позволяет исследовать полный гармонический состав** излучения РДП в широкой полосе ТГц частот, определяемой параметрами интерферометра (см. описание использованного Фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона в разделе 2.2.2 Главы 2). При этом спектр второй гармоники с высоким разрешением возможно регистрировать точно так же, как было проделано для основного сигнала в разделе 3.4.2, – при помощи СИП, при условии значения её частоты в пределах рабочего диапазона приёмника. Таким образом, при основной частоте генерации разработанного источника в диапазоне примерно 250-350 ГГц набор инструментов позволяет регистрировать гетеродинным методом с высоким спектральным разрешением (лучше 0,1 МГц) одновременно спектры основной и второй гармоник излучения, при помощи ГС и цепи обратной связи с РДП и при помощи СИП, соответственно.

3.6.1. Исследование гармоник при помощи широкополосного Фурье-спектрометра

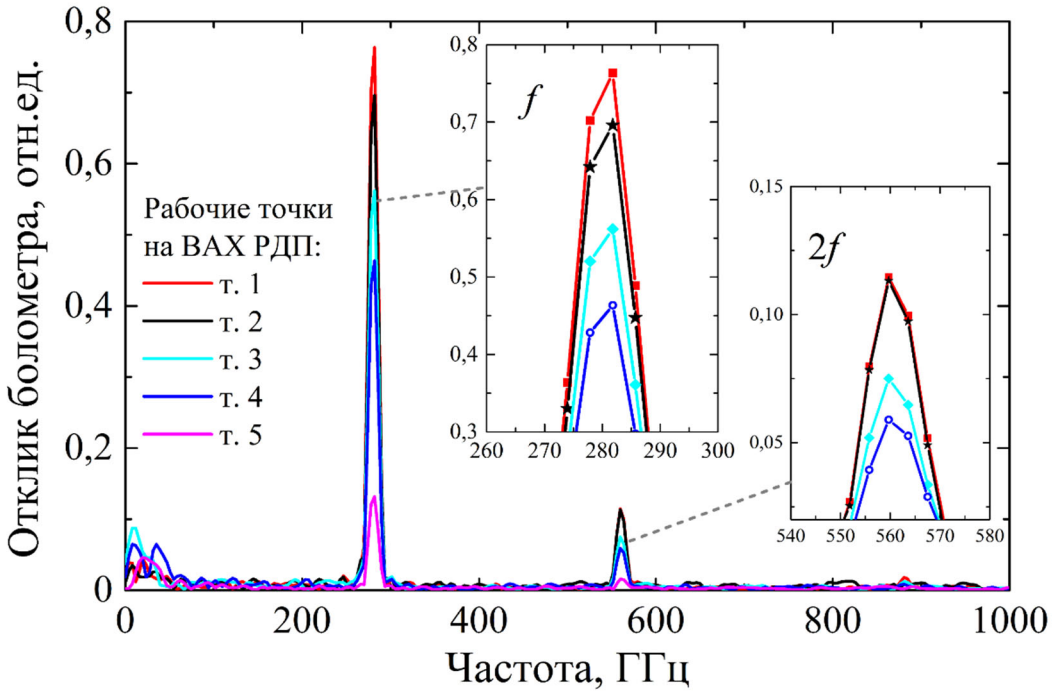
Схема экспериментальной установки Фурье-спектрометра для исследования спектрального состава излучения источника на основе РДП представлена на рисунке 2.7 а (раздел 2.2.2); при детальном описании установки были приведены предельные характеристики спектрометра: наилучшее спектральное разрешение $\delta f_{FTS} \approx 0{,}75$ ГГц, максимальная частота регистрируемого спектра $f_{FTS}^{max} \approx 30$ ТГц. Оба значения являются избыточными для задач исследования спектрального состава РДП, поскольку частота генерации при использовании туннельных структур с электродом(-ами) из ниобия и линий передачи на основе ниобия едва ли может

превысить 1 ТГц, а ближайшие гармоники отстоят друг от друга по частоте, по меньшей мере, на 200 ГГц (расстояние по частоте между гармониками равно частоте основного сигнала). Поэтому, для оптимизации времени измерения спектра в одной рабочей точке генерации (при фиксированном напряжении РДП), длина хода и шаг передвижения подвижного зеркала интерферометра, а также частота оптического обтюратора и время интегрирования синхронного детектора с усилителем выбраны такими, чтобы время одного измерения составляло около 7 минут. При выбранных параметрах установки, конкретные значения которых указаны в разделе 2.2.2, верхняя частота исследования составляла 1,2 ТГц, а спектральное разрешение – 6,25 ГГц. В случае же использовании параметров для достижения предельных характеристик спектрометра ($\delta f_{FTS} \approx 0{,}75$ ГГц и $f_{FTS}^{max} \approx 30$ ТГц) время одного измерения составляет около 1,5 часов.

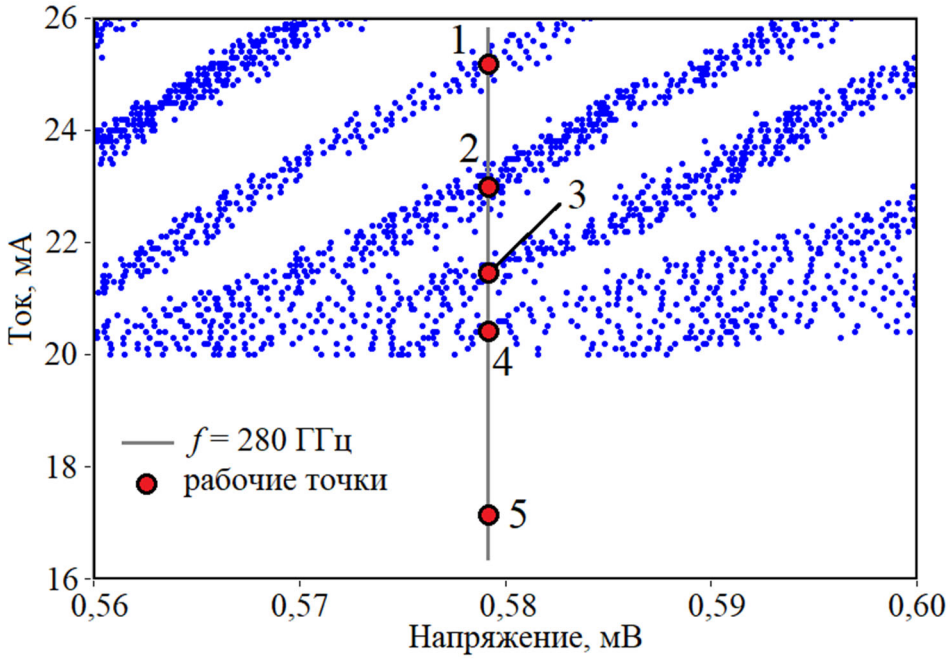
Был проведен широкий цикл измерений спектрального состава выходного излучения источника на основе РДП для образцов дизайнов **АГС-300** и **АГС-450** при основной частоте генерации f от 105 ГГц до 500 ГГц. Характерный спектр для рабочих частот f от 300 до 325 ГГц представлен на рис. 3.27 а, а набор спектров на фиксированной частоте f = 280 ГГц при разной мощности излучения – на рисунке 3.27 б, – в рабочих точках на ВАХ РДП, представленных на рисунке 3.27 в. Приведенные спектры излучения в явном виде демонстрируют излучение на частоте второй гармоники джозефсоновской генерации. Похожие результаты – две ярко выраженные гармоники f, $2f$ в широкополосном спектре детектирования – наблюдались в широкой полосе перестройки основной частоты f от 200 до ~350 ГГц для различных экспериментальных образцов дизайна **АГС-300**.


Отклик болометра, отн.ед.
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0
f:
300 ГГц
310 ГГц
320 ГГц
325 ГГц
f
2f
0
200
400
600
800
1000
Частота, ГГц

(а)


Отклик болометра, отн.ед.
0,8
0,6
0,4
0,2
0
Рабочие точки
на ВАХ РДП:
т. 1
т. 2
т. 3
т. 4
т. 5
f
2f
0
200
400
600
800
1000
Частота, ГГц

(б)



(в)

Рисунок 3.27 – (а) Спектры излучения РДП при основной частоте генерации f = 300, 310, 320 и 325 ГГц, полученные при помощи Фурье-спектрометра. Каждая кривая нормирована на разную величину, так чтобы высота первого пика была приблизительно одинакова для всех кривых. (б) Спектры излучения РДП при основной частоте 280 ГГц в различных рабочих точках № 1-5, представленных на (в). Кривые представлены в единой нормировке для наглядного сравнения уровня мощности в разных точках. (в) ВАХ исследуемого РДП в окрестности напряжения 0,579 мВ, соответствующего частоте 280 ГГц, с демонстрацией рабочих точек № 1-5, выбранных на разных ступенях Фиске. Область при токах ниже 20 мА не представлена как непоказательная («равномерный» разброс точек ВАХ в отсутствии ступеней Фиске).

На рисунке 3.27 в представлена ВАХ РДП с указанными точками № 1-5, соответствующими измеренным спектрам из рисунка 3.27 б, при рабочем напряжении в окрестности 0,579 мВ. В данной области ВАХ наблюдаются четко выраженные ступени Фиске, вызванные геометрическими резонансами, при этом точки № 1-5 намеренно выбраны на различных ступенях для наглядной демонстрации генерации на каждой ступени и сравнения мощности на ступенях. Ступени становятся практически неразличимы при токах смещения ниже 20 мА из-за возрастающего наклона, поэтому область ВАХ

для токов < 20мА не представлена. Как можно заметить, б**о**льший ток смещения соответствует более высокой мощности излучения (отклику болометра) как для основной, так и для второй гармоники (см. вставки на рисунке 3.27 б), что является разумным результатом, не противоречащим ожиданиям.

Известно, что в системе оптического интерферометра могут возникать отражения лучей в различных частях схемы, что приводит к искусственному появлению гармоник основного сигнала на интерференционной картине («артефактов»), не связанных со спектром излучения источника. Так, например, отраженная часть луча от входного окна детектора вернется в оптический тракт интерферометра, второй раз разделился делителем луча и отразится от зеркал в каждом из плеч, после чего вернётся к детектору, проделав двойной оптический путь по сравнению с исходным лучом. Двойной оптический путь приводит к двойной разности фаз разделенных лучей отраженного сигнала по сравнению с разделенными лучами первичного сигнала, которая детектируется болометром при регистрации пространственной интерференционной картины и, в результате преобразования Фурье, проявляется в виде искусственного появления второй гармоники. Также к появлению артефактных гармоник в регистрируемом спектре могут приводить конечная длина и шаг перемещения подвижного зеркала, фазовые ошибки и другие эффекты. Так, например, если в регистрируемом спектре излучения присутствует истинный или артефактный сигнал излучения на частоте, превышающей предел исследования $f_{\mathrm{FTS}}^{\max}$ при текущем шаге подвижного зеркала, то в результате математической операции преобразования Фурье на спектральной картине такой сигнал искусственно переносится в диапазон исследования как «зеркальное отражение» спектральной картины от верхнего предела частоты. Учитывая эту особенность, важно выбирать шаг подвижного зеркала таким, чтобы верхняя граница частотного диапазона спектрометра была более чем в 2 раза выше частоты ожидаемого сигнала. Чтобы продемонстрировать, что наблюдаемые

гармоники основной частоты не являются артефактами системы измерения (интерферометра), были проведены два дополнительных доказательных эксперимента. Первый эксперимент состоял в том, что основная частота джозефсоновской генерации f была установлена вне рабочего диапазона выходной линии передачи и передающей антенны (ниже 150 ГГц, что соответствует рабочему напряжению РДП ниже 0,31 мВ), так что сигнал на частоте f не покидал криостат с генератором и, следовательно, принципиально не мог быть зарегистрирован оптическим методом. При таком эксперименте в явном виде наблюдался сигнал на второй ($2f$) и иногда третьей ($3f$) гармониках в отсутствии основной гармоники – результат представлен на рисунке 3.28. Данный эксперимент демонстрирует истинность джозефсоновской генерации на второй и третьей гармониках.

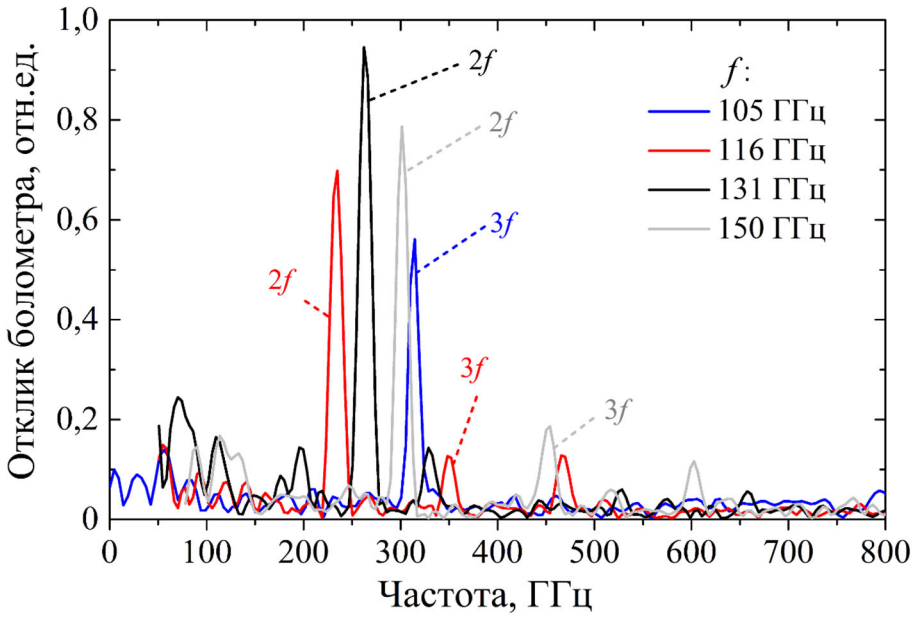


Рисунок 3.28 – Спектры излучения РДП при основной частоте генерации f от 105 до 150 ГГц, полученные при помощи Фурье-спектрометра. Наблюдаются только высшие гармоники.

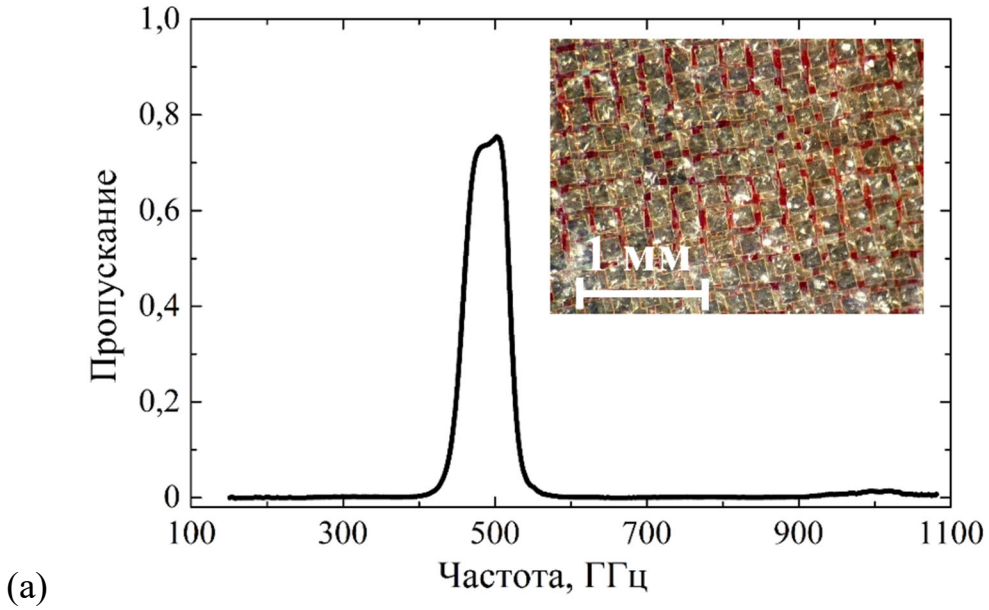
Второй доказательный эксперимент заключался в использовании полосно-пропускающего фильтра для одной из гармоник на выходе генератора. Был использован коммерческий узкополосный многослойный

«сеточный» фильтр производства *QMC Instruments* (Великобритания) с частотой пропускания в окрестности 500 ГГц, спецификация которого представлена на рисунке 3.29 а. Каждый сеточный слой фильтра представляет собой двумерную матрицу («сетку») ячеек – вырезов в форме «крестиков» одинакового размера, расположенных с одинаковой пространственной периодичностью, с характерной длиной каждого выреза $\sim\lambda_0/2$, где λ_0 – центральная частота полосы пропускания (см., например, [184]). Много сеточных слоев наложены друг на друга в многослойную структуру таким образом, чтобы вырезы («крестики») оказались не параллельны друг другу, а под некоторым углом. Отсутствие пропускания на низких частотах обусловлено длиной «крестика», которая определяет предельную длину волны пропускания ячейки $\sim\lambda_0$, а поглощение на высоких частотах обусловлено малым эффективным отношением площади вырезов к общей площади фильтра с учетом большого количества слоев.

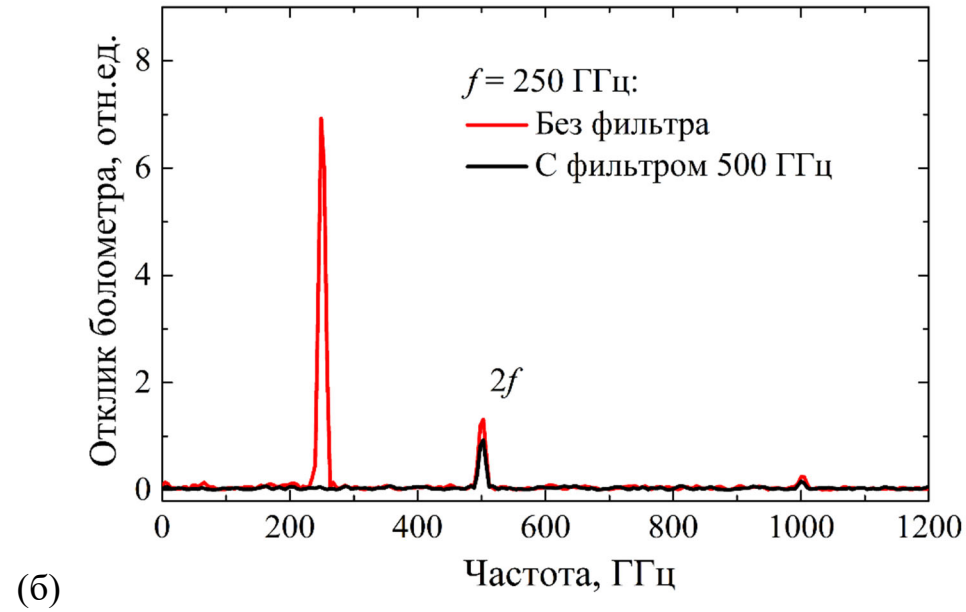
Частота РДП была установлена равной 250 ГГц, так что в отсутствии фильтра наблюдалась картинка, полностью идентичная результатам из рисунка 3.27 – наличие основной и второй гармоники на частоте 500 ГГц. Затем, при установке полосно-пропускающего фильтра 500 ГГц на выходном окне криостата с источником, в регистрируемом спектре наблюдалась только вторая гармоника: результат представлен на рисунке 3.29 б. Данный эксперимент подтверждает истинность излучения на второй гармонике; в противном случае, если допустить, что сигнал на частоте 500 ГГц является артефактом измерений (для красной кривой на рис. 3.29 б), то он должен был бы отсутствовать при полном подавлении основной гармоники.

Другим интересным результатом является слабый пик на частоте 1000 ГГц, соответствующей 4-й гармонике основного сигнала; данный пик наблюдается как в отсутствии, так и с установкой фильтра (см. рис. 3.29 б). Поскольку фильтр не пропускает сигнал на данной частоте, а также учитывая, что линии передачи на основе ниобия не могут работать на столько высокой частоте согласно теории Маттиса и Бардина (см. раздел 1.3.5), пик в

регистрируемом спектре на частоте 1000 ГГц является артефактом измерительной установки на основе интерферометра (артефактная вторая гармоника истинной второй гармоники 500 ГГц).



(а)



(б)

Рисунок 3.29 – (а) Спецификация АЧХ полосно-пропускающего фильтра от производителя; на вставке представлена фотография с указанием масштаба. (б) Спектры излучения РДП, полученные при помощи Фурье-спектрометра, в отсутствии фильтра (красная кривая) и с его установкой на выходе источника (синяя кривая).

3.6.2. Исследование гармоник при помощи спектрометра высокого разрешения на основе сверхпроводникового интегрального СИС приемника

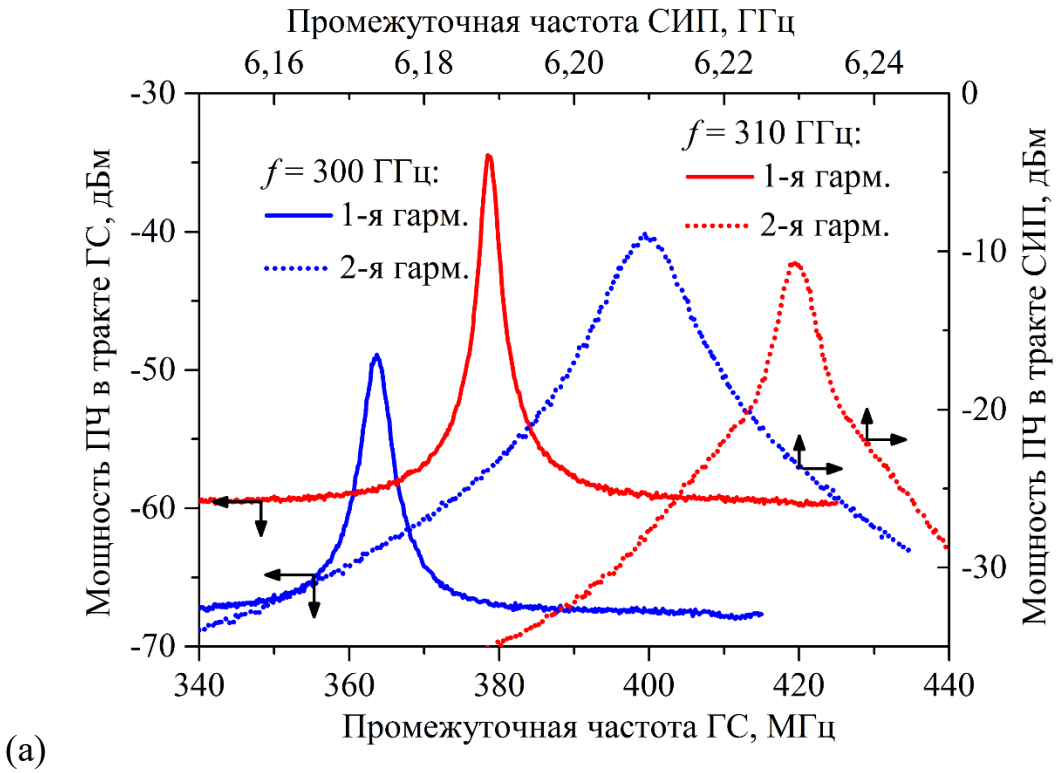
Поскольку набор инструментов и экспериментальных методов позволяет исследовать форму спектра как основной, так и второй гармоники с высоким разрешением, интересным представляется сопоставление таких спектров. Экспериментальная установка ничем не отличается от использованной в разделе 3.4.2 для спектральных исследований сигнала на основной частоте при помощи СИП (схема установки приведена на рис. 2.9 а), с одним ключевым замечанием: параметры цепи обратной связи с использованием ГС и ФАПЧ настроены на регистрацию основного сигнала на частоте f (анализатором спектра № 1), в то время как параметры СИП настроены на прием второй гармоники на частоте $2f$ (анализатором спектра № 2).

Набор спектров на основной частоте и 2-й гармонике для двух частот генерации – 300 и 310 ГГц, – представлены на рисунке 3.30 а. Необходимо напомнить, что что спектр второй гармоники, регистрируемый при помощи СИП, является результатом конволюции (свертки) истинного спектра излучения исследуемого РДП и гетеродина приемника, который также основан на «собственном» РДП и стабилизирован по фазе к опорному сигналу частотой 400 МГц при помощи системы ФАПЧ. Теоретически, ширина линии N-й гармоники δf_N пропорциональна квадрату номера гармоники:

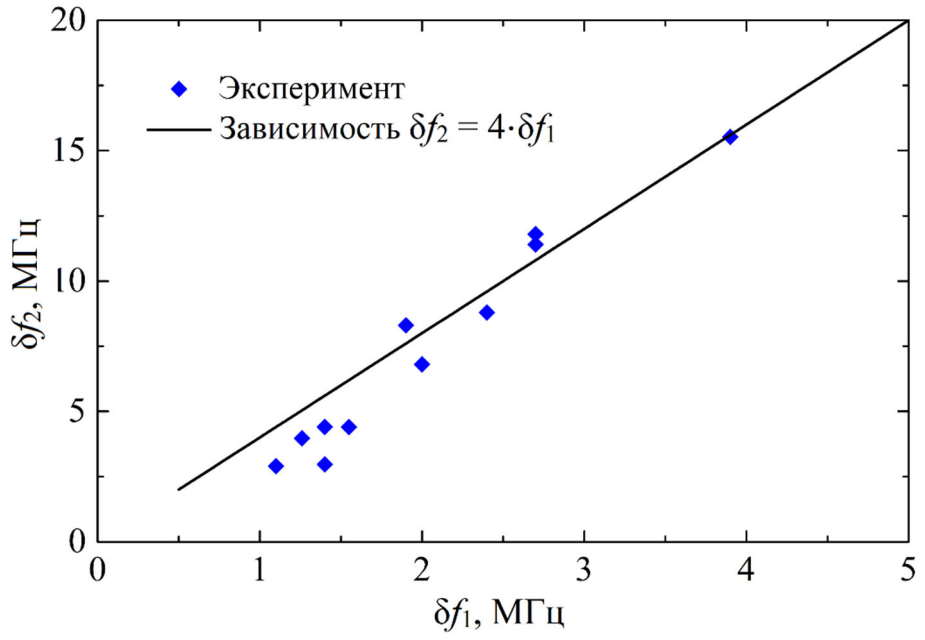
$$\delta f_N = N^2 \, \delta f_1 \ , \qquad (3.8)$$

где δf_1 – ширина спектра на основной частоте. Выражение (3.8) справедливо для случая широкополосных флуктуаций, т.е. когда спектральная плотность флуктуаций напряжения $S(\omega)$ практически постоянна в диапазоне частот $0 < \omega < \delta f_1$ [58, глава 2]. Из (3.8) следует, что отношение $\delta f_2 / \delta f_1$ ширины линии второй гармоники к первой равняется 4. На рис. 3.30 б представлены результаты соотношения между шириной линии первой и второй гармоник

для набора исследованных рабочих точек. Видно, что экспериментальные результаты достаточно близки к теоретическому значению 4, однако имеется систематическое отклонение для значений $\delta f_1 < 2$ МГц, где, по всей видимости, перестает работать условие широкополосных флуктуаций для соотношения (3.8).



(а)



(б)

Рисунок 3.30 – (а) Примеры спектров основной (сплошные линии) и второй (пунктирные линии) гармоник излучения при частоте генерации, равной 300 ГГц (синие линии) и 310 ГГц (красные линии). Ширина частотной

развертки для верхней и нижней оси одинаковая и равняется 100 МГц. Динамический диапазон для левой и правой оси одинаковый и составляет 40 дБ. Ширина линии генерации для приведенных кривых следующая: δf_1 = 2,4 МГц, δf_2 = 8,8 МГц при f = 300 ГГц; δf_1 = 1,55 МГц, δf_2 = 4,4 МГц при f = 310 ГГц. (б) Ширина линии первый и второй гармоник в диапазоне генерации f от 300 до 335 ГГц. Теоретическая зависимость $\delta f_2 = 4\ \delta f_1$ приведена для наглядности.

3.7. Сравнение генератора с лабораторными субТГц источниками других типов

Поскольку в данной работе был разработан практический источник субТГц диапазона с сигналом излучения в открытое пространство, а также исследованы его ключевые физические характеристики, – полоса перестройки частоты, ширина спектральной линии, мощность излучения, спектральный состав, возможность частотной и фазовой стабилизации, – было проведено практическое сравнение разработанного источника на основе РДП с двумя другими типами источников, основанных на принципиально отличных принципах работы. Несмотря на то, что данное сравнение само по себе не содержит новых научных результатов, по мнению диссертанта, оно является полезным для пользователя (исследователя) с технической и эксплуатационной точки зрения в лабораторных условиях. Хотя данное сравнение основано на конкретных экспериментальных образцах источников, которые даже среди одного типа могут значительно отличаться по техническим, массогабаритным и эксплуатационным свойствам, обзорное сравнение может быть полезным руководством в задачах ТГц и субТГц диапазона при выборе наиболее оптимального типа источника в контексте конкретно поставленной задачи.

Первый лабораторный источник, с которым проведено сравнение разработанного джозефсоновского источника на основе РДП, – лампа обратной волны с умножителем частоты, работающем на невысоком номере гармоники (до N = 4). Второй источник сравнительного обзора основан на

умножителе частоты с высоким номером гармоник на полупроводниковых сверхрешетках (СР). Общие принципы работы обоих типов – как электронных вакуумных устройств, так и умножителей, – были описаны в разделе 1.2 Главы 1. Все источники сравнительного анализа обладают близкими рабочими диапазонами – от ~300 ГГц до ~600-700 ГГц. В данном разделе проведено качественное и количественное сравнение источников по массогарабитным характеристикам, амплитудно-частотным характеристикам, спектральному составу, потребляемой мощности питания и выходной мощности излучения, а также по сложности настройки и работы с устройствами в лабораторных условиях.

3.7.1. Общий сравнительный анализ источников

Разработанный источник на основе РДП с передающей антенной

Предельная достигнутая частота генерации около 750 ГГц определяется фундаментальными свойствами сверхпроводящих берегов перехода и линий передачи на основе ниобия. Принцип работы и важнейшие характеристики детально описаны в настоящей главе (разделы 3.1-3.6), однако вопросы эргономичности источника с точки зрения практических приложений не обсуждались. Описание криогенного модуля источника описано в разделе 3.2.5, схема и фотографии приведены на рисунке 3.16. Базовый криогенный модуль генератора, включающий в себя интегральную микросхему с генератором, передающей щелевой антенной и ГС, установленную на полуэллиптическую кремниевую линзу, а также массивный магнитный экран для экранирования РДП от внешних наводок, имеет размеры 120 мм (длина)×45 мм (ширина)×60 мм (высота) и массу около 0,4 кг. Генератор работает при температуре жидкого гелия 4,2 К и традиционно устанавливается в заливной криостат. Преимуществом такого источника является возможность установки криогенного модуля в общую криогенную систему решаемой задачи, в таком случае массогабаритные характеристики модуля практически не играют роли в общей системе. Недостатком же применения в задачах при

комнатной температуре является необходимость независимого охлаждения базового модуля генератора: для этого используется достаточно массивная криогенная система. Так, например, полная масса снаряженного криостата производства *Infrared Lab.* (фотография представлена на рисунке 2.2) с объемом для жидкого гелия около 4л, обеспечивающим 8-12 часов непрерывной работы, составляет 21,6 кг (без жидких гелия и азота), а размеры – 300 мм (длина)×300 мм (ширина)×500 мм (высота). Указанные характеристики уже включают в себя СВЧ усилители выходных сигналов на ПЧ до 1 ГГц, фильтры для снижения шумов по постоянному току и на СВЧ, систему ФАПЧ, а также всю электрическую и СВЧ разводку, но не включают источники питания для всех перечисленных элементов и вспомогательное оборудование. Вместо заливного криостата для охлаждения системы до рабочей температуры может быть использована криогенная система замкнутого цикла на основе высокопроизводительного рефрижератора (фотография представлена на рисунке 2.3). Для питания активных элементов – усилителей ПЧ и системы ФАПЧ – дополнительно требуется маломощный источник напряжения до 6 В с суммарной силой тока до 1 А, система ФАПЧ требует наличие опорного сигнала частотой 400 МГц, а система обратной связи также требует опорного перестраиваемого сигнала СВЧ в диапазоне 19–21 МГц. Для управления ключевыми элементами микросхемы – РДП и гармоническим смесителем – требуется три независимых малошумящих источник тока (до 200 мА, до 100 мА и до 10 мА) с желательной работой от автономных батарей без использования сети ~220 В для минимизации уровня шумов, а также ПК для удобного и оперативного управления всеми элементами системы. Для визуального контроля фазовой стабилизации выходного излучения традиционно используется анализатор спектра до 1 ГГц, который при необходимости может быть заменен контролем лишь мощности выходного сигнала смесителя при помощи фазового детектора. Таким образом, масса всего перечисленного вспомогательного оборудования в зависимости от исполнения и решаемой задачи может составлять от 10 кг до 30 кг дополнительно к массе криогенной установки. Так, например, все вспомогательное оборудование может быть интегрировано в единый блок с

массой около 20 кг и размерами (Д×Ш×В) 380 мм×480 мм×140 мм с управлением от компактного ноутбука (рисунок 3.31), но можно использовать несколько внешних многофункциональных устройств с независимым управлением и полноценный высокопроизводительный ПК. Общая потребляемая мощность также значительно зависит от исполнения: при использовании заливного криостата потребляемая мощность определяется лишь потребляемой мощностью вспомогательного оборудования и обычно составляет до 1 кВт, если же использовать криогенный рефрижератор в составе системы замкнутого цикла, то требуется дополнительная мощность порядка нескольких киловатт для работы компрессора.

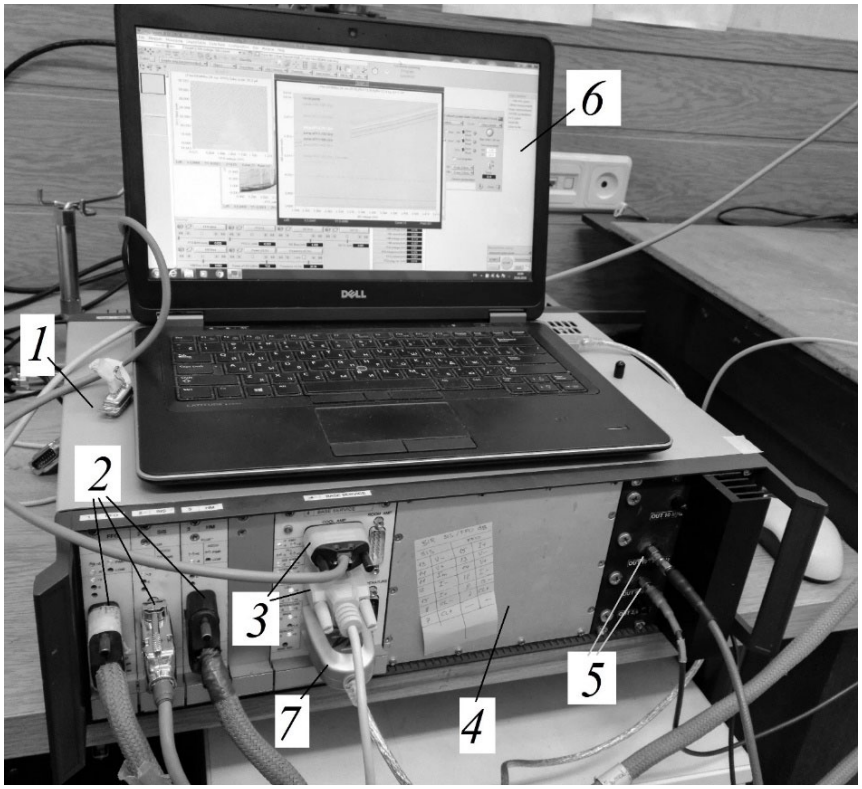


Рисунок 3.31 – Фотография интегрального блока для управления системой субТГц источника на основе РДП: 1 – корпус блока, 2 – разъемы для управления (смещения) элементами микросхемы по постоянному току, 3 – разъемы для управления внешними вспомогательными элементами (системы ФАПЧ, усилителей СВЧ), 4 – батарейный блок для автономного управления элементами с низкими шумами без использования сети ~220 В, 5 – опорные генераторы СВЧ (19-21 ГГц и 400 МГц), 6 – ПК оператора (ноутбук) для полного управления блоком, 7 – разъем стандарта RS-232 для подключения к ПК через универсальный порт.

Несмотря на все описанные технические сложности при работе с субТГц источником на основе РДП, его неоспоримым преимуществом является ширина полосы перестройки частоты, составляющая до 70% от центральной частоты для одного экспериментального образца, а также отсутствие необходимости перепроектировать всю систему для работы в другом диапазоне частот: достаточно поменять интегральную микросхему на образец другого дизайна. Так, разработанные дизайны **АГС-300** и **АГС-550** с учетом экспериментальных результатов обладают рабочим диапазоном с возможность частотной и фазовой стабилизации сигнала 250-450 ГГц и 400-750 ГГц, соответственно, что составляет ширину полосы перестройки около 60% от центральной частоты. Другим преимуществом является возможность встраивания модуля в общую криогенную систему для решения задач при низких температурах, например, при исследовании низкотемпературных свойств материалов, в ТГц микроскопии.

Источник на основе ЛОВ с системой частотной и фазовой стабилизации

Лампы обратной волны являются наиболее традиционными представителями источников ТГц диапазона. Генерация в таких приборах основана на взаимодействии электронного пучка с электромагнитной волной, при этом приборы обладают большой массой из-за необходимости использования сильного постоянного магнита и высоковольтного источника питания. Для проведения сравнительного анализа был использован лабораторный источник на основе ЛОВ, разработанный в Институте физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород). Источник является комплексным устройством, состоящим из ЛОВ с выходной частотой диапазона 120-160 ГГц, системой ФАПЧ выходного сигнала ЛОВ и умножителя на основе полупроводниковой СР с волноводом. Волновод в составе умножителя спроектирован таким образом, чтобы обеспечивать наилучшую работу на 4-й гармонике сигнала ЛОВ благодаря фильтрации частот ниже ~350-400 ГГц, а

вывод излучения в открытое пространство производится при помощи рупорной антенны. Фотография ТГц источника со вспомогательными устройствами – высоковольтным источником питания, системой ФАПЧ и выходным умножителем, – приведена на рисунке 3.32.



Рисунок 3.32 – Фотография источника субТГц излучения на основе ЛОВ: 1 – блок ЛОВ, 2 – выходной умножитель частоты 120-160 ГГц, 3 – блок питания и вспомогательной электроники.

Масса всей системы источника составляет 17,4 кг, габариты функциональной части источника (без персонального компьютера) составляют порядка 500 мм (длина)×360 мм (ширина)×280 мм (высота), а потребляемая мощность от сети ~220 В не превышает 0,25 кВт. Рабочий диапазон выходных частот составляет 480 – 640 ГГц (4-я гармоника ЛОВ базовой частоты 120-160 ГГц), шаг перестройки частоты равняется 10 кГц, а мощность на выходе рупорной антенны согласно спецификации на прибор – не менее 0,2 мкВт. Выходное излучение имеет достаточно узкую диаграмму направленности благодаря рупорной антенне на выходе умножителя, при этом для передачи сигнала на большие расстояния может дополнительно использоваться собирающая линза. Следует заметить, что прибор является достаточно тяжелым и габаритным.

Размеры прибора не доставляют существенных неудобств при его использовании в качестве внешнего ТГц источника в лабораторных условиях, однако, встраивание источника в корпус совместно с другими устройствами либо его интеграция в комплексную миниатюрную установку представляется невозможным. Управление частотой выходного сигнала производится при помощи персонального компьютера оператора – как правило, ноутбука, при этом программное обеспечение позволяет осуществлять автоматическую перестройку частоты во времени с заданным шагом.

Источник на основе умножителя СВЧ сигнала с высоким номером гармоники

Умножители СВЧ на основе полупроводниковых СР получили широкое распространение за последние два десятилетия в силу простоты эксплуатации и относительной миниатюрности [54-56]. Основным их недостатком является то, что для эффективной работы на частотах выше 1 ТГц, чему соответствуют высокие номера гармоник (выше 50), требуется усилители сигнала на частотах около 100 ГГц, которые до сих пор не являются коммерчески доступными. Для исследований в данной работе был использован образец умножителя на основе GaAs/AlAs, изготовленный на базе ФТИ им. А.Ф. Иоффе и ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Умножитель оснащён выходной рупорной антенной ромбовидного сечения, для задания входного сигнала используется коаксиальный СВЧ кабель. Размеры умножителя порядка 30 мм×20 мм×20 мм и масса порядка 50 г, как правило, пренебрежимо малы по сравнению с габаритами и массой базового источника СВЧ сигнала. Фотография умножителя показана на рисунке 3.33. Таким образом, при использовании умножителя в качестве внешнего ТГц источника в лабораторных условиях фактические массогабаритные характеристики устройства определяются исключительно характеристиками исходного источника СВЧ, при этом один только коаксиальный СВЧ кабель, эффективно работающий до 26 ГГц, соизмерим (либо превышает) по массе с образцом умножителя. Для примера,

широко перестраиваемый коммерчески доступный лабораторный генератор СВЧ сигналов частотой от 250 кГц до 40 ГГц производства *Keysight Technologies* (США) обладает массой 20,3 кг и размерами 500 мм (длина)×420 мм (ширина)×180 мм (высота). Если в решаемой задаче не требуется широкая перестройка частоты, то может быть использован одночастотный относительно миниатюрный источник массой ~0,5-2 кг. Умножитель является пассивным устройством, поэтому конечная потребляемая мощность системы полностью определяется потребляемой мощностью базового источника, которая для описанного выше промышленного прибора равняется примерно 0,3 кВт и принципиально может составлять от нескольких Ватт до 1 кВт.

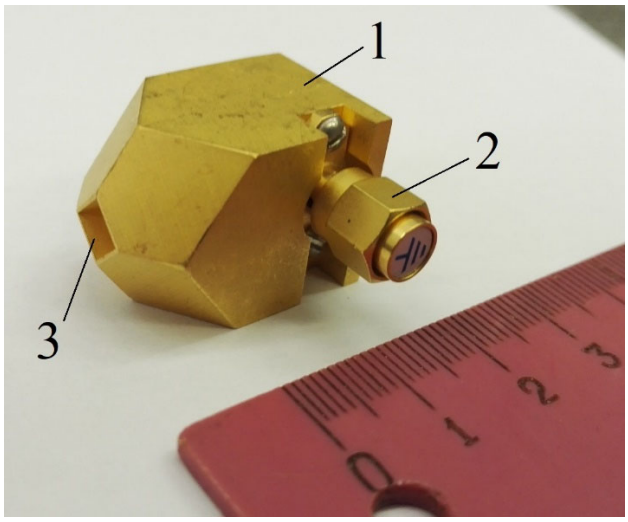


Рисунок 3.33 – Фотография умножителя СВЧ на основе СР. 1 – корпус умножителя, 2 – входной коаксиальный разъем СВЧ стандарта SMA, 3 – выходная рупорная антенна ромбовидного сечения.

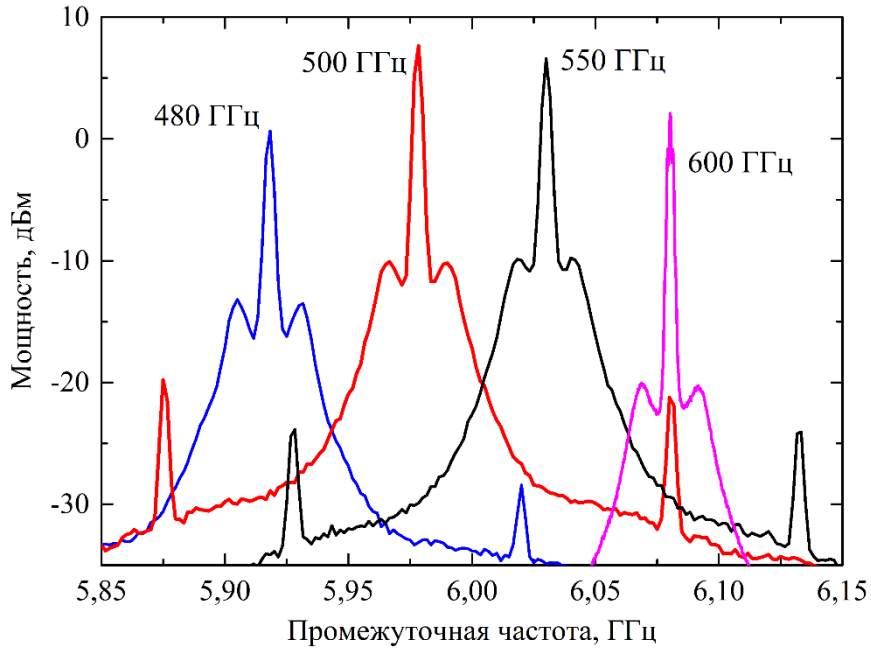
При подаче на вход сверхрешётки сигнала частотой f на её выходе и, соответственно, на входе волновода имеется сигнал в виде «гребенки» на целых гармониках $2f$, $3f$, … $30f$, $31f$ и т.д. При этом волновод «отсекает» сигнал на частотах ниже ~350-400 ГГц, таким образом, на рупорную антенну поступает и затем выводится в открытое пространство сигнал только на тех гармониках, частота которых выше 400 ГГц. Конструкция СР позволяет регулировать напряжение смещения на структуре, которое определяет

эффективность преобразования на четных и нечетных гармониках, что дает возможность усиливать требуемую гармонику. Если для применения необходим одночастотный сигнал, а не «гребенка» гармоник, то следует использовать дополнительные узкополосные фильтры. Предельное верхнее значение входной частоты определяется параметрами входной линии СВЧ и может быть ограничено емкостью ввода. Так, например, образец умножителя на выходе ЛОВ в составе предыдущего из описанных источников пропускает входную частоту до 160 ГГц, а рассматриваемый образец с коаксиальным входом обладает предельным значением входной частоты 24 ГГц. При этом для достижения наилучшей выходной мощности на желаемой частоте ТГц диапазона оптимальным является диапазон частот 20-24 ГГц, а оптимальная мощность входного сигнала составляет порядка 10-15 дБм и зависит от выбранной входной частоты. Таким образом, поскольку умножитель является пассивным устройством, простота (сложность) работы с ним фактически определяется простотой (сложностью) работы с базовым источником, при этом выбор источника определяется решаемой задачей. Если в задаче требуется широкая полоса перестройки частоты в ТГц диапазоне с маленьким шагом и возможность подстройки выходной мощности, то необходим многофункциональный коммерческий источник СВЧ со встроенным дисплеем либо возможностью полного управления с ПК; если же в решаемой задаче достаточно одной либо нескольких заданных выходных частот фиксированной мощности, достаточно использования более миниатюрного и специализированного источника СВЧ. Благодаря компактным размерам, умножитель может быть легко встроен в общий корпус с другими устройствами, т. е. возможна его интеграция в комплексную миниатюрную установку, в отличие от источника на основе ЛОВ.

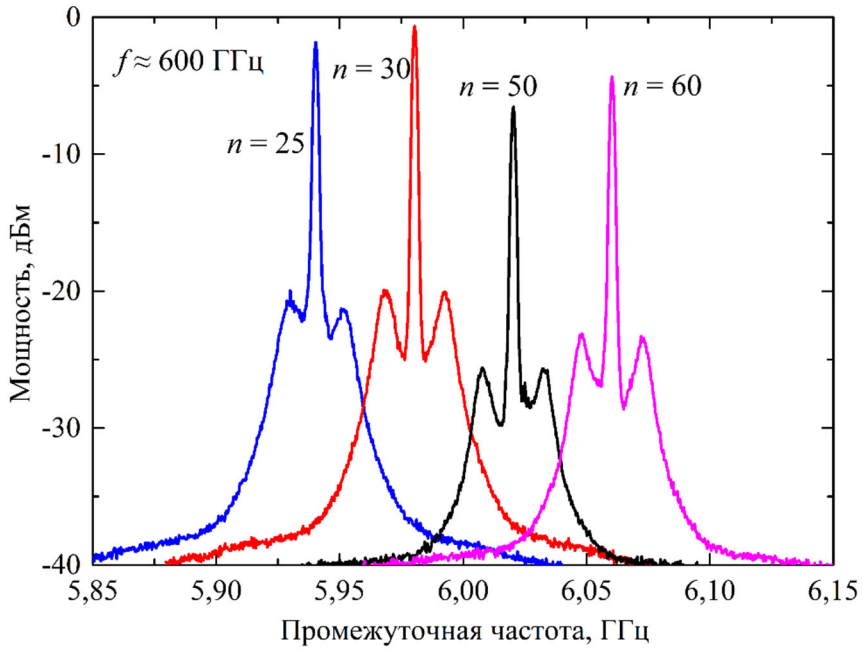
3.7.2. Сравнительный анализ спектральных характеристик

Исследование спектральных характеристик всех трех источников (объектов сравнения) проводилось одинаковым образом – при помощи СИП в полосе ПЧ 4-8 ГГц со спектральным разрешением лучше 0,1 МГц. Схема экспериментальной установки аналогична представленной на рисунке 2.9 для случая разработанного источника на основе РДП, в которой теперь в качестве исследуемого источника устанавливается необходимый объект исследования.

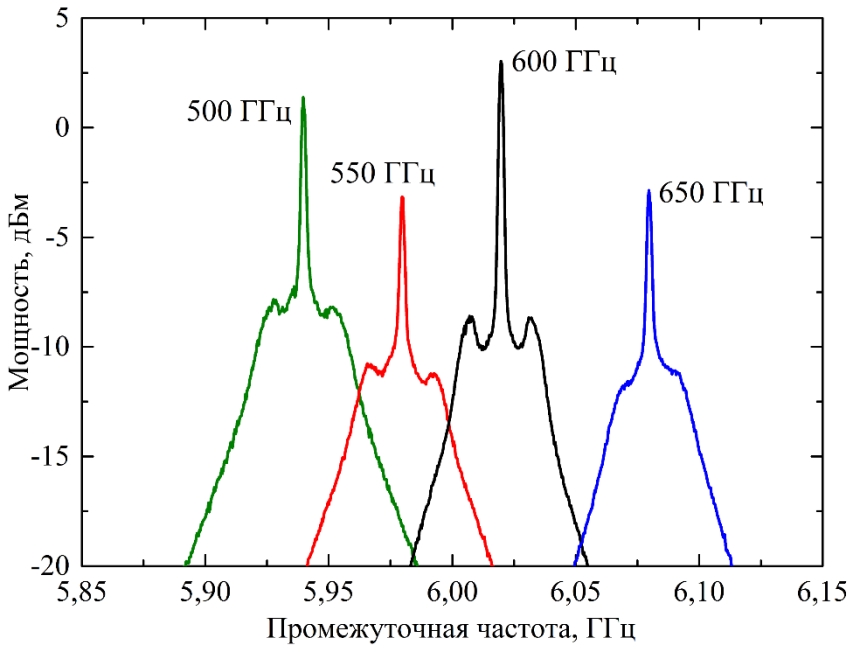
На рисунке 3.34 представлены результаты измерения спектральной формы излучения источников – на четырех частотах от 480 ГГц до 600 ГГц для источника на основе ЛОВ (рис. 3.34 а), на частоте 600 ГГц для разных гармоник умножителя СВЧ (рис. 3.34 б), и на частотах от 500 ГГц до 650 ГГц с шагом 50 ГГц для источника на основе РДП (рис. 3.34 в). Все спектры зарегистрированы при широкой полосе анализа (частотной развертки) используемого анализатора спектра в несколько гигагерц и спектральным разрешением 1,8 МГц для наглядного представления формы регистрируемого сигнала, и показаны в одинаковой полосе анализа шириной 300 МГц.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 3.34 – Серия спектральных линий источников субТГц излучения (а) на основе ЛОВ; все кривые измерены для сигнала 4-й гармоники; (б) на основе умножителя СВЧ на частоте около 600 ГГц для разного номера гармоники *n*: 25, 30, 50 и 60; (в) разработанного в данной работе источника на основе РДП дизайна **АГС-550**. Рабочая частота для всех кривых указана на графиках.

Поскольку регистрируемый сигнал является конволюцией сигналов гетеродина в составе спектрометра и исследуемого источника, то в случае, когда ширина спектральной линии исследуемого источника значительно

меньше ширины линии сигнала гетеродина, форма спектральной линии регистрируемого сигнала фактически повторяет форму линии гетеродина СИП. Именно такой случай наблюдается на рис. 3.34 (а) и (б), поскольку ширина спектральных линий 4-й гармоники ЛОВ и высоких гармоник умножителя СВЧ с номерами от 25 до 60 приблизительно на 1-2 порядка меньше ширины линии гетеродина на основе РДП в режиме фазовой стабилизации. Имеется также особенность на рис. 3.34 а в боковых пиках высотой порядка 10 дБ, отстоящих от несущей частоты выше и ниже нее примерно на 100 МГц; вероятнее всего, это вызвано паразитным прохождением мощных опорных сигналов в СВЧ тракте. Значительное отличие в форме спектра наблюдается на рис. 3.34 в, поскольку регистрируемый спектр является сверткой сигналов двух РДП с близкой формой спектра. Интересно заметить, что характерная ширина автономной линии излучения двух РДП разная при одинаковых (близких) частотах, поскольку РДП в составе исследуемого источника выполнен на основе СИС структуры $Nb/AlO_x/Nb$, в то время как генератор гетеродина выполнен на основе структуры Nb/AlN/NbN. Принципиальное различие этих структур состоит в величине V_g и, соответственно, различной частоте перехода от резонансного режима генерации в режим вязкого потока вихрей. В частности, по этой причине наблюдаются различия в форме в конволюции спектров двух РДП при разных частотах (рис. 3.34 в): спектр на частоте 650 ГГц значительно отличается от остальных представленных наиболее пологой формой «фазовых крыльев» спектра, а сигнал на частоте 550 ГГц отличается пониженным значением отношения мощности сигнал/шум. Ширина зарегистрированных спектральных линий генерации всех исследованных источников с режимом ФАПЧ с учётом конволюции с сигналом гетеродина составила порядка 50-80 кГц, что и является спектральным разрешением СИП (см. рис. 1.23). При этом ширина спектральной линии источника на основе РДП в режиме ФАПЧ составляет величину порядка и более 50 кГц, поскольку именно характеристиками РДП как гетеродина определяется спектральное

разрешение прибора, в то время как фактическая ширина линии источников на основе ЛОВ и умножителя СВЧ составляет величину на 1-2 порядка меньше.

Таким образом, можно утверждать, что все три источника потенциально могут быть использованы в задачах, где ширина линии генерации в стабилизированном режиме порядка 50 кГц является достаточной. Если же требуется спектр источника с характерной шириной в пике порядка единиц килогерц и ниже, то источник на основе РДП на данном этапе развития с использованными в работе системами ЧД, ФАПЧ не подходит для таких задач, а характеристики источников на основе ЛОВ и выходных гармоник умножителя СВЧ требуют дополнительного исследования со спектральным разрешением, превосходящим разрешение СИП.

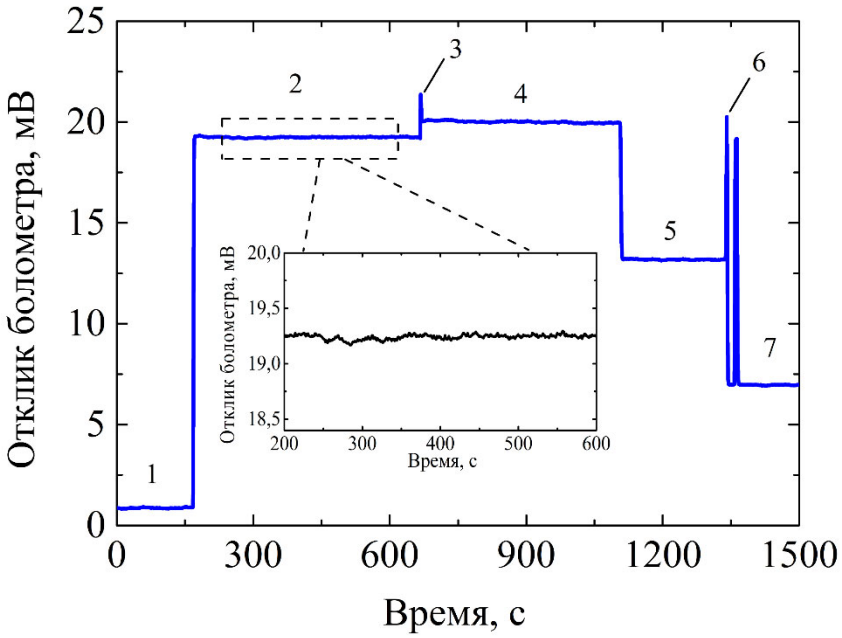
3.7.3. Сравнительный анализ мощности излучения и её временной стабильности

Исследование выходной мощности всех трех источников (объектов сравнения) в некалиброванном режиме проводилось одинаковым образом – при помощи охлаждаемого широкополосного болометра, уже использованного при исследовании РДП в разделе 3.3. Схема экспериментальной установки аналогична представленной на рисунке 2.5 для случая сверхпроводникового источника на основе РДП / BSCCO, в которой теперь в качестве исследуемого источника устанавливается необходимый объект исследования. Поскольку абсолютный уровень мощности РДП приблизительно известен из оценки, проведенной в разделе 3.6 (порядка 1 мкВт), мощность остальных источников можно оценить по соотношению характерной величины прямого отклика болометра при одинаковой методике и параметрах эксперимента.

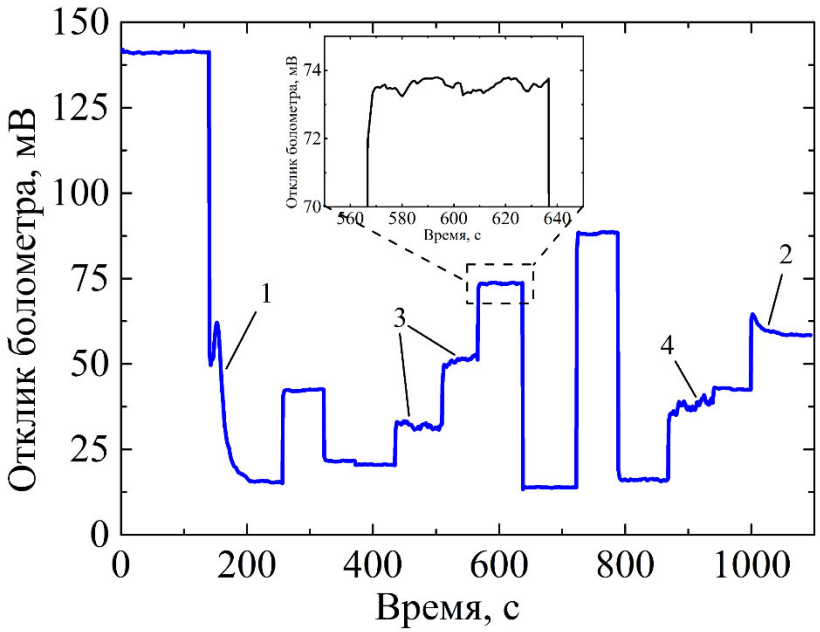
Результаты измерения мощности выходного сигнала при изменении рабочей точки во времени в ручном режиме для источников на основе умножителя СВЧ и РДП представлены на рисунках 3.35 а и 3.35 б,

соответственно. Горизонтальные участки на обоих рисунках соответствуют неизменной рабочей точке источников, т.е. генерации сигнала в неизменном режиме, а вертикальные участки соответствуют моментам мгновенного перестроения рабочей точки. Фоновый сигнал ИК при выбранном режиме измерений и внешних условиях в помещении лаборатории составляет порядка 2 мВ и достаточно стабилен (участок 1 на рис. 3.35 а), при этом полезный сигнал составляет порядка 20 мВ для источника на основе умножителя (участки 2, 4, 5) и порядка 50-100 мВ для источника на основе РДП. Вставка на рис. 3.35 а демонстрирует уровень флуктуаций регистрируемого сигнала на уровне 0,1 мВ, который определяются целым набором флуктуаций в системе: фоновые флуктуации ИК сигнала в пространстве лаборатории, флуктуации мощности базового источника СВЧ, флуктуации рабочей точки болометра, флуктуации частоты оптического прерывателя (около 170 Гц) и, соответственно, опорного сигнала для синхронного детектора, равно как электромагнитные флуктуации в помещении на низкой частоте (около 50 Гц) и в сети ~220 В питания элементов системы. Все или часть перечисленных факторов в той или иной степени влияют (могут влиять) на стабильность регистрируемого сигнала, при этом уровень флуктуаций составил величину, пренебрежимо малую по отношению к полезному сигнала. Вставка на рис. 3.35 б для источника на основе РДП без фазовой стабилизации демонстрирует более высокий уровень флуктуаций (порядка 0,5 мВ), а участки 3 и 4 характеризуются нестабильностью рабочей точки на ВАХ РДП. Поскольку система измерения болометрического отклика для различных источников полностью идентична, можно утверждать, что повышенный уровень флуктуаций сигнала для источника на основе РДП связан исключительно с системой самого источника, а именно с нестабильностью рабочей точки на ВАХ перехода при незадействованной системе ФАПЧ. Интересно отметить также достаточно медленные процессы установления рабочей точки вследствие тепловой релаксации на участках 1, 2 из рис. 3.35 б

после переключения рабочей точки ($I_В$, $V_В$) с сильно изменившимся джоулевым тепловыделением $I_В \times V_В$ в переходе.



(а)



(б)

Рисунок 3.35 – Зависимость сигнала на выходе болометра от времени при облучении субТГц сигналом источников на основе (а) умножителя СВЧ, (б) РДП без системы стабилизации. Вертикальные участки соответствуют моментам переключения рабочей точки. На (а): участок 1 – источник выключен; 2, 4, 5, 7 – различная выходная мощность умножителя, 3 и 6 – «выбросы» в процессе перестроения мощности умножителя в ручном режиме. На (б): участки 1 и 2 – переходные процессы установления рабочей точки на ВАХ РДП вследствие тепловой релаксации, 3 и 4 – нестабильные рабочие точки на ВАХ РДП.

В результате проведенного некалиброванного исследования мощности выходного сигнала субТГц источников на наборе различных выходных частот были получены следующие значения: для источника на основе ЛОВ – характерные значения 10-50 мВ, максимальное значение 57,8 мВ; для источника на основе умножителя СВЧ – характерные значения 10-20 мВ, максимальное значение около 28 мВ; для источника на основе РДП – характерные значения от 20 до 100 мВ в зависимости от экспериментального образца и дизайна, максимальное значение составило около 150 мВ для образца дизайна **ДА-450**. Важно отметить, что регистрируемый сигнал в данном эксперименте в значительной степени зависит как от геометрии излучаемого пучка, так и от диаграммы направленности болометра, которые в данной работе не исследовались. Кроме того, данный эксперимент не различает гармонический состав ТГц сигнала, а интегрирует всю мощность принимаемого излучения, при этом максимум излучения для источников на основе ЛОВ и РДП приходится на основную гармонику, а сигнал на выходе умножителя представляет собой «гребёнку» частот выше 350 ГГц с шагом порядка 20 ГГц, так что мощность сигнала на отдельно взятой частоте неизвестна.

Таким образом, наибольшую мощность ТГц сигнала продемонстрировал источник на основе РДП, а наименьшую – источник на основе умножителя СВЧ. Результат не является показательным в отношении источника на основе ЛОВ, потому что низкая мощность излучения связана исключительно с тем, что регистрация происходила на 4-й гармонике сигнала ЛОВ, а мощность падает с номером гармоники приблизительно как $1/N^2$. При использовании образца ЛОВ с рабочей частотой основного сигнала в «целевой» области эксперимента (400-600 ГГц) результат сравнения мощности оказался бы в пользу ЛОВ. Однако, как было отмечено в обзоре ТГц источников (раздел 1.2), производство ЛОВ ТГц диапазона в настоящее время отсутствует, а действующие образцы были изготовлены более 30 лет назад и сохранились в

крайне ограниченном количестве, т.е. практическая возможность приобретения образца с требуемой спецификацией фактически отсутствует.

3.7.4. Итоги сравнительного анализа и обсуждение

Результаты комплексного сравнительного исследования трех источников с излучением в открытое пространство по всем проанализированным характеристикам представлены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2. Сравнительные характеристики трех источников субТГц, основанных на разных принципах работы

Параметры	**Тип источника**		
	ЛОВ	**Умножитель СВЧ**	**РДП**
Габариты базового модуля (блока) Д×Ш×В, мм	500×360×280	30×20×20	120×45×60
Масса базового модуля (блока), кг	17,4	0,05	0,4
Дополнительные необходимые компоненты	Персональный компьютер / ноутбук	Базовый генератор СВЧ мощностью не менее 10 дБм	Криогенная система 4,2 К; комплексная система питания и управления; источники и усилители СВЧ
Потребляемая мощность, кВт	менее 0,25	Определяется потребляемой мощностью базового генератора; обычно не более 0,3	Определяется потребляемой мощностью дополнительных компонентов; обычно не более 1

Параметры	Тип источника		
	ЛОВ	**Умножитель СВЧ**	**РДП**
Рабочая температура, К	293	293, допускается охлаждение до 4,2	4,2
Возможность интеграции в компактный блок с другими устройствами	Нет	Да	Да, при условии общей криогенной системы
Диапазон выходных частот, ГГц	480-640	от 350 (номера наивысших гармоник не исследовались)	200-750
Ширина спектральной линии в режиме ФАПЧ, кГц	< 50	< 50	~ 50
Характерная выходная мощность в диапазоне до 700 ГГц, отн.ед.	10-50	10-20	20-100
Максимальная зарегистрированная мощность, отн. ед.	57,8	28	150
Прочие особенности	Частота ЛОВ 120-160 ГГц, умножитель частоты ×3-4 на выходе ЛОВ; управление с ПК	Пассивное устройство; «гребенка» частот на выходе; массо-габаритные характеристики определяются базовым генератором	Управление стабилизацией сигнала в ручном режиме с ПК; массогабаритные характеристики определяются вспомогательными компонентами

Таким образом, из трех исследованных ТГц источников в конкретном исполнении наиболее простым в эксплуатации, при этом наиболее маломощным, является умножитель СВЧ на основе сверхрешеток GaAs/AlAs. Основным его преимуществом является компактность и, следовательно, возможность интеграции в единый блок (модуль) другими устройствами. Основным недостатками является низкая выходная мощность и «гребенка» частот на выходе, не позволяющая использовать его в задачах, требующих одночастотного генератора без гармонического состава. Для достижения более высокого уровня мощности требуются усилители СВЧ сигналов до 100 ГГц; альтернативной концепцией с более высоким уровнем выходной мощности являются умножители на диодах Шоттки.

Наиболее сложным технически и в эксплуатационном смысле является источник на основе распределенного джозефсоновского перехода, при этом он обладает наибольшей шириной полосы перестройки рабочей частоты и не имеет «богатого» гармонического состава. Технические требования работы с таким источником включают в себя не только наличие криогенной установки ~4 К, но и низкие шумы в питании основных элементов микросхемы, а также малошумящие усилители СВЧ до 1 ГГц. Другим его преимуществом является возможность интеграции в единую криогенную систему составного устройства. Такая интеграция может быть полезна, например, при исследовании свойств материалов при низких температурах, а также в других криогенных задачах, где требуется источник ТГц излучения.

Компромиссом по общей эргономике между маломощным источником на основе умножителя СВЧ и технически сложным источником на основе РДП является источник на основе ЛОВ. Он достаточно удобен в лабораторных применениях, в которых неважен вес и размер устройства, при этом обладает высокой мощностью и успешно используется для многих задач в ТГц диапазоне частот. В случае использования выходного умножителя частоты данный источник имеет «гребенку» частот на выходе, однако расстояние между соседними частотами для использованного образца составляет

120-160 ГГц (в отличие от ~10-20 ГГц для умножителя СВЧ), что в большинстве случаев не создает технических проблем.

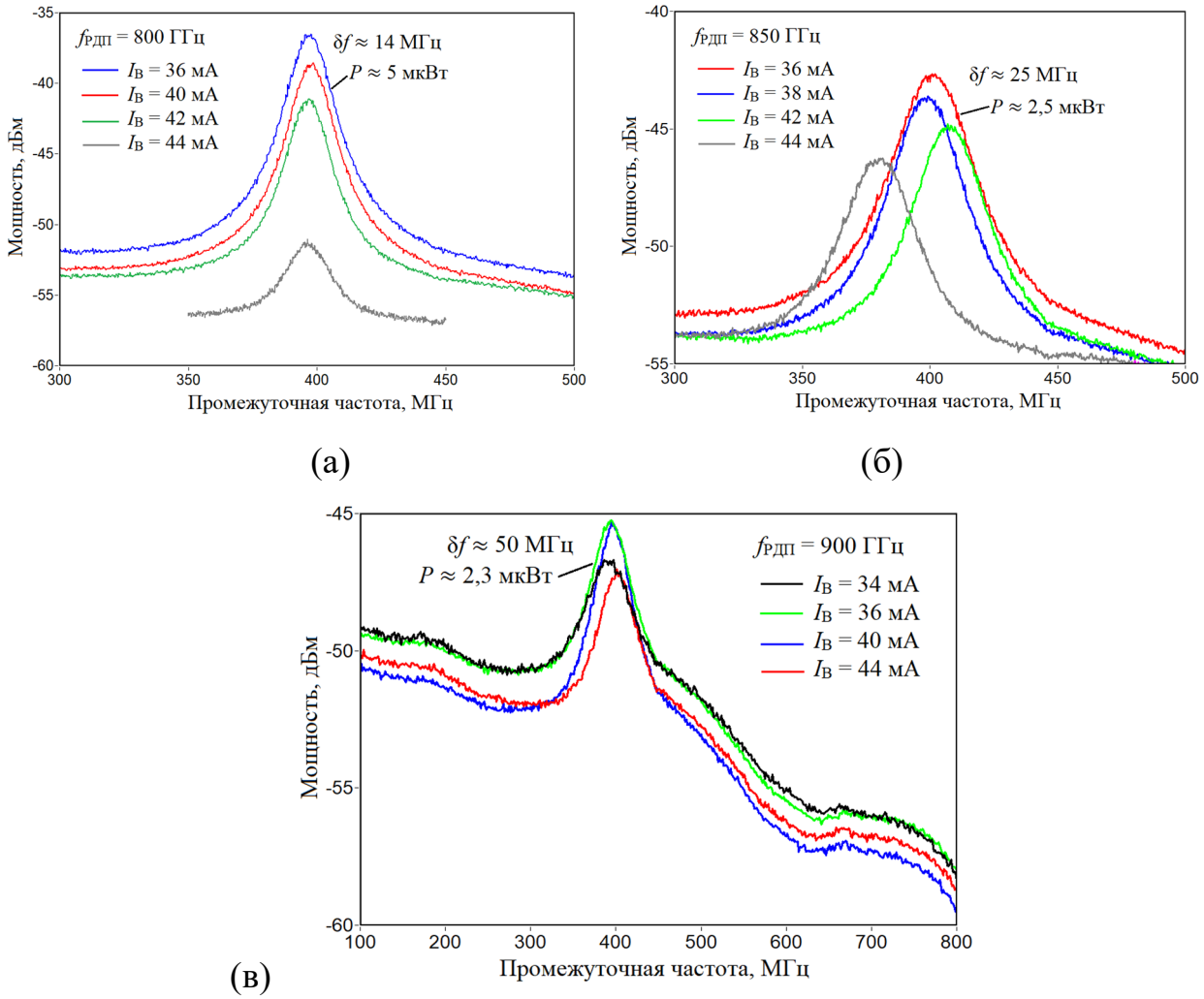
3.8. Вопрос о генерации на частоте выше «щелевой» частоты используемых сверхпроводников

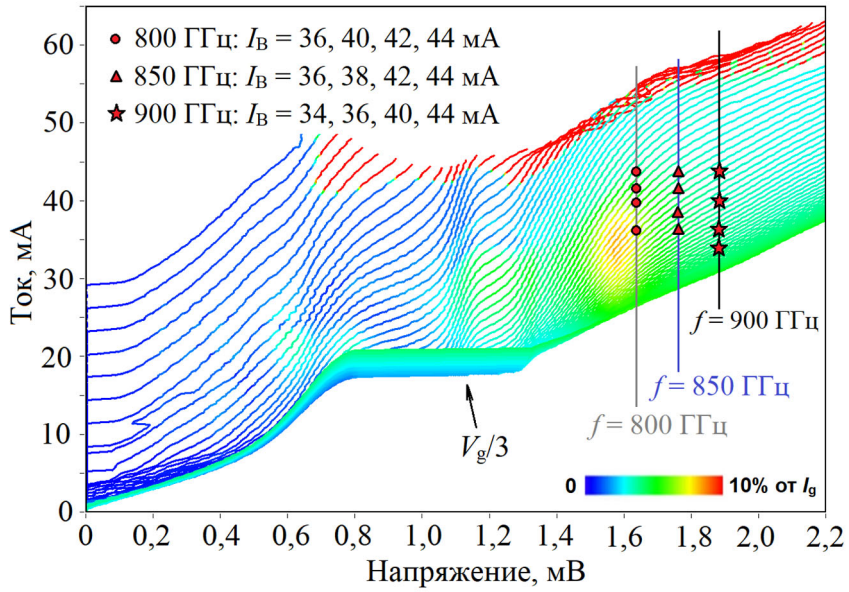
В разделах 3.3, 3.4 была реализована и экспериментально продемонстрирована генерация сигнала РДП на частотах вплоть до 760 ГГц (см. рис. 3.21 и Таблицу 3.1), при этом на частоте 750 ГГц реализована возможность частотной и фазовой стабилизации сигнала. Предельная рабочая частота в данном обусловлена энергетической щелью ниобия (~700 ГГц), из которого состоит как электрод РДП (нижний либо нижний и верхний), так и электроды линии передачи $Nb/SiO_2/Nb$; выше данной частоты сигнал резко затухает в линии передачи. При этом вопрос о наличии генерации самой по себе в джозефсоновском переходе на частотах, превышающих предельную частоту его электрода(-ов), до сих пор является предметом дискуссий.

Для экспериментальной проверки реализации джозефсоновской генерации на частотах выше 750 ГГц специально были разработаны дизайны **А-850** и **АГС-850** с использованием линий передачи $NbTiN/SiO_2/Al$, обладающих предельной частотой ~1,2-1,4 ТГц (см. описание и расчетные характеристики в разделе 3.2.4). Экспериментальные образцы данного дизайна были изготовлены с использованием туннельных структур Nb/AlN/NbN с достаточно высокой плотностью тока j_g~10-15 кА/см^2, с целью генерации как можно более мощного сигнала на высоких частотах с учетом его сильного затухания как в самом переходе, так и в линии передачи.

При исследовании генерации РДП образцов с линиями передачи $NbTiN/SiO_2/Al$ использовались полностью идентичные методы и установки, что и в разделах 3.4.1 (регистрация формы спектра при помощи ГС и цепи обратной связи), 3.3 (прямое детектирование сигнала в открытом пространстве при помощи болометра) и 3.6 (детектирование сигнала в открытом

пространстве при помощи Фурье-спектрометра). При этом генерация РДП на частотах до 750 ГГц была детально исследована и описана в разделах 3.3, 3.4, поэтому данный раздел не описывает генерацию в этой области. Спектры генерации на частотах 800, 850 и 900 ГГц, измеренные в цепи обратной связи с использованием ГС и ЧД, а также рабочие точки на ВАХ образца РДП, соответствующие измеренным спектрам, представлены на рисунке 3.36. Все спектральные характеристики приведены в режиме автономной генерации с частотной стабилизацией, в то время как режим ФАПЧ не представлен из-за слишком широкой линии генерации (процент мощности в центральном пике мал, так что визуально пик практически незаметен). Цветовой палитрой на ВАХ обозначена величина тока накачки ГС: синий цвет – слабая накачка, оттенки зеленого и желтого – средняя накачка, красный – сильная накачка ($\geq 10\%\ I_g$).





(г)

Рисунок 3.36 – Спектры излучения источника дизайна **АГС-850** в автономном режиме генерации на различных рабочих частотах: (а) 800 ГГц; (б) 850 ГГц; (в) 900 ГГц; (г) Серия ВАХ РДП с указанием рабочих точек генерации, соответствующих представленным спектральным характеристикам на (а), (б) и (в).

По спектрам генерации на рис. 3.36 и форме ВАХ в области рабочих точек хорошо наблюдается увеличение ширины линии генерации δf с ростом дифференциального сопротивления R_d. Так, на частоте 800 ГГц $R_d \approx$ 20-24 мОм, $\delta f \approx$ 14 МГц; на частоте 850 ГГц $R_d \approx$ 30-32 мОм, $\delta f \approx$ 25 МГц; на частоте 900 ГГц $R_d \approx$ 40-45 мОм, $\delta f \approx$ 50 МГц; полученные результаты в условиях достаточно больших R_d качественно соответствуют классической зависимости вида (1.22) $\delta f \sim R_d^2$. Также наблюдается падение интегральной мощности сигнала P с ростом частоты, что в целом соответствует ожиданиям по теории Маттиса-Бардина и ранее полученным результатам для частот начиная примерно от 700 ГГц (выше щелевой частоты ниобия), – за счет увеличения потерь в линиях передачи при увеличении частоты. При этом падение мощности сигнала в диапазоне частот от 800 до 900 ГГц не столь значительно в сравнении с падением отношения мощности сигнала к шуму, которое происходит за счет сильного уширения линии и других возможных факторов (например, изменивший коэффициент преобразования смесителя):

так, на частоте 800 ГГц полная мощность сигнала, измеренная в полосе промежуточных частот от 300 до 500 МГц, составила ~5 мкВт, отношение мощности сигнала к шуму – порядка 15 дБ; на частоте 850 ГГц: мощность ~2,5 мкВт, отношение «сигнал-шум» – порядка 10 дБ; на частоте 900 ГГц: мощность ~2,3 мкВт (в полосе ПЧ 300-500 МГц практически не отличается от значения при 850 ГГц), отношение «сигнал-шум» – порядка 5 дБ. Наличие генерации на частоте выше 750 ГГц и её *on-chip* детектирование само по себе является интересным результатом для джозефсоновских переходов на основе ниобия.

На следующем этапе проведено исследование излучения сигнала в открытое пространство. Зависимость отклика болометра от частоты генерации, полученная с использованием экспериментальной установки из раздела 3.3 (схема на рис. 2.5 а) при наборе фиксированных токов смещения I_B, представлена на рисунке 3.37.

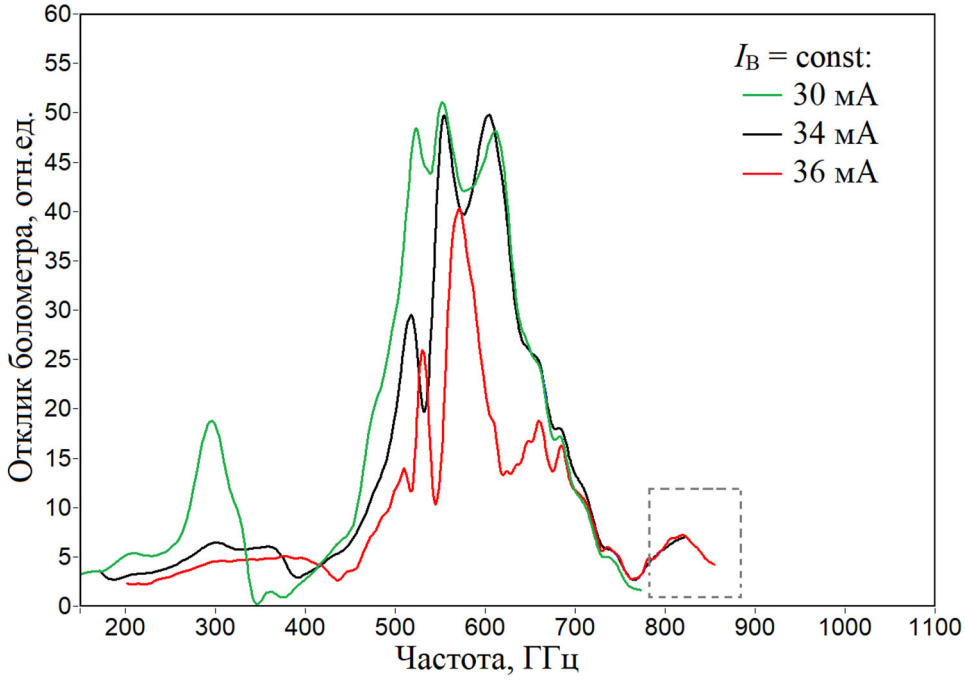


Рисунок 3.37 – Экспериментальные результаты исследования АЧХ излучения в открытое пространство при помощи широкополосного болометра образца дизайна **АГС-850**; перестройка частоты произведена при наборе токов смещения I_B = 30, 34 и 36 мА. Прямоугольной рамкой выделена целевая область частот выше 800 ГГц.

Полученный результат исследования излученного сигнала в открытое пространство для частот ниже 700 ГГц был получен и детально описан для образцов дизайна **АГС-450** и **АГС-550** (см. рис. 3.17 б,в). Пик на АЧХ в окрестности частоты 300 ГГц (при I_B = 30 мА), вероятнее всего, относится к излучению на второй гармонике. Интерес в данном разделе представляет область, в которой наблюдается невысокий пик отклика болометра на частоте в окрестности 820 ГГц (отмечена прямоугольной рамкой на рисунке 3.37). С целью подтверждения истинного излучения в открытое пространство при данных частотах, была проведена попытка регистрации спектра при помощи Фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона. Однако, зарегистрировать сигнал при помощи Фурье-спектрометра на частотах выше 750 ГГц не удалось. Вопрос о том, соответствует ли пик в отклике болометра на частотах выше 800 ГГц истинной джозефсоновской генерации РДП или является «артефактным» эффектом (например, широкополосным ИК сигналом), остаётся открытым и требует более глубокого анализа.

Таким образом, в рамках проведенной работы удалось продемонстрировать слабую генерацию РДП на основе Nb/AlN/NbN в диапазоне 800-900 ГГц методом исследования спектральных характеристик при помощи цепи обратной связи с использованием гармонического смесителя, при этом получить излучение в открытое пространство на частотах выше 800 ГГц на данный момент не удалось.

3.9. Линии передачи NbTiN/SiO_2/Al на частоте выше 1 ТГц и связанные тепловые эффекты в СИС переходах

В предыдущем разделе было продемонстрировано, что генерация сигнала на частотах выше щелевой частоты ниобия (~700 ГГц), принципиально происходит (см. рис. 3.21 и 3.36, Таблицу 3.1), хотя выходной сигнал достаточно слабый из-за высокого затухания внутри самого РДП, который является линией передачи для распространяющейся в нем волны. С

целью проверки пригодности линий передач на основе NbTiN/SiO_2/Al и конструкции антенны для работы на частотах порядка и выше 1 ТГц была разработана, изготовлена и исследована специальная приемная схема на основе СИС переходов, встроенных в идентичные линии передачи NbTiN/SiO_2/Al и антенну близкой конструкции. Идея состоит в том, что разработанная схема изготавливается с использованием полностью идентичной технологии, что и схемы на основе РДП с антенной (дизайны **А-850**, **АГС-850**), поскольку чипы с генератором и приемной схемой физически производятся на одной подложке в едином технологическом цикле.

Схема разработанной конструкции представлена на рисунке 3.38 и состоит из входной щелевой антенны, выполненной в нижнем электроде NbTiN интегральной структуры, двух детекторов, которые выполнены на основе двойного СИС перехода Nb/AlN/NbN площадью 1 мкм^2 каждый, а также исследуемой линии передачи, согласованной с антенной по входу и СИС переходами по выходу. Двойные СИС переходы вместо одиночных используются для увеличения ширины приемной полосы частот за счет взаимной отстройки емкости переходов индуктивностью соединяющей их линии.

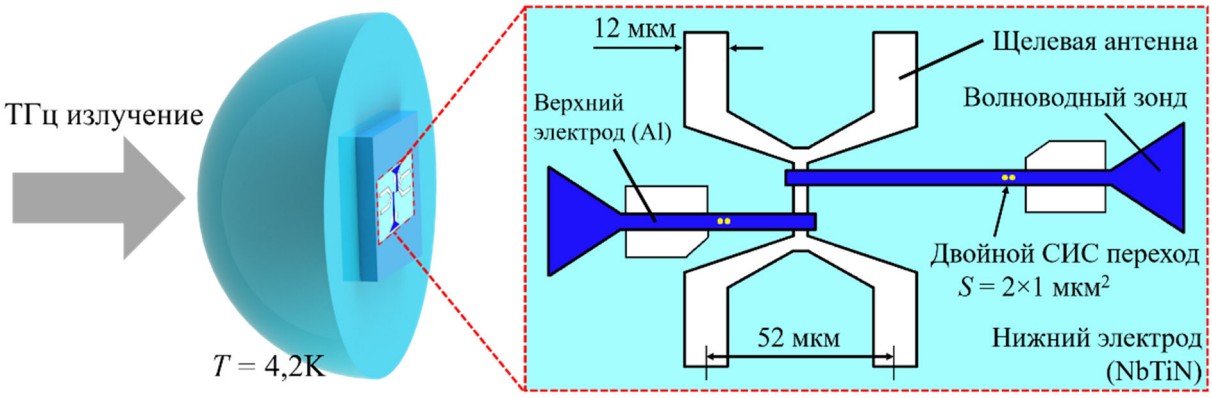


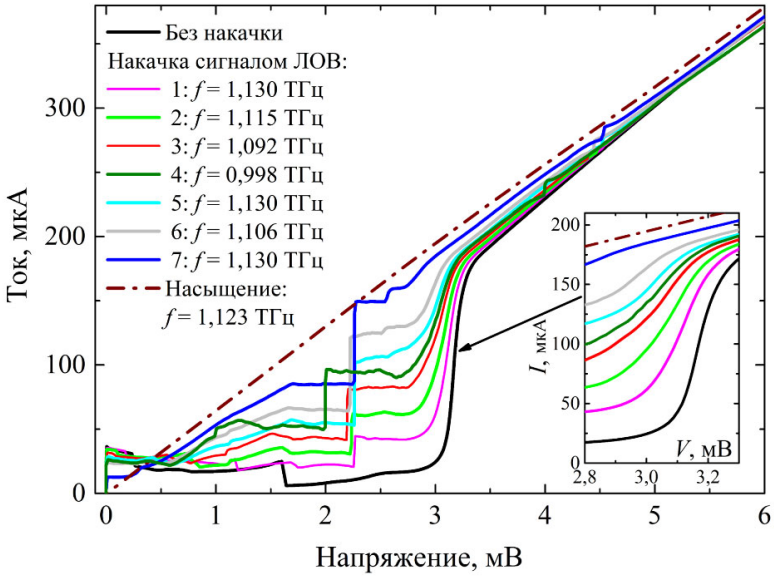
Рисунок 3.38 – Топология сверхпроводниковой интегральной схемы для регистрации внешнего сигнала на ТГц частоте (справа) и схема установки чипа на линзу для формирования приемного тракта (слева). Длина вырезов щелевой антенны составляет 92 мкм (не указана на рисунке).

Детекторы включены в отрезки микрополосковой линии, имеющие длину λ/4 и 3λ/4 (далее – короткая и длинная секции, соответственно), где λ – длина волны света в кремнии (материал подложки), приблизительно равная 87 мкм на расчётной частоте структуры 1 ТГц. Микросхема с интегральной структурой устанавливается в фокусе полуэллиптической кремниевой линзы, что формирует квазиоптический линзово-антенный приемный тракт. Первоначально схема разрабатывалась для определения параметров затухания в линии передачи NbTiN/SiO_2/Al за счет определения и количественного сравнения поглощенной мощности СИС детекторами в короткой и длинной секциях, однако эта идея не была реализована по ряду причин, главная из которых – невозможность корректного сравнения сигнала в секциях из-за нетривиальной работы оптического тракта. Тем не менее, схема позволяет регистрировать внешний сигнал безотносительно количественного сравнения отклика различных секций детектора.

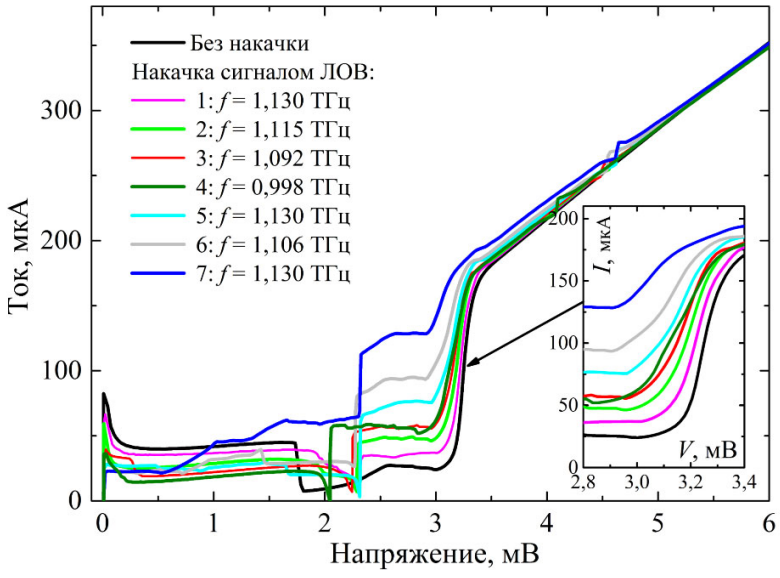
Также следует отметить терминологическую особенность при использовании слова «детектор» по отношению к СИС переходам в данной схеме: технически и технологически, СИС переходы спроектированы и изготовлены как смесители, также как приемный СИС смеситель в составе интегрального приёмника или гармонический смеситель в составе конструкций источника на основе РДП. Однако, в рамках проведенного эксперимента, СИС переходы использовались исключительно как прямые детекторы внешнего одночастотного сигнала, поэтому в данном разделе СИС переходы по тексту будут обозначены как детекторы.

Схема экспериментальной установки и параметры используемого источника на основе ЛОВ представлены в соответствующем разделе 2.4 Главы 2 (рисунок 2.11). Семейства измеренных ВАХ СИС переходов в короткой и длинной секциях при наборе рабочих параметров ЛОВ представлены на рисунке 3.39. Кривые ВАХ на рис. 3.39 (а) и (б), полученные при указанном номере рабочей точки ЛОВ, измерены одновременно и независимо на разных детекторах, при этом для удобства выбран такой набор кривых, который демонстрирует возможность накачки СИС детекторов в широком диапазоне по мощности: от тока накачки порядка 0,1-0,2·I_g до

значений насыщения по накачке, когда ВАХ становится прямой линией. Различный уровень мощности накачки на одной частоте 1,130 ТГц (для рабочих точек с номерами 1, 5 и 7) достигался дополнительной установкой одного и двух слоев поглотителя в оптическом тракте. Вставками на рис. 3.40 выделена область сверхпроводящей щели СИС перехода в увеличенном масштабе, из них видно достаточно заметное уменьшение значения V_g ростом мощности накачки.



(а)



(б)

Рисунок 3.39 – Серия ВАХ СИС детекторов в короткой (а) и длинной (б) секциях без воздействия и с воздействием сигнала внешнего источника (ЛОВ) различного уровня мощности и на различных частотах. Параметры ЛОВ в рабочих точках, обозначенных одинаковыми номерами от 1 до 7, идентичны для (а) и (б).

Воздействие внешним излучением на СИС детектор с неподавленным критическим током приводит к появлению двух серий ступеней туннельного тока: ступени Шапиро и ступеней квазичастичного тока. Для всех кривых под воздействием излучения на рис. 3.39 наблюдается четко выраженная первая ступень Шапиро при напряжениях в диапазоне 2–2,25 мВ, а также слабо выраженная вторая ступень на нормальном участке ВАХ при напряжениях около 4–4,5 мВ. Положение ступеней в точности соответствует частоте ЛОВ 0,998 – 1,13 ТГц при пересчете из соотношения Джозефсона с константой 483,6 ГГц/мВ. Наличие ступеней Шапиро значительно затрудняет определение параметров перехода при его накачке (таких, как ток накачки I_p и ток утечки при данном значении температуры перехода) и, следовательно, определение мощности накачки P_{SIS}, поэтому для подавления критического тока была специально изготовлена и смонтирована сверхпроводящая катушка (детальное описание катушки приведено в разделе 2.4). Предельный задаваемый ток через катушку позволил подавлять критический ток СИС переходов примерно на 85% (с ~80 мкА в «неподавленном» случае до 12 мкА в «подавленном»), что существенно улучшило точность результатов при определении параметров накачки внешним ТГц сигналом. Оценка мощности накачки СИС перехода P_{SIS} по величие квазичастичного тока I_p в случае с подавленным критическим током проводилась по методике, подробно описанной в разделе 3.5 при оценке мощности накачки гармонического смесителя сигналом РДП, и представлена на рисунке 3.40 для детектора в короткой секции.

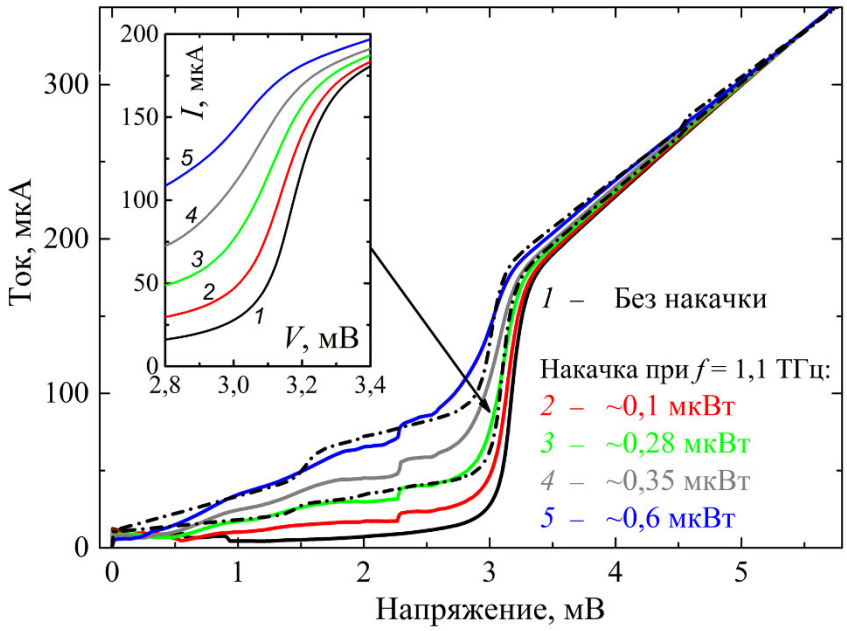
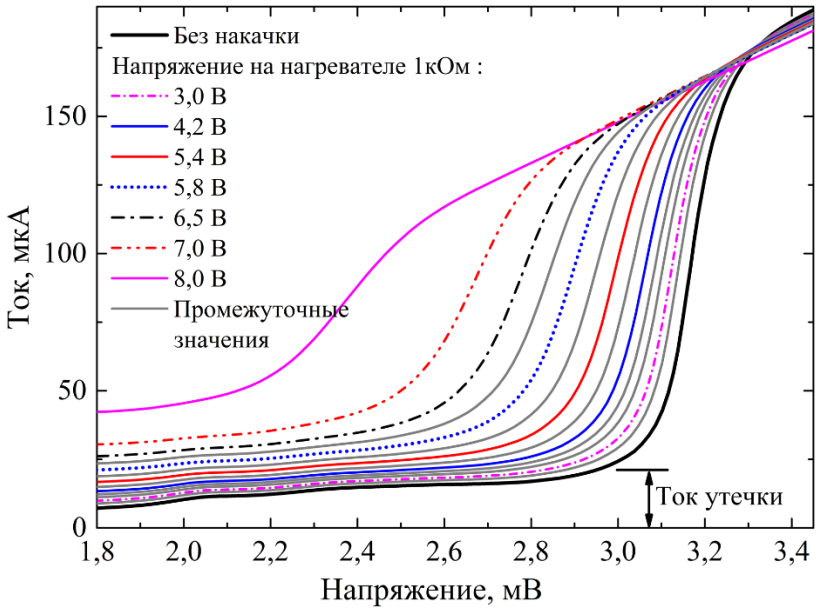


Рисунок 3.40 – Серия ВАХ СИС перехода в короткой секции с подавлением критического тока без воздействия (кривая 1) и с воздействием сигнала ЛОВ на частоте 1,1 ТГц (кривые 2-5) при разных уровнях мощности. Указанный в легенде уровень поглощенной мощности P_{SIS} вычислен с использованием соотношений Такера и Фелдмана [67]. Штрихпунктирными линиями приведены аппроксимации кривых 3 и 5 (выборочно) при помощи модели Такера и Фелдмана.

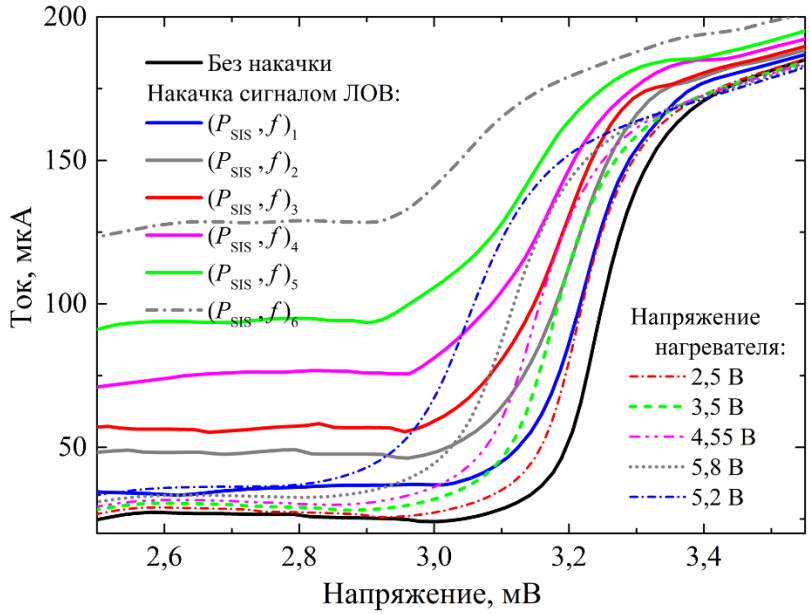
Понижение энергетической щели СИС перехода V_g при воздействии на переход мощным ТГц сигналом (см. вставки на рис. 3.39, 3.40) может быть вызвано как физическим нагревом из-за разрыва куперовских пар внутри электрода(-ов), так и изменением локальной функции распределения электронов $f_e(E)$ по энергиям E, которая неявно входит в выражение определения энергетической щели [185-186]. Так, на рисунках 3.39, 3.40 понижение $V_g \approx 3{,}2$ мВ составляет от 0,03 до ~0,2 мВ при больших мощностях накачки, или порядка 10^{-2} в относительном выражении. В работе **[A34]** были построены скоростные уравнения Ротфарфа-Тейлора, описывающие эволюцию во времени числа (неравновесных) электронов и фононов с энергией, превышающей $2\Delta_{Nb} \approx 2{,}8$ мэВ, а в работе **[A33]** было показано, что туннельный переход может значительно перегреваться относительно прилегающего алюминиевого электрода линии передачи, что вызвано, в том

числе, локализацией места релаксации энергии неравновесных квазичастиц внутри перехода.

Для демонстрации того, что влияние мощного ТГц сигнала на величину и форму энергетической щели СИС перехода качественно такое же, как влияние нагрева без воздействия ТГц сигналом, был проведен дополнительный эксперимент по измерению ВАХ СИС перехода при различной мощности теплового нагрева в широком диапазоне температур (накачка на высокой частоте при этом отсутствовала). Для этого в непосредственной близости с интегральной микросхемой был установлен нагревательный резистивный элемент с сопротивлением около 1 кОм. На рисунке 3.41 а представлена серия ВАХ СИС перехода в короткой секции при различном уровне нагрева: подаваемое напряжение на нагревательный элемент составило до 8 В, при дальнейшем увеличении нагрева форма ВАХ становится практически линейной, что свидетельствует о температуре T, близкой к критической температуре перехода в нормальное состояние T_c. Практически идентично выглядит серия ВАХ для перехода в длинной секции, поскольку температура переходов абсолютно одинакова в двух секциях и равна температуре подложки микросхемы. Затем кривая ВАХ без воздействия внешнего ТГц сигнала, соответствующая той же температуре, к которой привел нагрев от воздействия сигналом, определяется методом сопоставления кривых, как продемонстрировано на рисунке 3.41 б. Так, для детектора в длинной секции из рис. 3.41 б установлено, что кривой ВАХ с накачкой сигналом ЛОВ в рабочей точке $(P_{SIS}, f)_1$ соответствует V_g = 3,21 мВ, $(P_{SIS}, f)_2$ – V_g = 3,17 мВ, $(P_{SIS}, f)_3$ – V_g = 3,15 мВ, $(P_{SIS}, f)_4$ – V_g = 3,11 мВ, $(P_{SIS}, f)_5$ – V_g = 3,04 мВ, при этом V_g в автономном режиме составляет 3,24 мВ. Такое сопоставление кривых позволяет, в частности, корректно определять ток утечки СИС перехода при текущем фактическом значении температуры, как показано на рис. 3.42 а, а также более точно определять V_g (при мощной накачке непосредственно из кривой ВАХ это затруднительно), для дальнейшего вычисления мощности накачки P_{SIS}.



(а)



(б)

Рисунок 3.41 – (а) Серия ВАХ СИС детектора в короткой секции при различных температурах, зависящих от подаваемого напряжения на нагревательный элемент. Для простоты значение напряжения на нагревателе обозначено лишь для некоторых кривых с шагом около 1 В. (б) Результаты сопоставления кривых ВАХ с воздействием внешнего ТГц сигнала (без подогрева) и кривых ВАХ с подогревом (без воздействия внешнего сигнала).

Следует отметить, что данная методика определения тока утечки и уточненного значения V_g применима для накачки СИС перехода вдали от режима насыщения, когда I_p составляет не более чем 0,5–0,7 I_g. Приграничную

зону применимости данного метода демонстрирует, например, на рис. 3.41 б кривая накачки для $(P_{SIS}, f)_5$ и соответствующая ей кривая при напряжении нагревателя 5,2 В. В указанном случае кривая ВАХ под действием нагрева не накладывается непосредственно на кривую ВАХ под действием ТГц сигнала ЛОВ, но скорее является её зрительным продолжением с такой же крутизной сверхпроводящей щели. При накачке, близкой к насыщению, например, из рис. 3.41 б для рабочей точки $(P_{SIS}, f)_6$, определить ток утечки и V_g таким способом невозможно.

На основе вычисленных значений мощности накачки СИС перехода, а также с учетом геометрии экспериментальной схемы и физических параметров тонких пленок и материалов, в работе **[A33]** нами была построена и решена численно-аналитическая модель, описывающая как различные механизмы нагрева СИС перехода и линий передачи – постоянным и высокочастотным током, так и различные каналы отвода тепла – в область перехода, в линию передачи, в подложку. Геометрия построенной задачи о распределения температуры в системе (на основе уравнения теплопроводности) приведена на рисунке 3.42. Один из ключевых результатов решения данной задачи заключается в том, что рождаемые под действием ТГц излучения неравновесные квазичастицы в ниобии (электрод СИС перехода), обладающие энергией выше энергетической щели материала Δ, имеют короткое время жизни до релаксации с испусканием фононов и не успевают выйти в электрод линии передачи. Вследствие этого переход локально перегревается относительно линии передачи, как показано на рисунке 3.43.

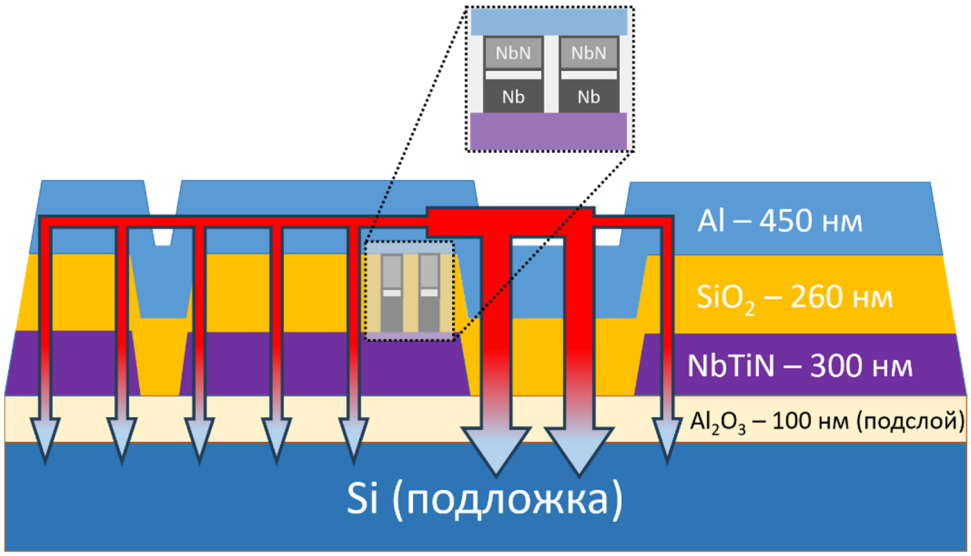


Рисунок 3.42 – Схематичное изображение геометрии исследуемого образца – сечение многослойной структуры в направлении линии передачи. Указаны материалы слоев и их толщины. Стрелками показаны потоки тепла; толщина стрелок условно обозначает величину потока в каждой области. Вставкой по центру показан двойной СИС переход.

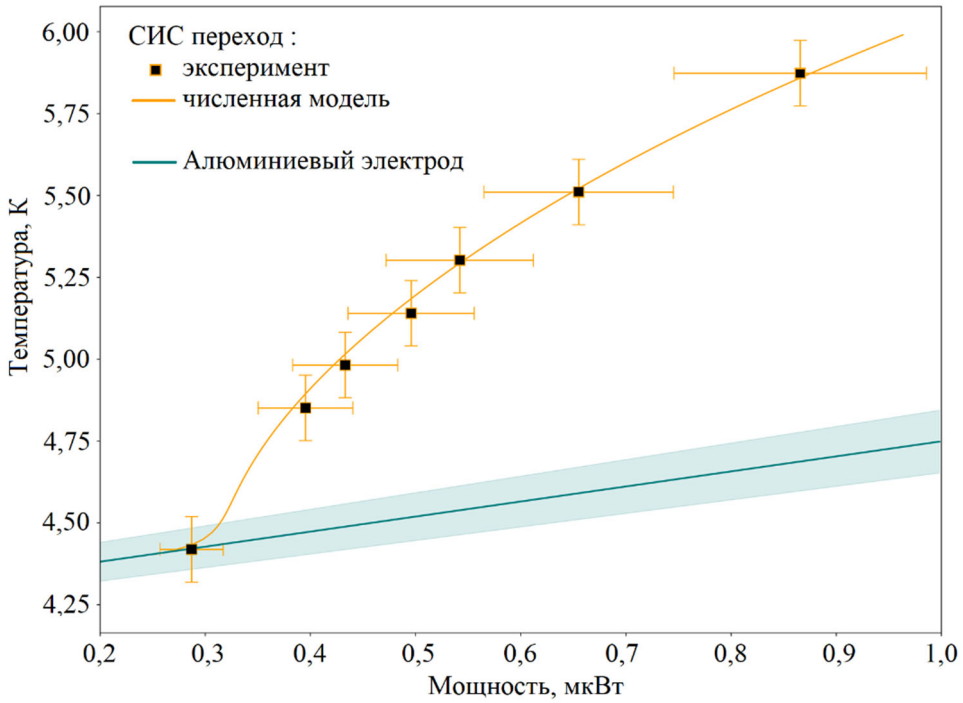


Рисунок 3.43 – Зависимость температуры СИС детектора (квадраты – экспериментальные результаты; сплошная кривая – аппроксимация согласно построенной численно-аналитической модели) и температуры алюминиевого электрода в непосредственной близости к СИС детектору (прямая линия с «коридором» погрешности) от полной выделяемой мощности, состоящей из мощности по постоянному току и поглощенной мощности ТГц сигнала P_{SIS}. Планки погрешностей определяются точностью аппроксимации ВАХ детектора модельными кривыми (см. рисунок 3.40).

Основной вклад в построение и решение модели о выделении и распределении тепла принадлежит Хану Ф.В., поэтому в рамках диссертации сама модель детально не приводится, а результаты и положения, связанные с решением задачи о выделении и распределении тепла в системе, не выносятся автором на защиту. За детальным описанием модели следует обращаться непосредственно к статье **[A33]**.

Однако, в контексте диссертационного исследования о джозефсоновской генерации следует отметить важный вывод. Напомним, что исследование эффективности линий передач на основе $NbTiN/SiO_2/Al$ на частотах порядка 1 ТГц проводилось в рамках задачи вывода излучения РДП в частотном диапазоне выше 750 ГГц из области перехода в открытое пространство. Поскольку туннельный переход значительно греется под воздействием внешнего сигнала на частоте, превышающей щелевую частоту его электрода(-ов), **предельная частота (предельные условия)** для джозефсоновской генерации может определяться не только параметрами электродов РДП в качестве линии передачи для генерируемого сигнала, но и **тепловым самовоздействием перехода сигналом собственной генерации** – аналогично эффекту самонакачки, но с критическим для генерации повышением температуры.

3.10. Выводы главы

В данной главе разработан и комплексно исследован практичный лабораторный источник субТГц диапазона с сигналом излучения в открытое пространство на основе распределенного джозефсоновского перехода. Основные полученные результаты главы:

1. Предложена и практически реализована концепция сверхпроводникового источника субТГц диапазона, работающего при температуре 4,2 К и излучающего сигнал в открытое пространство, на основе нестационарного эффекта Джозефсона в распределённом джозефсоновском

СИС переходе $Nb/AlO_x/Nb$ или Nb/AlN/NbN. Вывод излучения в открытое пространство реализован при помощи передающей щелевой антенны, согласованной с генератором посредством микрополосковой линии передачи. В данной конструкции реализована частотная стабилизация и фазовая стабилизация генератора к внешнему опорному сигналу при помощи гармонического СИС смесителя, расположенного на одной микросхеме с генератором и антенной.

2. Разработан, изготовлен и исследован источник с излучением сигнала в открытое пространство на основе РДП в различных конструкциях, рассчитанных на различные частотные диапазоны – 250 – 410 ГГц, 330 – 570 ГГц и 390 – 700 ГГц (центральная частота около 300 ГГц, 450 ГГц и 550 ГГц, соответственно). Разработаны и апробированы два различных способа возбуждения щелевой антенны с использованием одного и двух отрезков микрополосковой линии; в общей сложности исследовано 10 различных интегральных конструкций с условными обозначениями А-300, АГС-300, А-450, АГС-450, А-550, АГС-550, ДА-450, ДАГС-450, А-850 и АГС-850. Разработанные конструкции интегрально покрывают общий частотный диапазон от 250 до 750 ГГц с возможностью частотной и фазовой стабилизации сигнала. Реализована непрерывная перестройка частоты генератора в рабочем диапазоне.

3. Спектральные линии излучения генератора исследованы двумя независимыми способами – как через цепь обратной связи с использованием гармонического смесителя, частотного детектора и системы ФАПЧ без вывода излучения в открытое пространство, так и непосредственным измерением сигнала на субТГц частоте при помощи СИС приемника высокого разрешения. Результаты измерений спектра излучения двумя способами совпадают с точностью до искажений, вносимых спектром гетеродина приемной системы, отличным от δ-функции, а также спектром *N*-й гармоники опорного СВЧ генератора. Показано, что квазиоптический тракт излучения в открытое пространство не вносит искажений в форму спектральной линии.

Спектральная линия излучения в открытое пространство имеет лоренцеву форму с шириной от долей до десятков МГц, при этом наименьшая ширина реализуется в резонансной области ВАХ с низкими потерями в электродах, а наибольшая (порядка и более 10 МГц) – в области ВАХ с высокими потерями, где реализуется режим вязкого течения вихрей.

4. Мощность излучения в открытое пространство разработанного генератора на основе РДП оценена при помощи высокочувствительного охлаждаемого полупроводникового болометра на основе кремния и составляет от сотен нВт до единиц мкВт в диапазоне от 250 до 750 ГГц в зависимости от конструкции генератора, рабочей частоты и рабочей точки на ВАХ. Максимальное значение получено на частоте 340 ГГц и составило около 3,3 мкВт.

5. Проведено прямое экспериментальное наблюдение гармоник джозефсоновской генерации источника на основе РДП при помощи двух различных методик – широкополосного Фурье-спектрометра на основе оптического интерферометра Майкельсона и спектрометра высокого разрешения на основе СИС приемника. При помощи Фурье-спектрометра проведено наблюдение второй и третьей гармоник, доказана истинность наблюдаемой генерации гармоник серией специальных экспериментов. При помощи СИС приемника исследованы спектральные характеристики второй гармоники с разрешением лучше 0,1 МГц. Получено соотношение между шириной спектральной линии второй и первой гармоник около 4, что соответствует теоретическому значению.

6. Проведено исследование эффективности работы линий передачи на основе NbTiN/SiO_2/Al на частотах порядка и выше 1 ТГц в составе приемной интегральной структуры на основе СИС детектора и щелевой антенны. Показано, что линии передачи NbTiN/SiO_2/Al способны эффективно передавать сигнал на частоте, по меньшей мере, до ~1,1 ТГц, однако в структурах с такими линиями передачи и встроенными СИС переходами,

имеющими электрод из чистого ниобия, значительно возрастает роль тепловых механизмов на частотах выше щелевой частоты ниобия (~700 ГГц).

Все полученные результаты опубликованы в работах: [**A1, A4, A6, A8, A10, A11, A13, A15, A16, A33, A34, A36, A37, A38, A39, A41, A42, A43, A44**].

Все приведенные в данной главе результаты получены автором лично либо с определяющим вкладом автора. Непосредственное численное моделирование интегральных схем (топологий) РДП с передающей антенной и гармоническим смесителем, а также схем с приемным СИС детектором и антенной (часть разделов 3.2, 3.9) проведено Рудаковым К. И. Непосредственное построение и решение численно-аналитической модели выделения и распределения тепла в приемной интегральной схеме (часть раздела 3.9) проведено Ханом Ф. В. Изготовление экспериментальных образцов, использованных в данной главе, проведено группой технологов – Филиппенко Л.В., Чекушкиным А.М., Фоминским М.Ю., с использованием уникальной научной установки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН «Криоинтеграл» - Технологического и измерительного комплекса для создания сверхпроводниковых наносистем на основе новых материалов.

Глава 4

Исследование генераторов на основе массивов джозефсоновских контактов с излучением сигнала в открытое пространство

В настоящей главе проведены исследования двух других типов джозефсоновских генераторов, альтернативных одиночному распределенному СИС переходу, – на основе массивов джозефсоновских переходов. Разделы 4.1, 4.2 посвящены исследованию характеристик и анализу динамики генераторов на основе слоистых монокристаллов $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$, в которых «многослойный» массив джозефсоновских контактов образован на кристаллическом уровне (см. обзор в разделе 1.3.4). Раздел 4.3 посвящен исследованию спектральных характеристик генератора на основе цепочек джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb. Терминологически, одномерный массив контактов в монокристалле BSCCO возможно было бы также называть «цепочкой» (по аналогии с традиционными цепочками переходов, изготовленных на микросхеме по фотошаблону), но в русскоязычной литературе устоялся термин «массив» применительно к такому генератору, а уточненный термин «меза» сразу обозначает геометрическую конструкцию и в большинстве случаев применятся именно для BSCCO. В англоязычный же терминологии, для обозначения массива джозефсоновских переходов в монокристалле BSCCO используется *stack of intrinsic Josephson junctions* (*stack* переводится как «стопка» и, подобно термину «меза», сразу подразумевает геометрическую конструкцию), в то время как для цепочек СИС переходов, изготовленных по фотошаблону, используется *array of Josephson junctions*. В настоящее время, обе обозначенные концепции субТГц/ТГц генератора не достигли уровня практического применения в составе какого-либо действующего инструмента/устройства, подобно РДП, однако исследования и разработки, идущие в мире широким фронтом, направлены на освоение таких источников с целью практического внедрения.

4.1. Исследование ВТСП генераторов на основе $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$

Практически сразу после экспериментального наблюдения мощного ТГц излучения в структурах BSCCO [27], в начале 2010-х годов образовалось много независимых научных групп в ведущих институтах и университетах по всему миру [187-189], активно занявшихся исследованиями таких структур с целью создания практических ТГц генераторов на их основе. К наиболее известным из них, в частности, следует отнести научные группы из следующих ведущих организаций: Университет Цукубы (г. Цукуба, Япония), Национальный институт материаловедения (г. Цукуба, Япония), Университет Киото (г. Киото, Япония), Нанкинский университета (г. Нанкин, Китай), Измирский технологический институт (г. Измир, Турция), Университет центральной Флориды (г. Орландо, США), Аргоннская национальная лаборатория (г. Лемонт, США), Тюбингенский университет (г. Тюбинген, Германия), Ульмский университет (г. Ульм, Германия) и другие. Многие группы естественным образом объединяются в крупные научные коллаборации с целью расширения технологических и экспериментальных возможностей.

Одной из лидирующих научных групп по разработке генераторов на основе BSCCO является объединенная группа исследователей из Нанкинского университета, Национального института материаловедения (Япония) под руководством проф. Хуабин Ванга и исследователей из Тюбингенского университета под руководством проф. Рейнолда Кляйнера. Для проведения измерений спектральных характеристик излучения BSCCO с высоким разрешением в ТГц диапазоне частот к коллективу присоединилась группа Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва) в лице диссертанта и коллег, поскольку в распоряжении группы имеется ТГц спектрометр высокого разрешения на основе сверхпроводникового интегрального приемника.

Все образцы генераторов на основе высокотемпературного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$, использованные в данной Главе, были изготовлены иностранными коллегами и любезно предоставлены для совместных исследований.

4.1.1. Описание конструкции генератора и его вольтамперные характеристики

В современных работах используются различные конструктивные реализации генератора, в том числе, с использованием двух слоев золота – сверху и снизу рабочей части монокристалла – с целью улучшения отвода тепла (напр., **[A23, A31]**), а также с использованием второй подложки, приклеенной к верхнему слою золота (напр., **[A27, A29]**), для достижения максимальной эффективности охлаждения. В данном разделе использованы экспериментальные образцы с наиболее традиционной конструктивной реализацией, показанной на рисунке 4.1. Образец генератора формируется путем вытравливания в массивном кристалле прямоугольной структуры в форме мезы при помощи фокусированного ионного пучка, после чего на поверхность мезы и базовый кристалл напыляются контактные площадки из золота. Критическая температура сверхпроводящего перехода для использованных образцов составляла примерно 80-90 К. Управление смещением генератора осуществляется по 4-контактной схеме ($+I$, $+V$, $-I$, $-V$) с использованием трех проводов, как показано на рис. 4.1.

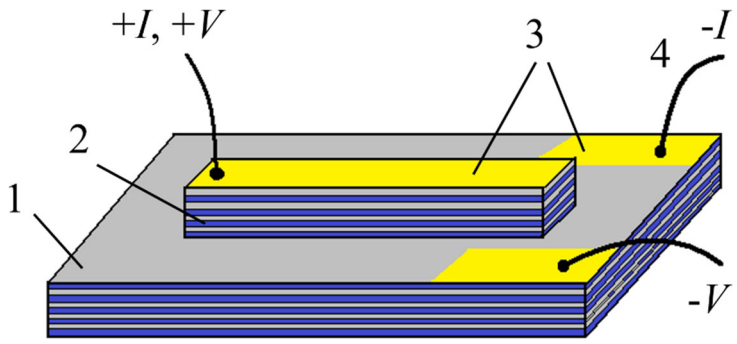
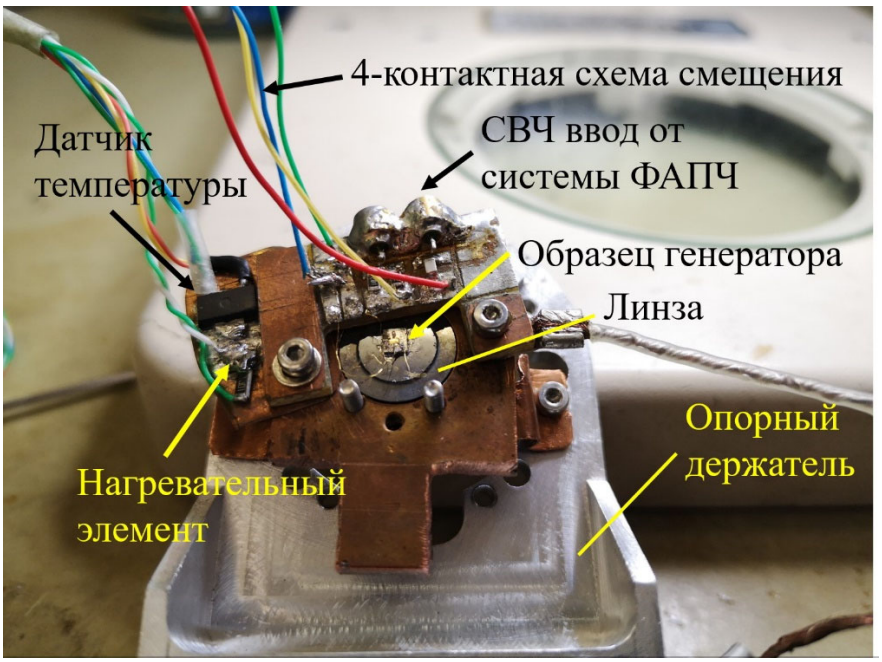
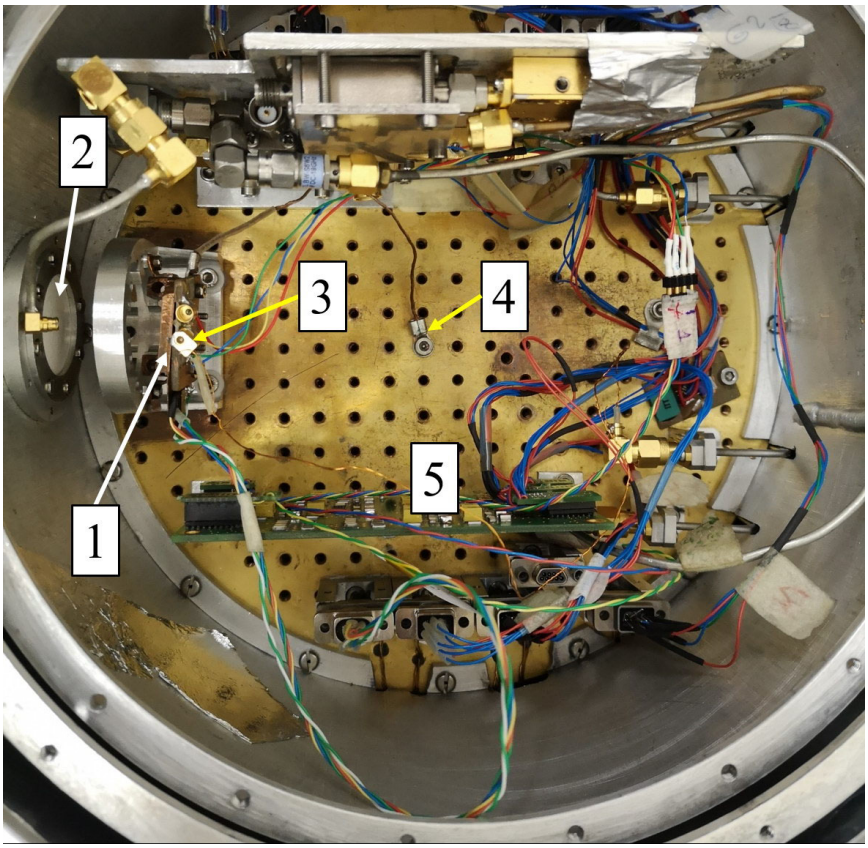


Рисунок 4.1 – Схематичное изображение генератора на основе BSCCO: 1 – базовый монокристалл, 2 – меза с размерами 330 × 50 мкм, 3 – контактные площадки из золота, 4 – проволоки для соединения с измерительной платой.

Подложка с образцом генератора устанавливается на кремниевую линзу для фокусировки выходного пучка; фотографии криогенного модуля генератора показаны на рисунке 4.2. Смещение генератора проводилось в режиме задания тока через структуру и измерения напряжения. Для максимального снижения внешних флуктуаций в системе управления по постоянному току использован блок с аккумуляторными батареями, обладающими низким уровнем собственных шумов, что позволяет избежать технических низкочастотных шумов, в частности, сетевых наводок 50 Гц. Дополнительно используется охлаждаемый низкочастотный фильтр на 4,2 К ступени криостата. Для возможности задания и контроля температуры генератора на держатель образца были смонтированы нагреватель (резистор с номинальным сопротивлением 1 кОм) и платиновый датчик температуры. Таким образом, в системе имелась возможность регулировать температуру в достаточно широких пределах: от 4,2 К до ~100 К.



(а)



(б)

Рисунок 4.2 – (а) Фотография криогенного модуля генератора на основе BSCCO в сборе. (б) Фотография криогенного модуля генератора, установленного на охлаждаемой плите заливного криостата: 1 – криогенный модуль с держателем, 2 – выходное окно криостата; 3 – СВЧ ввод из тракта обратной связи с системой ФАПЧ, 4 – медный хладопровод, 5 – плата смещения по постоянному току с низкочастотными фильтрами.

Вольтамперные характеристики генератора при различных температурах представлены на рисунке 4.3. Скачок на резистивную ветвь ВАХ происходил при токах смещения около 25 мА, при этом форма характеристики имеет типичный для туннельных переходов гистерезис; направления гистерезиса указаны стрелками. Наклон сверхпроводящей ветви ВАХ обусловлен 3-проводной схемой задания тока и контактным сопротивлением около 3 Ом. На ВАХ имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, обусловленный нагревом образца и изменением щелевого напряжения джозефсоновских переходов в массиве. Нагрев мезы также способствует возникновению «горячего пятна», размер которого меняется в зависимости от рабочей точки на ВАХ (напр., [29]). Следует также отметить, что рис. 4.3 демонстрирует общий вид ВАХ BSCCO при измерении в широком диапазоне токов, при этом полная картина является более сложной и содержит большое количество резистивных ветвей, поскольку положение рабочей точки зачастую зависит от того, по какому «пути» (в смысле значений *I, V*) производилось смещение перехода в данную точку. Такая особенность ВАХ обусловлена системой из большого числа переходов, из которых разное количество находится в сверхпроводящем состоянии на различных участках характеристики и потому дает вклад в общее напряжение мезы.

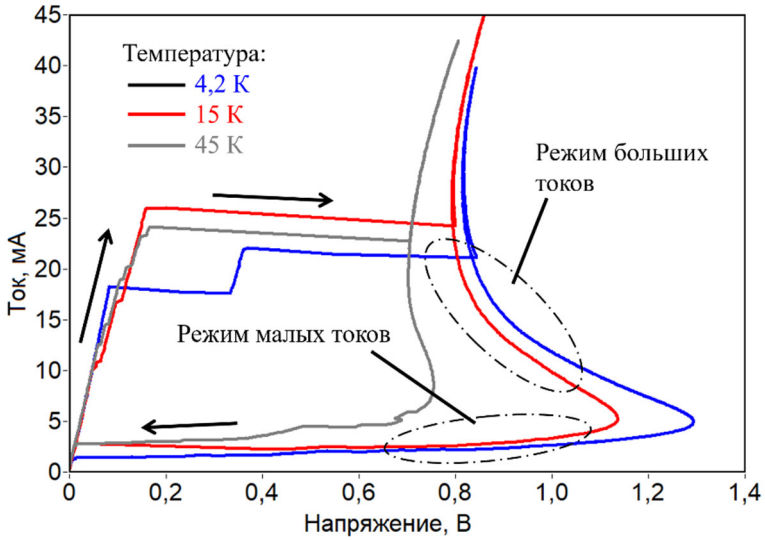


Рисунок 4.3 – Вольтамперные характеристики генератора на основе BSCCO при различных температурах. Стрелки указывают направление гистерезиса при измерении ВАХ.

Исследование рабочих областей генерации излучения традиционно демонстрирует два режима работы BSCCO: при значениях тока выше максимума по напряжению (режим «больших токов») и ниже этого максимума (режим «малых токов»). Далее по тексту будут использованы сокращения для обозначения режимов работы: режим БТ (для **б**ольших **т**оков) и МТ (для **м**алых **т**оков), в частности, для упрощения подписей на графиках. Исторически, в первых экспериментах излучение было обнаружено в режиме МТ, поэтому предполагалось, что в этом режиме, с учетом положительного R_d на ветви ВАХ, спектральные характеристики лучше, чем на ветви с отрицательным R_d. Коллективом авторов с участием диссертанта в работе **[А32]** впервые было показано, что данное предположение было ошибочным, и гораздо лучшими спектральными характеристиками генератор обладает в режиме больших токов. Данный вопрос подробно освещен в разделе 4.1.3.

4.1.2. Исследования мощности и частоты излучения в зависимости от температуры образца и режима работы

Исследование мощности излучения и спектральные исследования при помощи Фурье-спектрометра проводилось на другом экспериментальном образце генератора, отличном от представленного на рисунке 4.1, обладающего близкими характеристиками, в то время как спектральные исследования высокого разрешения при помощи СИП проводились на том же образце, что представлен в разделе 4.1.1 (рисунке 4.1). Использование различных образцов связано с доступностью (недоступностью) образцов, предоставляемых иностранными коллегами, в различные периоды проведения исследований и не влияет на характер исследуемых особенностей и общие результаты, выводы исследования.

Схема экспериментальной установки по исследованию мощности излучения в открытое пространство при помощи широкополосного болометра представлена и описана в Главе 2 – см. рисунок 2.5 б, а результаты

исследования – на рисунке 4.4. Измерения производились режиме перестройки рабочей точки генератора (I, V) в диапазоне температур от 4,2 до 35 К. При дальнейшем повышении температуры образца значительно падает максимальное напряжение на ВАХ и мощность сигнала. Из рис. 4.4 (б) и (в) виден волнообразный характер зависимости мощности при движении рабочей точки вдоль ВАХ при фиксированной температуре образца.

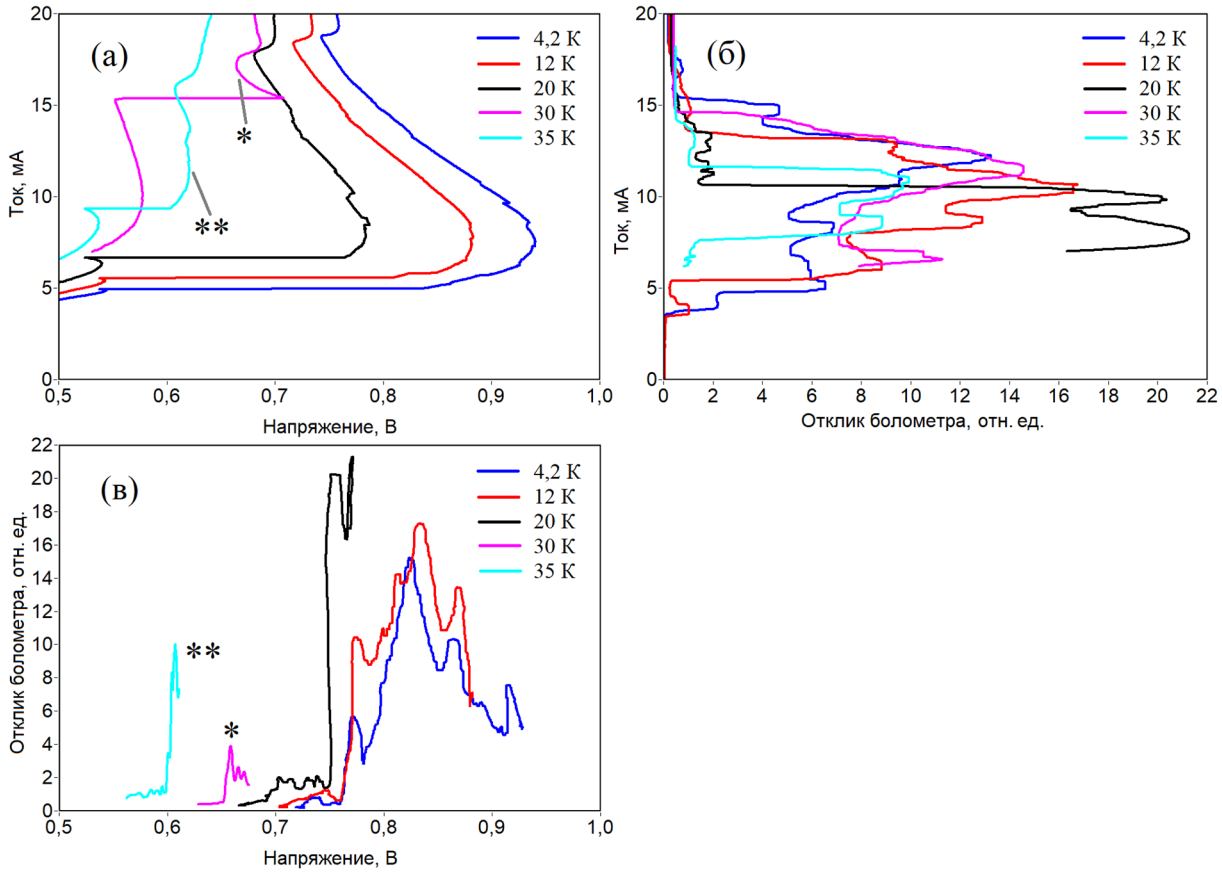


Рисунок 4.4 – (а) Серия ВАХ образца BSCCO при различных температурах; (б) Зависимость мощности излучения от тока смещения; (в) Зависимость мощности излучения от напряжения смещения. Цвета всех кривых однозначно соответствуют температуре и одинаковы на (а), (б), (в) для удобства. Шкала тока для (а) и (б), а также шкала напряжения для (а) и (в) расположены друг напротив друга для наглядности при сопоставлении. Звездами на (а) и (в) уточнены области (ветви) ВАХ, в которых получена представленная мощность.

В совместной работе с соавторством диссертанта [**A26**] был экспериментально получен и проанализирован большой массив данных о мощности излучения во всем доступном для измерения диапазоне рабочих

точек ВАХ (I, V) и широком диапазоне температур от 15 до 70 К – результат представлен на рисунке 4.5 (заимствован из **[A26]** без модификаций). Работа заключалась, в частности, в построении численной модели для исследования условий образования «горячено пятна» в мезе; начальная область образования горячего пятна отмечена на рис. 4.5 черными точками, а цветовой палитрой от желтого до красного обозначен уровень мощности излучения, зарегистрированный болометром. Интересный и нетривиальный результат состоит в следующем: имеется некоторый набор условных «рабочих ветвей» генерации, определяемый набором заданных параметров (T, I, V) и проявляющийся в виде чередования «красных полос» (областей эффективной генерации) на серии ВАХ. В отсутствии горячего пятна данные ветви проявляются при фиксированном напряжении вне зависимости от тока и температуры образца – см. набор чередующихся желтых и красных *вертикальных* полос при токах *ниже* ~10 мА на рис. 4.5. В присутствии горячего пятна ветви становятся наклонными (см. набор чередующихся желтых и красных *наклонных* полос при токах *выше* ~10 мА на рис. 4.5) по причине дополнительного падения напряжения за счет компоненты тока *в плоскости переходов* (помимо «основного» тока, протекающего *через переходы* – перпендикулярно плоскости переходов); это падение напряжения добавляется в общее измеряемое напряжение на массиве и при этом не даёт вклад в джозефсоновскую генерацию. Полученный результат полностью соответствует результату из рис. 4.4 б, в: чередование «полос генерации» проявляется в виде волнообразных особенностей при движении рабочей точки вдоль отдельно выбранной кривой ВАХ.

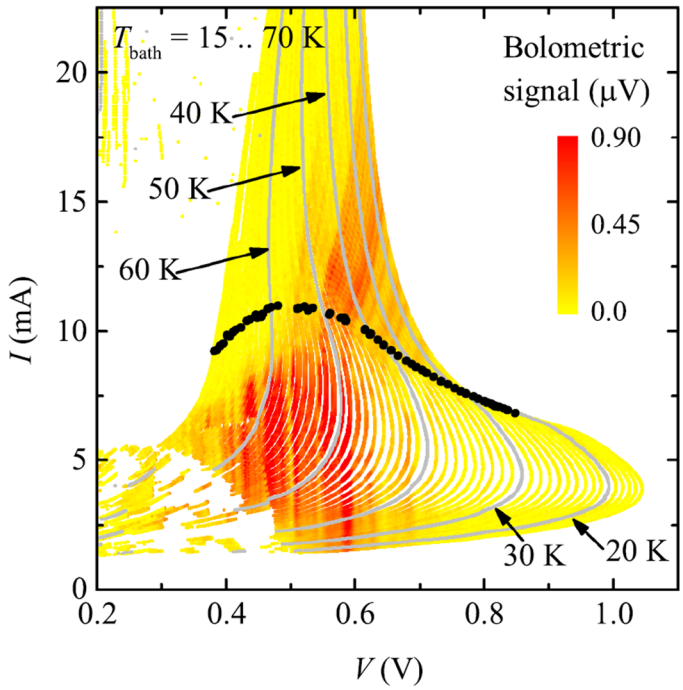


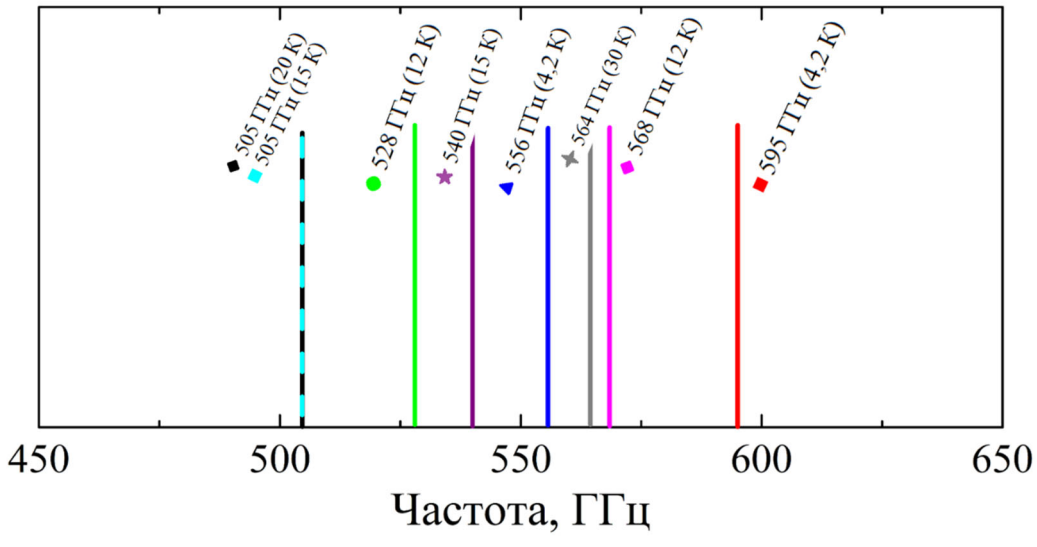
Рисунок 4.5 – Экспериментальные результаты для образца генератора размерами 165×60 мкм и толщиной ~480 джозефсоновских контактов **[A26]**: серия ВАХ при температурах образца от 15 до 70 К с шагом 0,5 К. Цветовой палитрой обозначен уровень мощности излучения, зарегистрированный болометром; черными точками обозначена область образования горячего пятна.

В Главе 1 (см. раздел 1.3.4) было отмечено, что одним из ключевых факторов в управлении генератором на основе BSCCO является то, что частота генерации f не определяется прямым образом из напряжения структуры V_B по соотношению Джозефсона, что хорошо работает для одиночного РДП и лишь с небольшой погрешностью для цепочки планарных СИС переходов с точно известным количеством, потому как в мезе рабочее напряжение на одиночных джозефсоновских контактах V_J зависит от заранее неизвестного количества контактов N, находящихся в сверхпроводящем состоянии в данной рабочей точке вне области «горячего пятна»:

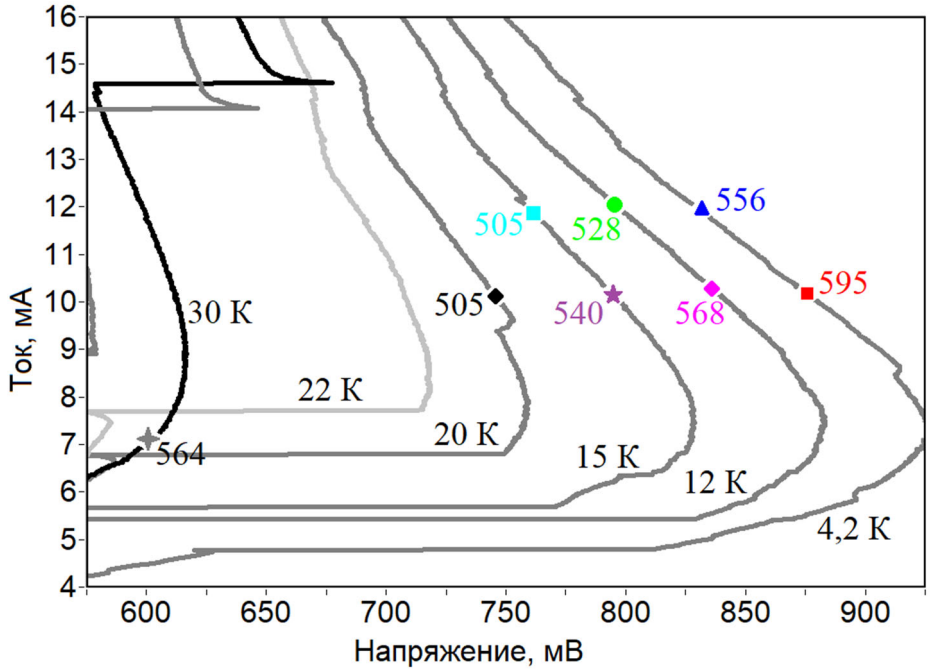
$$f = \frac{2e}{h} V_J = \frac{2e}{h} \frac{V}{N}. \tag{4.1}$$

Поэтому интересным является поиск закономерностей, позволяющих оценивать частоту генерации на наборе ВАХ образца с использованием неких «референсных» (опорных) известных значений. Для этого была проведена

серия экспериментов по определению частоты генерации в наборе рабочих точек, соответствующих различным температурам образца, при помощи широкополосного Фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона – схема эксперимента приведена на рисунке 2.7 б (Глава 2), а результат исследования представлен на рисунке 4.6. Точность определения частоты в данном эксперименте составляла около ±2-3 ГГц за счет температурного дрейфа в образце в процессе измерения интерферограммы (Фурье-образа искомого спектра), а также из-за спектрального разрешения спектрометра, поэтому физические параметры измерения – длина прохода подвижного зеркала и время накопления сигнала – были выбраны такими, чтобы время измерения одной интерферограммы занимало ~2-3 минуты. На рис. 4.6 а вертикальными линиями разного цвета представлены результаты измерения частоты генерации в наборе рабочих точек, а на рис. 4.6 б указаны соответствующие рабочие точки (I, V, T_b), в которых получены данные о частоте, с идентичными цветом и формой рабочих точек для наглядности.



(а)



(б)

Рисунок 4.6 – (а) Набор зарегистрированных частот излучения экспериментального образца генератора на основе BSCCO, полученный при помощи Фурье-спектрометра. Цвет столбиков совпадает с цветом обозначения рабочей точки (для наглядности).
(б) Серия ВАХ исследуемого образца BSCCO с указанием рабочих точек, в которых набор частот из (а) были получены. Число возле каждой точки указывают частоту генерации в ГГц, а цвет и форма точек идентична на (а) и (б) для наглядности.

Следует отметить ряд интересных особенностей, которые видны при анализе результатов из рисунка 4.6 б. Так, для двух рабочих точек с одинаковой частотой генерации 505 ГГц при температурах 15 и 20 К (голубой квадрат и черный ромб, соответственно) напряжение образца значительно отличается – примерно 740 и 765 мВ. Далее, для двух других рабочих точек с практически одинаковым напряжением около 790 мВ при температурах 12 и 15 К (зелёный кружочек и фиолетовая звездочка, соответственно) частота генерации заметно отличается – 528 и 540 ГГц, соответственно. Похожая картина наблюдается для рабочих точек с близким напряжением около 830 мВ при температурах 4,2 К и 12 К (синий треугольник и розовый ромб, соответственно), в которых частота генерации отличается – 556 и 568 ГГц. Если вспомнить о наклонных «ветвях» генерации на ВАХ (рис. 4.5), которые

объясняются дополнительным падением напряжения в измерительной схеме в плоскости джозефсоновских переходов при наличии горячего пятна, а также учесть небольшое последовательное контактное сопротивление ~3 Ом, возникающее из-за фактической 3-проводной (не 4-проводной) схемы измерения ВАХ, то полученный результат легко объясняется добавочным сопротивлением в системе, которое не относится к напряжению на генерирующем массиве джозефсоновских контактов.

С учетом визуально практически постоянного наклона «ветвей» генерации из рис. 4.5, что соответствует неизменному сопротивлению в плоскости контактов и неизменному контактному сопротивлению в измерительной схеме, можно для простой оценки частоты генерации провести аналогичную серию наклонных линий на ВАХ, соответствующих одинаковой частоте генерации, – «кривых постоянной частоты». Результат такой аппроксимации представлен на рисунке 4.7; этот рисунок фактически дублирует рисунок 4.6 б с дополнительными штриховыми кривыми аппроксимации и расширенными обозначениями на графике. В данный результат не вписывается рабочая точка генерации на частоте 564 ГГц при температуре 30 К (серая звезда); предположительно, эта рабочая точка соответствует области вертикальных красных и жёлтых ветвей генерации из рисунка 4.5, в которой либо горячее пятно отсутствует в принципе, либо существенно отличается количество переходов N, находящихся в резистивном состоянии (иная ветвь ВАХ), т.е. количество задействованных в генерации переходов.

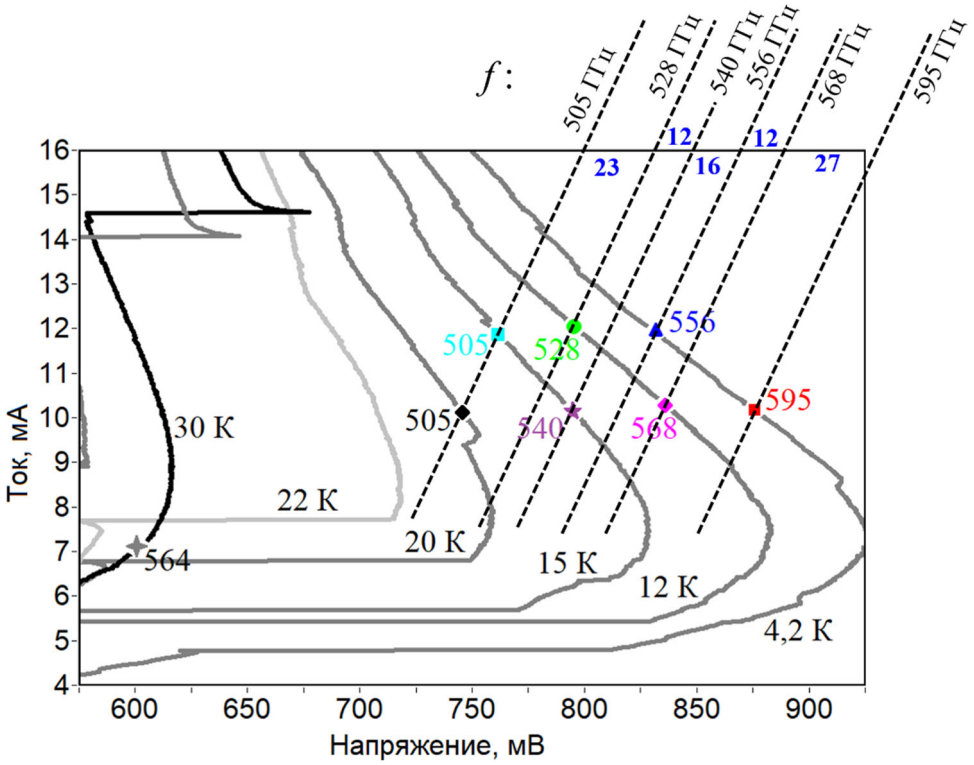


Рисунок 4.7 – Серия ВАХ исследуемого образца BSCCO с указанием рабочих точек и частоты генерации в них, определенной при помощи Фурье-спектрометра, из рис. 4.6. Штриховыми линиями проведены «кривые постоянной частоты» (линейная аппроксимация), частота для каждой кривой указана сверху за пределами графика. Числами сверху по горизонтальной оси (синий шрифт) обозначено расстояние между «кривыми постоянной частоты» в единицах ГГц.

Опишем получение представленного результата на рисунке 4.7 более подробно. Серия «кривых постоянной частоты» имеет наклон, определенный двумя рабочими точками при одинаковой частоте 505 ГГц и равняющийся примерно 9,5 мВ/мА – условные 9,5 Ом, которые, вероятнее всего, определяются добавочным сопротивлением в плоскости переходов и контактным сопротивлением (≈3 Ом). Далее, с учетом известного наклона, «кривые постоянной частоты» с таким же наклоном проведены через остальные рабочие точки с известной частотой генерации в области ВАХ с горячим пятном, каждая кривая для наглядности «подписана» своей частотой (сверху на рис. 4.7 за пределами графика). Расстояние между построенными кривыми по горизонтали (при любом фиксированном токе смещения) строго определяется их наклоном, а значения этого расстояния в единицах

частоты (ГГц) обозначены синим цветом на графике на верхней оси абсцисс для наглядности. Из построенных кривых расстояние по частоте между каждыми двумя кривыми при постоянном токе составило около 0,71 ГГц на каждый 1 мВ и находится в строгом соответствии друг с другом в пределах погрешности определения частоты по Фурье-спектрометру. Таким образом, наклон «кривых постоянной частоты», определенный **только** по двум рабочим точкам генерации с частотой 505 ГГц, а также измерение частоты генерации в третьей рабочей точке с отличной частотой (от 505 ГГц), позволяющее определить горизонтальный «частотный сдвиг», с высокой степенью точности позволили численно определить частоту генерации для всей области ВАХ выше 0,7 В в представленном диапазоне температур.

Важно заметить, что хорошее численное соответствие результатов получено в предположении неизменного добавочного сопротивления в плоскости переходов и контактного сопротивления, которое (предположение) приводит к одинаковому наклону «кривых постоянной частоты» во всей области ВАХ. Данное допущение косвенно подтверждается результатами измерения мощности – прямых «ветвей генерации» из рис.4.5, которые начинают незначительно изгибаться лишь в области максимальных токов смещения, что, в свою очередь, также может объясняться ростом сопротивления в плоскости переходов за счет увеличения размера горячего пятна и/или изменением его температуры. На практике, данный результат может различаться для разных экспериментальных образцов, в том числе, с использованием другой принципиальной конструкции, геометрии (размеров) и иных тепловых/резонансных условий, поскольку добавочное сопротивление в плоскости переходов напрямую зависит от тепловых условий в системе. Тем не менее, модель «кривых постоянной частоты» имеет практическую ценность, поскольку позволяет определять (оценивать) частоту генерации образца BSCCO в широкой области ВАХ из результатов калибровочных измерений в нескольких рабочих точках.

4.1.3. Исследование спектральной линии излучения в зависимости от температуры образца и режима работы

Экспериментальная установка для исследования спектров излучения BSCCO в высоким разрешением аналогична установке для исследования спектров РДП и представлена на рисунке 2.9 б (Глава 2). Спектр излучения генератора на частоте 612 ГГц, измеренный в режиме больших токов при температуре около 44 К, представлен на рисунке 4.8. Вычисленное количество задействованных в генерации переходов в данной рабочей точке составляет $N \approx 570$. Ширина линии составляет около 23 МГц, а форма линии с высокой степенью точности является лоренцевой. Вставка на рисунке демонстрирует относительно высокую стабильность частоты генерации: проведены два измерения с интервалом ~3 минуты, вследствие дрейфа в системе частота сместилась на 3 МГц, т.е. величину, значительно меньшую ширины линии.

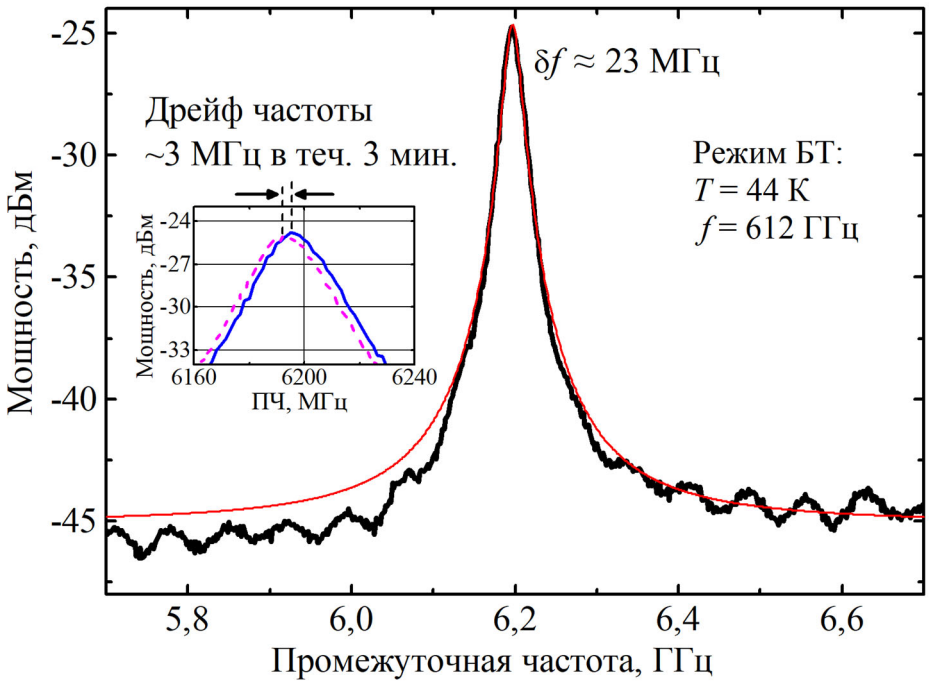
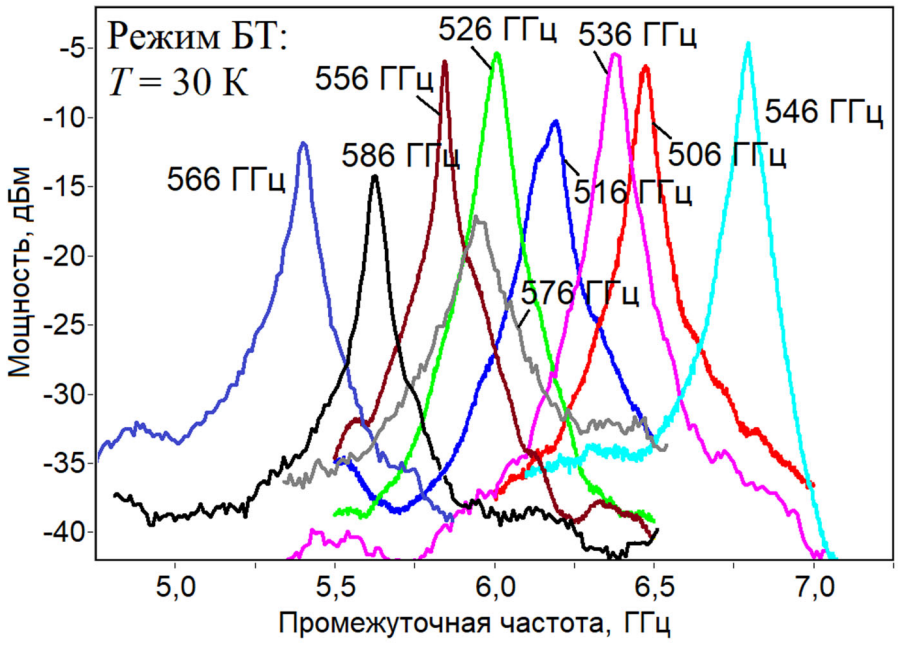
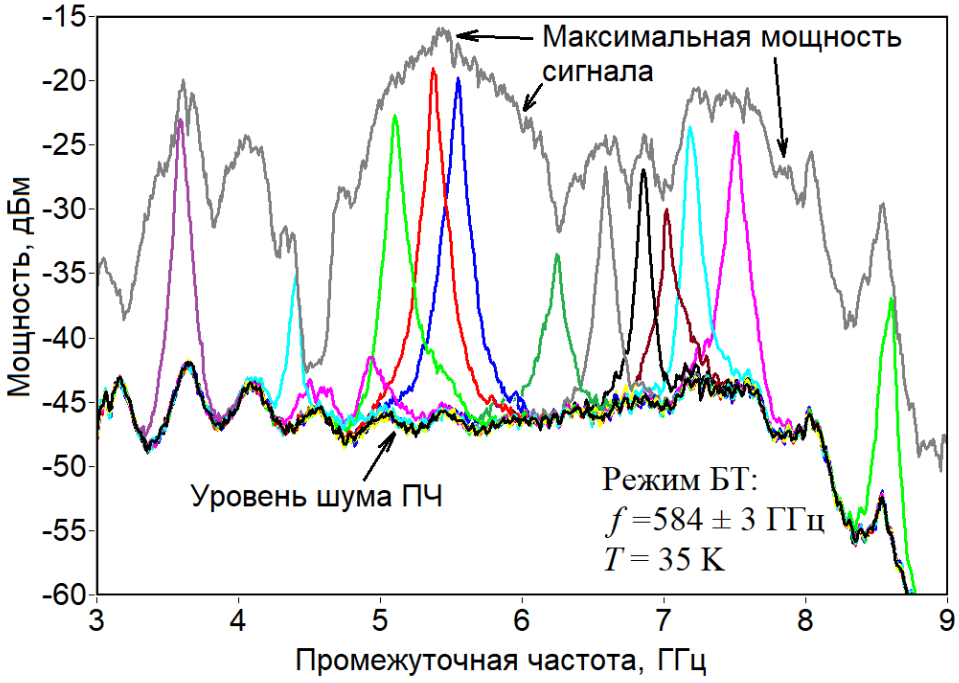


Рисунок 4.8 – Спектр излучения генератора на основе BSCCO, измеренный в режиме больших токов при помощи СИП в диапазоне ПЧ 4-8 ГГц (черная кривая), и его аппроксимация лоренцевой функцией (красная кривая). Рабочая частота, температура и вычисленная ширина линии указаны на графике. Вставкой показан частотный сдвиг спектральной линии излучения вследствие свободного дрейфа системы в течение 3-х минут.

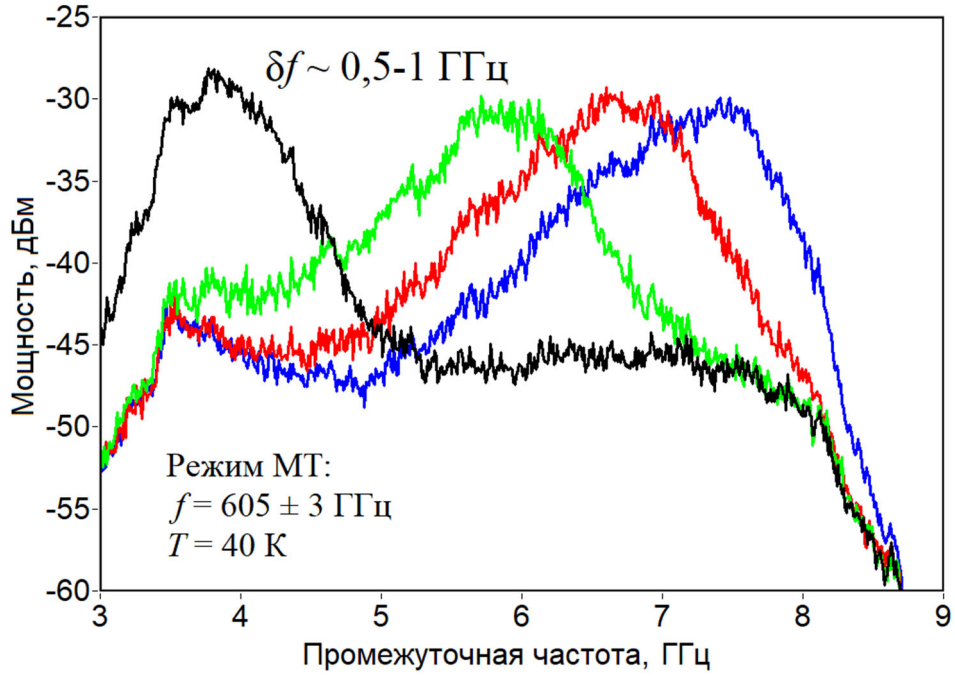
Была проведена большая серия экспериментов по регистрации спектров излучения при различных температурах, в различных режимах работы в широком частотном диапазоне: некоторые из результатов продемонстрированы на рисунке 4.9. Так, на рис. 4.9 а показаны спектральные линии излучения в режиме больших токов при температуре 30 К, измеренные на большом наборе рабочих частот от 506 до 586 ГГц (частота гетеродина менялась от 500 до 580 ГГц, соответственно); визуально наблюдается значительная вариация ширины линии, которая составила от ~10 до ~80 МГц для представленного набора. Далее, на рис. 4.9 б показана непрерывная перестройка рабочей частоты генерации в пределах диапазона ПЧ приёмника (6 ±3 ГГц) для центральной частоты 584 ГГц; измерения проведены в режиме больших токов при температуре 35 К. Огибающая серая кривая (сверху) зарегистрирована анализатором спектра в режиме функции записи максимальной мощности излучения (верхняя точка пика спектральной линии) при плавной перестройке частоты генератора. Наконец, на рис. 4.9 в представлена аналогичная серия спектральных линий с плавной перестройкой частоты в пределах диапазона ПЧ приёмника, измеренных в режиме *малых* токов, для центральной частоты около 605 ГГц при температуре 40 К. Ширина линии в режиме МТ составила примерно от 0,5 до 1 ГГц.



(а)



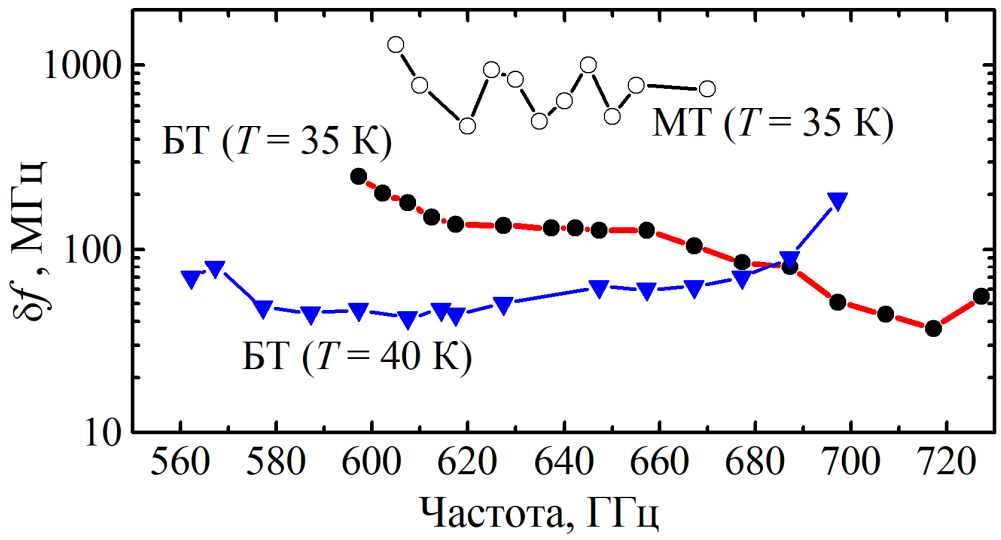
(б)



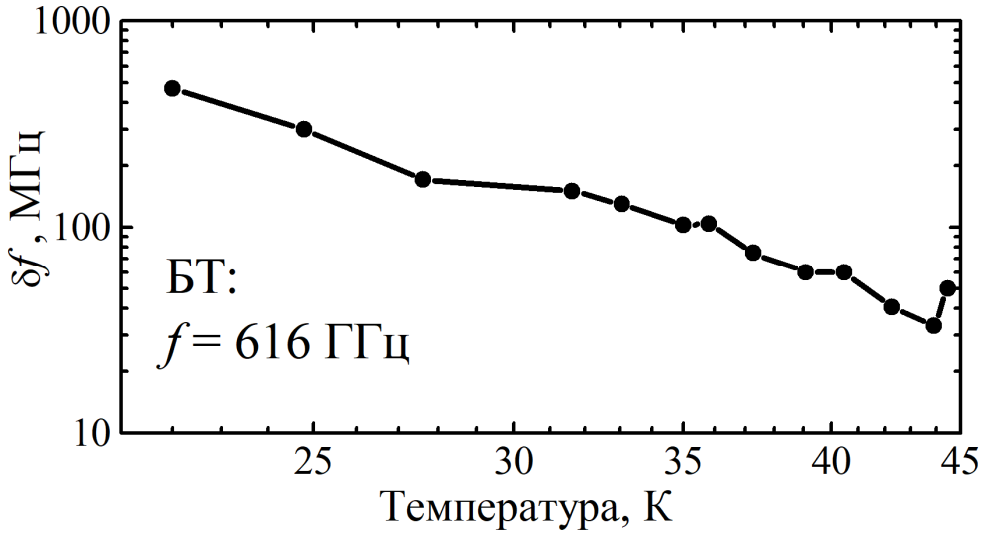
(в)

Рисунок 4.9 – Спектры излучения образца генератора на основе BSCCO, зарегистрированные при помощи СИП в разных режимах работы, на различном наборе частот и в окрестности выбранной частоты с плавной перестройкой: (а) режим БТ, набор частот от 506 до 586 ГГц с шагом 10 ГГц, δf составила от ~10 до ~80 МГц; (б) режим БТ, частота 584 ± 3 ГГц с плавной перестройкой, черная кривая снизу – уровень шума, серая кривая сверху – огибающая максимальной мощности для данной частоты; (в) режим МТ, частота 605 ± 3 ГГц.

Результат измерения ширины линии генерации при различных температурах и режимах работы, а также при различной частоте генерации в сводном виде представлен на рисунке 4.10. Общий реализуемый частотный диапазон для данного образца с учетом широкого изменения температуры составил примерно от 450 ГГц до 750 ГГц, при этом верхняя граница обозначенного диапазона определялась рабочим диапазоном СИП: максимальная частота исследования с возможностью частотной и фазовой стабилизации гетеродина на основе РДП составила 736 ГГц. Вероятнее всего, верхний предел частоты генерации для данного образца BSCCO составлял около 800 ГГц, однако, из-за недоступности экспериментального образца в период потенциально возможных исследований при помощи широкополосного Фурье-спектрометра, исследования предельной частоты проведены не были.



(а)



(б)

Рисунок 4.10 – Зависимость ширины линии излучения генератора на основе BSCCO (а) в зависимости от частоты генерации при различных температурах и режимах работы: точки – экспериментальные результаты, линии – соединение точек для наглядности; (б) в зависимости от температуры в режиме больших токов при частоте генерации 616 ГГц.

Отметим два ключевых экспериментальных результата, полученных по итогам широкого цикла исследований ширины линии генерации. Первый нетривиальный результат продемонстрирован на рис. 4.10 а и заключается в том, что наименьшая ширина линии зарегистрирована исключительно в режиме больших токов и составила для данного экспериментального образца от ~20 МГц до ~80 МГц, в то время как спектр генерации в режиме малых токов с шириной от 500 МГц до нескольких ГГц соответствует скорее широкополосному шуму, чем одночастотному сигналу. Вероятнее всего, при малых токах не действует механизм синхронизации излучения отдельных джозефсоновских контактов в массиве за счет «горячего пятна», которое образуется только в режиме больших токов. Численная модель образования горячего пятна на основе решения уравнений Синус-Гордона (безотносительно ширины линии генерации) подробно рассмотрена в совместной работе **[А26]**, в которой преимущественный вклад внесён иностранными коллегами, поэтому сама модель детально не описывается в рамках диссертации и не выносится диссертантом на защиту.

Второй нетривиальный результат заключается в том, что наименьшее значение ширины линии достигается в области значений температуры, далёкой как от нуля, так и критической температуры T_c : так, для разных экспериментальных образцов оптимальная температура по критерию наименьшей δf составила от ~25 до ~44 К. В связи с данным результатом в другой совместной работе **[A30]** была предложена и проанализирована численная модель, в которой распределенный генератор представлен двумя секции переходов с различной температурой (T_1 и T_2), термически связанными только с подложкой при температуре T_b, а также шунтирующим сопротивлением R_s с температурой T_2, модельно имитирующим «горячее пятно». Поскольку данная модель была построена непосредственно с целью объяснения нетривиальной фактической (экспериментальной) зависимости ширины линии генерации от температуры, полученной диссертантом в рамках работы, описание и результаты анализа модели представлены с некоторыми подробностями в следующем разделе.

4.1.4. Численная модель для объяснения экспериментальных результатов зависимости ширины линии от температуры

Все рисунки, представленные в данном разделе, приведены в неизменном виде из работы **[A30]** на языке оригинала (английском). Все необходимые пояснения будут даны в тексте.

Схема массива переходов в рамках численной модели, предложенной и решенной в работе **[A30]**, представлена на рисунке 4.11. Массив общим количеством джозефсоновских переходов N состоит из $\boldsymbol{M}$ **секций**, где количество секций фактически представляет собой шаг разбиения, определяющей точность решения численной задачи. В плоскости переходов массив состоит **из двух частей 1 и 2** с температурой T_1 и T_2, соответственно, а шунтирующий резистор с сопротивлением R_s при температуре T_2 имитирует внутреннюю часть горячего пятна. Каждый переход в секции с номером k

($k = 1 \ldots M$) в каждой из двух частей ($J_{1,k}$, $J_{2,k}$) представлен моделью резистивно-емкостного шунтированного СИС-перехода, т.е. обладает нормальным сопротивлением и емкостью, при этом через него в общем случае протекает нормальный ток, сверхпроводящий бездиссипативный ток (в случае общего тока меньше критического) и шумовой ток. В каждой из M секций в плоскости переходов доля сопротивления R_s составляет R_s/M. В данном разделе при описании массива слово «*секция*» применяется исключительно в контексте его разбиения на M секций в направлении, перпендикулярном плоскости переходов, а слово «*часть*» – в контексте двух частей массива в плоскости переходов с температурами T_1 и T_2.

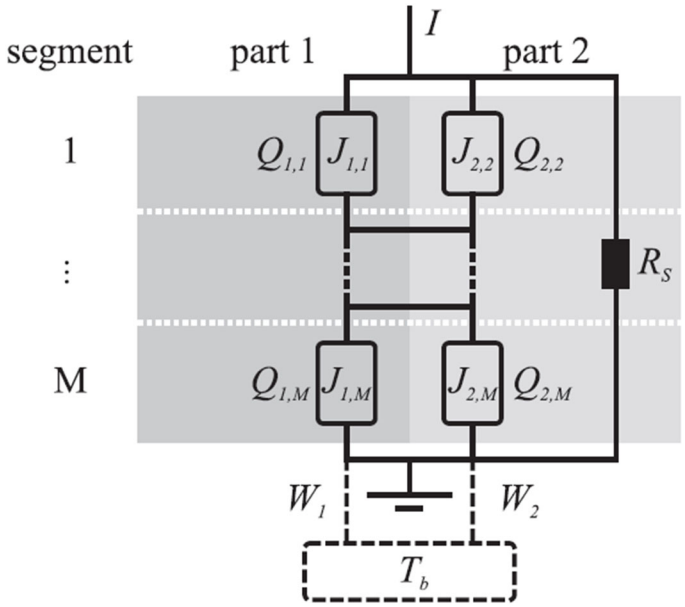


Рисунок 4.11 – Схема массива джозефсоновских переходов в монокристалле BSCCO, предложенная в рамках численной модели **[A30]**. Массив с общим числом переходов N в плоскости переходов разделен на 2 части (подписи на рисунке – «part 1, part 2») при температурах T_1 и T_2, а вдоль массива разбит на M секций (подпись на рисунке – «segment 1…M»). Сопротивление R_s при температуре T_2 имитирует наличие горячего пятна и шунтирует весь массив. Величина Q с индексами, обозначающими секцию (1…M) и часть (1,2), представляет собой джоулеву мощность тепловыделения в каждом соответствующем переходе секции J, а величиной W обозначен поток тепла из каждой части в подложку (основание) с постоянной температурой T_b. Через массив протекает общий ток I. Сплошными линиями обозначен электрический контур цепи, пунктирными –контур теплообмена.

В рамках численной модели введены следующие обозначения:

$\gamma_{1,m}$, $\gamma_{2,m}$ – джозефсоновская фаза в переходе секции m в каждой части ($J_{1,m}$, $J_{2,m}$) которая считается равной для двух частей единого перехода внутри секции: $\gamma_{1,m} = \gamma_{2,m} \equiv \gamma_m$;

C_1, C_2, R_1, R_2, I_{c1} и I_{c2} – емкости, сопротивления и критические токи в секциях частей массива 1 и 2 в модели резистивно-емкостного шунтированного СИС-перехода; при решении модели сопротивление и критический ток переходов положены зависящими от температуры – $R_1(T)$, $R_2(T)$, $I_{c1}(T)$ и $I_{c2}(T)$, в то время как ёмкость C_1, C_2 положена не зависящей от температуры;

$I_{N1,m}$, $I_{N2,m}$ – шумовой ток в 1-й и 2-й части m-й секции, соответственно, спектральная плотность мощности которого в рамках модели определяется формулой для «белого» шума $S_{I,1} = 4k_B \cdot T_1/(M \cdot R_1)$ и $S_{I,2} = 4k_B \cdot T_2/(M \cdot R_2)$.

$\hat{C}_1$, $\hat{C}_2$ – теплоёмкость перехода внутри секции в каждой части, которая при решении модели положена равной для двух частей единого перехода внутри секции и не зависящей от температуры ($\hat{C}_1 = \hat{C}_2 = \hat{C}$);

K_1, K_2 – теплопроводность между каждой из двух частей с подложкой при температуре T_b ; при решении численной модели она также положена равной для двух частей и не зависящей от температуры ($K_1 = K_2 = K$);

Δf – обозначение ширины линии на представленных графиках из работы **[A30]**, в то время как в рамках диссертации уже введено обозначение δf.

Общий ток через массив определяется следующим соотношением:

$$I = \frac{2\pi(C_1 + C_2)}{N\Phi_0}(N\ddot{\gamma}_m) + \frac{2\pi}{\Phi_0}\left[\frac{1}{NR_1(T_1)} + \frac{1}{NR_2(T_2)}\right](N\dot{\gamma}_m) + \\ + \left[I_{c1}(T_1) + I_{c2}(T_2)\right]\sin\gamma_m + \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\left[I_{N1,m}(T_1) + I_{N2,n]m}(T_2)\right] + \\ + \frac{2\pi}{\Phi_0}\frac{N}{MR_s(T_2)}\sum_{m=1}^{M}\dot{\gamma}_m \qquad (4.2)$$

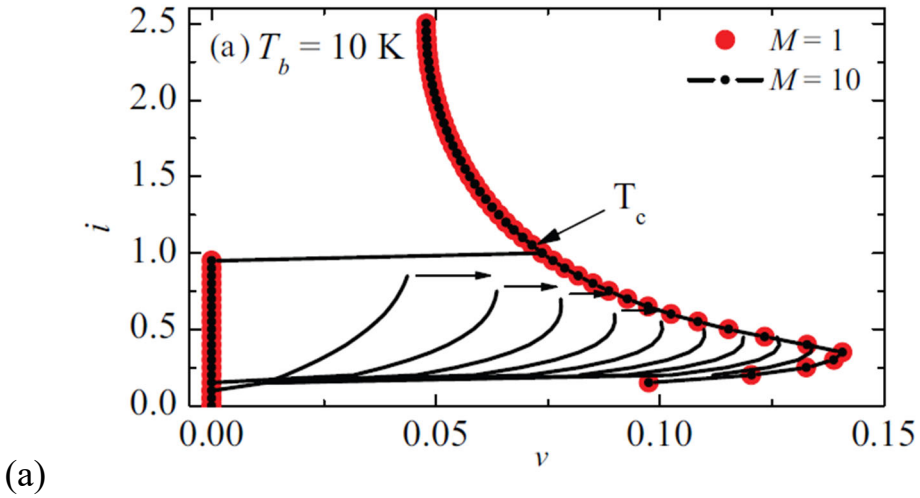
В выражении (4.2) первый член представляет собой ток через ёмкостной элемент перехода, второй член – ток через резистивный элемент перехода, третий член – сверхток, определяемый токофазовым соотношением вида (1.2),

четвертый член – шумовой ток, пятый член – ток через шунтирующее сопротивление R_s. Следует заметить, что второй и пятый член представляют собой закон Ома в простейшем виде (ток через резистор), поскольку напряжение в секции U_m и первая производная джозефсоновской фазы по времени связаны вторым соотношением Джозефсона $\dot{\gamma}_m = 2\pi U_m / \Phi_0$. Шунтирующее сопротивление R_s также создаёт дополнительный шумовой ток, спектральная плотность мощности которого также определена формулой «белого» шума $S_s = 4k_B \cdot T_2/(M \cdot R_s)$. Поскольку в модели предполагается отсутствие теплового обмена между частями массива (идея разделение массива на две части с температурами T_1 и T_2 уже подразумевает результат теплообмена в плоскости переходов), поток тепла из частей массива в подложку с температурой T_b описывается следующими уравнениями теплопроводности:

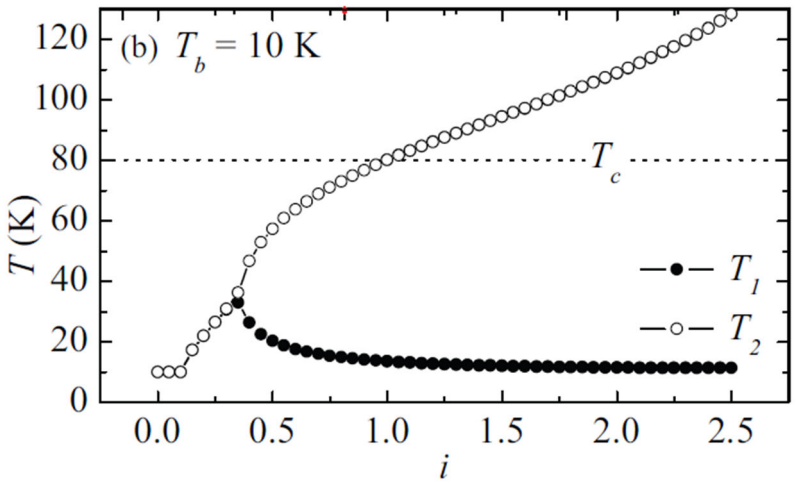
$$\hat{C}_1 T_1 = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} \frac{\dot{\gamma}_m^2}{R_{1,m}(T_1)} - \frac{K_1}{N}(T_1 - T_b)\,; \tag{4.3}$$

$$\hat{C}_2 T_2 = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} \frac{\dot{\gamma}_m^2}{R_{2,m}(T_2)} + \frac{N}{R_s(T_2)}\left(\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\dot{\gamma}_m\right)^2 - \frac{K_2}{N}(T_2 - T_b)\,. \tag{4.4}$$

Выражения (4.2)-(4.4) являются основой для дальнейших вычислений и анализа. Вычисленные ВАХ при выбранном числе секций $M = 1$ и $M = 10$ при температуре резервуара $T_b = 10$ К представлены на рисунке 4.12 а, а вычисление температуры частей массива T_1 и T_2 – на рисунке 4.12 б. Безразмерный ток $i = I/I_c$ нормирован на значение $I_c = 30$ мА; а безразмерное напряжение v – на значение 15 мВ. Максимальное напряжение $v \approx 0{,}14$ соответствует примерно 2 мВ в абсолютных единицах; в данной рабочей точке $T_1 = T_2 \approx 32$ К. Поскольку, как видно из рис. 4.12 а, результат вычисления ВАХ практически не зависит от «мелкости» разбиения массива (количества секций M), на следующем этапе проведено вычисление набора ВАХ при наборе температур резервуара от 10 К до 80 К через каждые 10 К – результат представлен на рисунке 4.13.



(а)



(б)

Рисунок 4.12 – (а) Вычисленная ВАХ перехода при $M = 1$ и $M = 10$; $T_b = 10$ К. (б) Температура T_1, T_2 частей массива в зависимости от тока i при $T_b = 10$ К. Горизонтальная линия $T_c = 80$ К указывает температуру перехода «горячей» части массива в нормальное состояние.

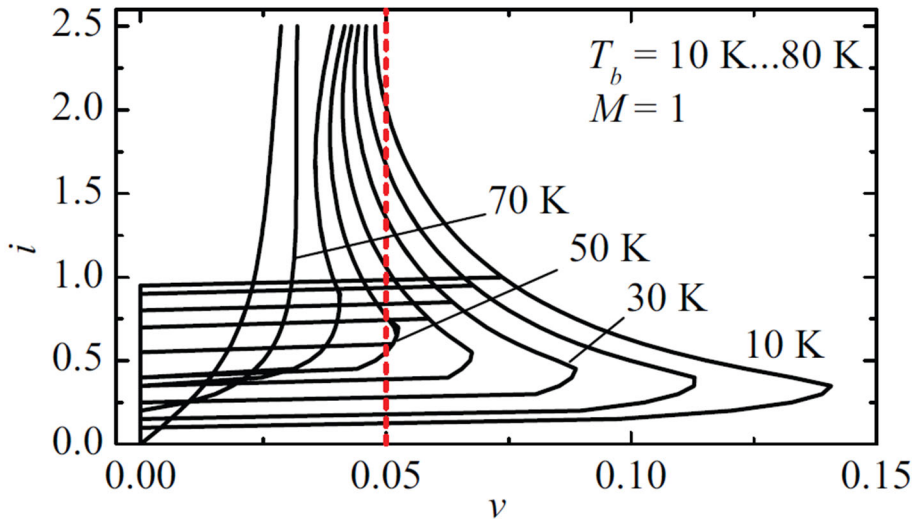
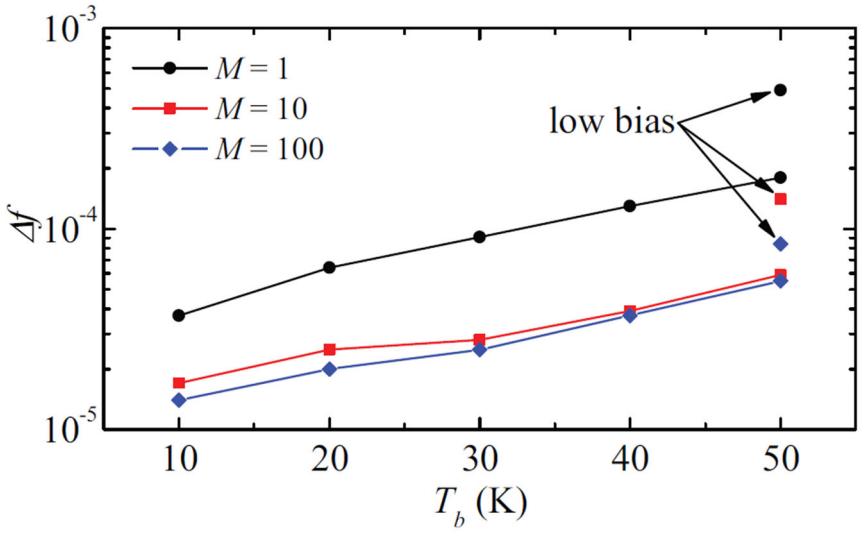
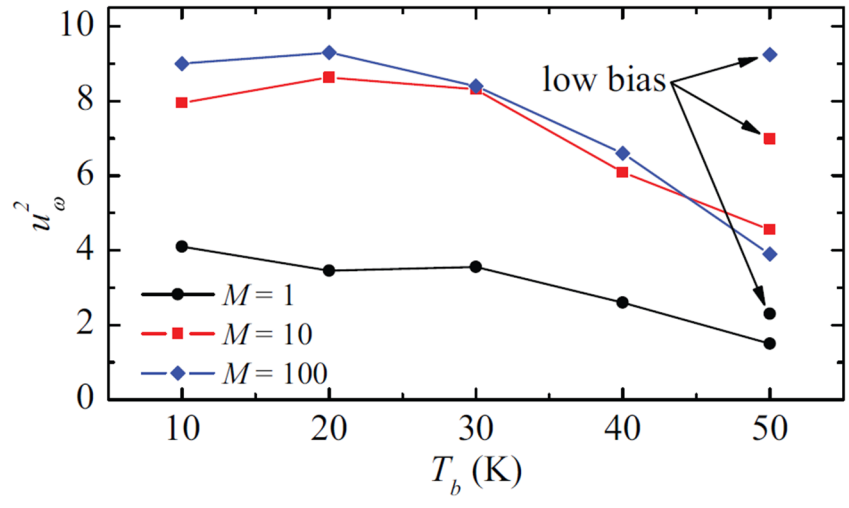


Рисунок 4.13 – Серия вычисленных ВАХ при $M = 1$ и T_b в диапазоне от 10К до 80 К с шагом 10 К.

На рисунке 4.14 а представлены результаты зависимости ширины линии от температуры с учетом шунтирующего сопротивления R_s и тепловой связи (4.2)-(4.4). В режиме больших токов δf растет с увеличением T_b, т.е. нетривиальные экспериментальные результаты с «оптимумом» по температуре для достижения наименьшей ширины линии на данном этапе качественно не наблюдаются. На рисунке 4.14 б представлена зависимость излучаемой мощности u_ω^2 (квадрат амплитуды переменной составляющей безразмерного напряжения u через массив) от температуры.



(а)



(б)

Рисунок 4.14 – Зависимость (а) ширины линии и (б) мощности излучения от температуры теплового резервуара T_b с учетом тепловой связи в модели (4.2)-(4.4) с шунтирующим сопротивлением $R_s/N = R_2$ для количества секций $M = 1$, 10 и 100.

До сих пор такие параметры, как критический ток и сопротивление, подразумевались одинаковым для всех переходов (секций) в массиве. Однако, в некоторых работах (например, [150]) отмечалось, что наклонные края мезы (угол отличен от 90°) приводят к градиенту критического тока и сопротивления. Данный эффект дополнительно учтен путем введения параметра $a_{\max}$, который линейным образом увеличивает критический ток с ростом номера секции как $I_{c,m} \sim (1+m \cdot a_{\max}/M)$ и уменьшает сопротивление как $R_m \sim (1+m \cdot a_{\max}/M)^{-1}$. Параметр $a_{\max}$ фактически отвечает за относительное увеличение площади мезы у основания в сравнении с площадью «верхушки» и на практике составляет несколько процентов. На рисунке 4.15 показаны зависимости ширины линии и мощности генерации в зависимости от температуры в результате введения $a_{\max}$ со значением 0,04 (или 4% относительного изменения площади от основания до «верхушки»). Так, ширина линии достигает минимального значения при в температуре окрестности $T_b = 40$ К при $M = 10$ и в окрестности $T_b = 30$ К при $M = 100$ (рис. 4.15 а). Минимальное значение δf при этом соответствует значению, полученному при $a_{\max} = 0$, т.е. без введения градиента параметров. Максимальная мощность u_ω^2 также наблюдается при некотором промежуточном значении температуры в окрестности $T_b = 30$ К, что хорошо соответствует экспериментальным результатам, например, из работы [30].

Наименьшее значение ширины линии около $5 \cdot 10^{-5}$ (при $M = 10$) и $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ (при $M = 100$) в абсолютных единицах соответствует ≈370 МГц и ≈180 МГц, соответственно, что порядком больше, чем наименьшая ширина линии ~20 МГц, наблюдаемая в эксперименте (см. рис. 4.8, 4.10, работу **[A32]**). Это объясняется тем, что в расчетах безразмерный параметр $\Gamma_0 \cdot M/N$, где $\Gamma_0 = 2\pi k_B \cdot 4{,}2\text{К} / (I_c \cdot \Phi_0)$, оказался слишком большим – порядка 10^{-4}. Поэтому на финальном этапе была проведена оценка ширины линии при $M = 700$ (т.е. количество секций приблизительно равно количеству переходов) и более «реалистичном» значении $\Gamma_0 \cdot M/N = 10^{-5}$, в результате была получена $\delta f \approx 25$ МГц, что близко к экспериментальным результатам.

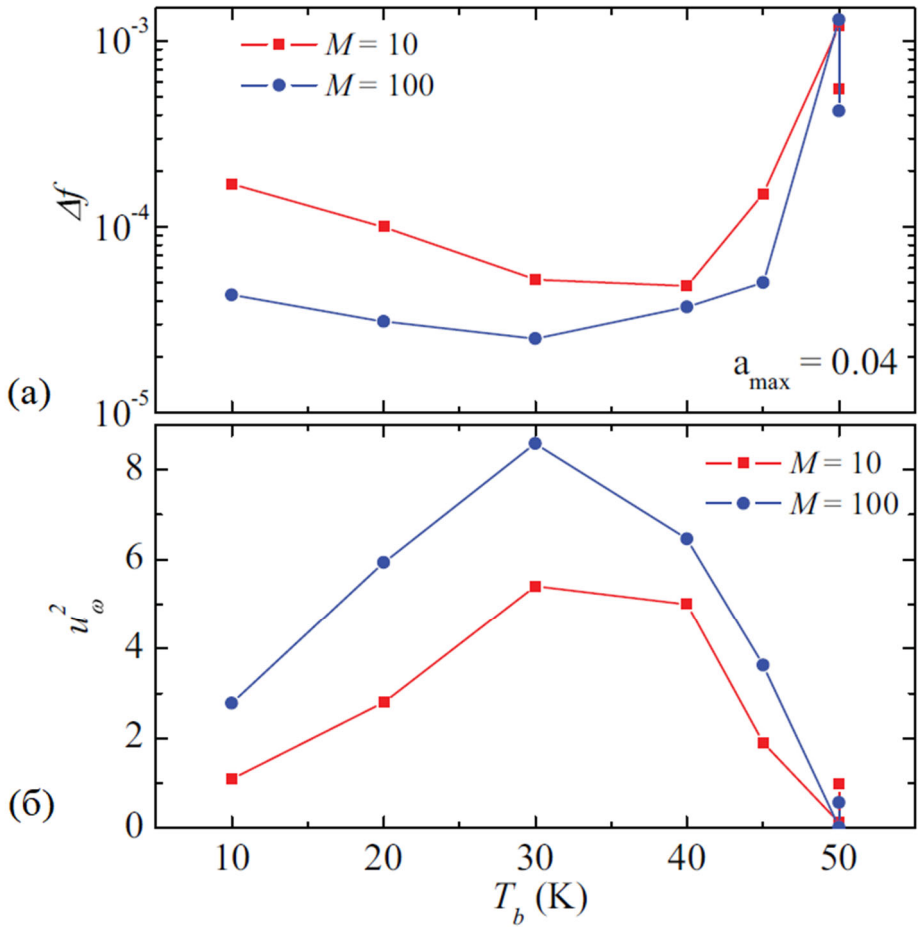


Рисунок 4.15 – Зависимость (а) ширины линии и (б) мощности излучения от температуры теплового резервуара T_b с учетом тепловой связи в модели (4.2)-(4.4), а также градиента критического тока и сопротивления (a_{max} = 0,04) при M = 10 и 100. Точки при T_b = 50 К соответствуют режиму малых токов.

Таким образом, нетривиальные экспериментальные результаты оказалось возможным качественно подтвердить в распределенной многосекционной модели массива джозефсоновских переходов в ВТСП монокристалле BSCCO с учетом распределения тепла (уравнения теплопроводности). За углубленным и более детальным описанием численной модели и связанных результатов анализа следует обращаться непосредственно к работе **[А30]**. Поскольку определяющий вклад в разработку и решение данной модели внесен коллегами (соавторами) диссертанта, подробность описания модели в рамках диссертации выбрана достаточной для описания связи с экспериментальными результатами диссертанта и количественного

подтверждения нетривиальных экспериментальных зависимостей, полученных диссертантом, с помощью предложенной численной модели. Также в работе **[A30]** проведен более глубокий анализ результатов, чем представленный в данном разделе.

4.1.5. Фазовая синхронизации генератора к опорному сигналу при помощи системы фазовой автоподстройки частоты

Наилучшая автономная ширина линии генерации использованного в эксперименте образца составляет около 20 МГц (см. рис. 4.8), что с учетом достаточно высокой стабильности частоты сигнала (см. вставку на рис. 4.8) позволяет использовать выходной сигнал СИП в качестве сигнала обратной связи с генератором, с использованием второй системы ФАПЧ (первая – для гетеродина СИП) и высокостабильного опорного сигнала 400 МГц. Для понижения частоты выходного сигнала СИП из диапазона 4-8 ГГц в диапазон 0-1 ГГц дополнительно используется преобразователь частоты вниз на основе смесителя и опорного сигнала 6 ГГц. Экспериментальная установка по фазовой синхронизации сигнала BSCCO представляет собой расширенную установку из рис. 2.9 б с добавлением цепи обратной связи с генератором и показана на рисунке 4.16.

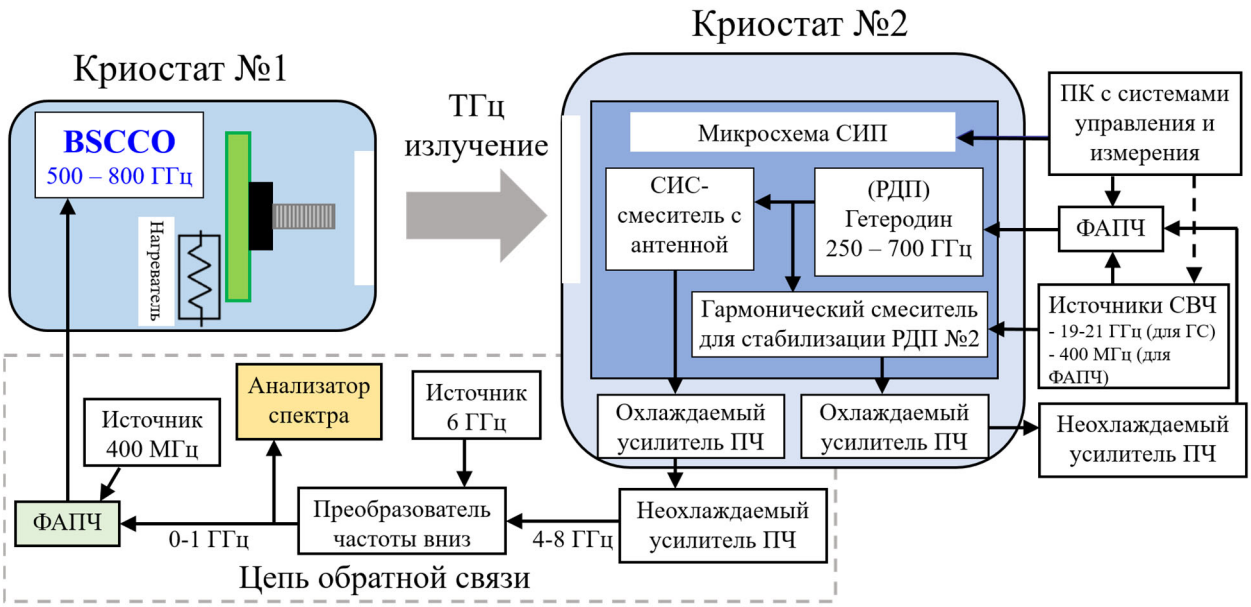
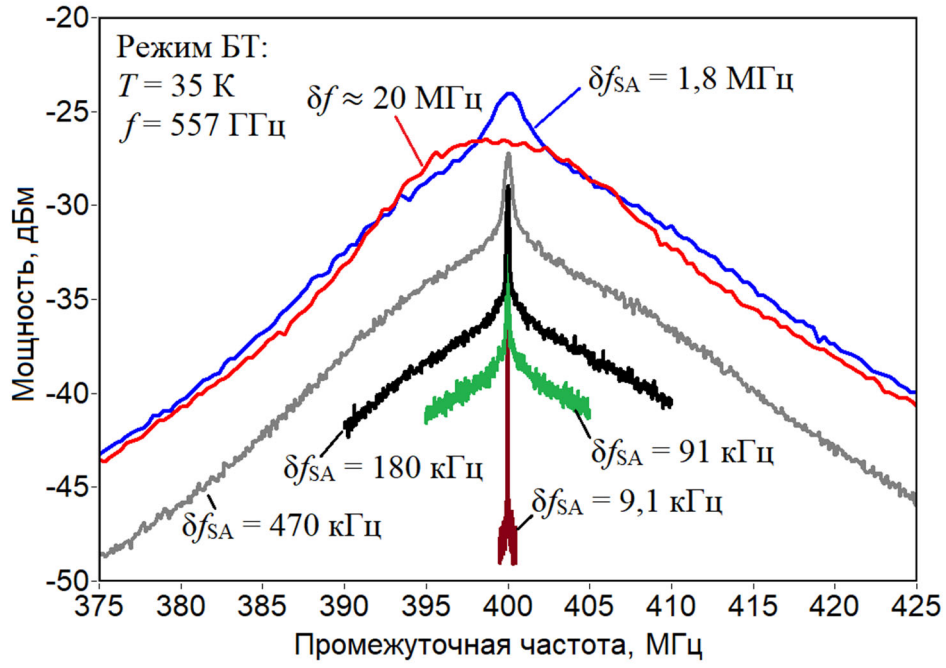
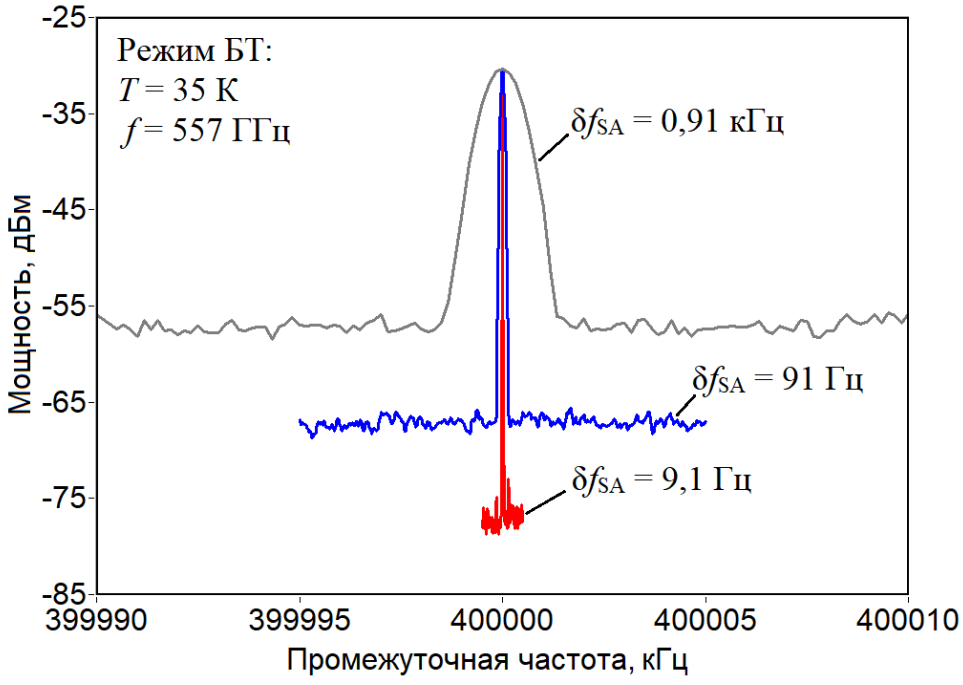


Рисунок 4.16 – Схема экспериментальной установки по фазовой стабилизации сигнала генератора на основе BSCCO при помощи системы ФАПЧ с использованием СИП со стабилизированным по фазе гетеродином.

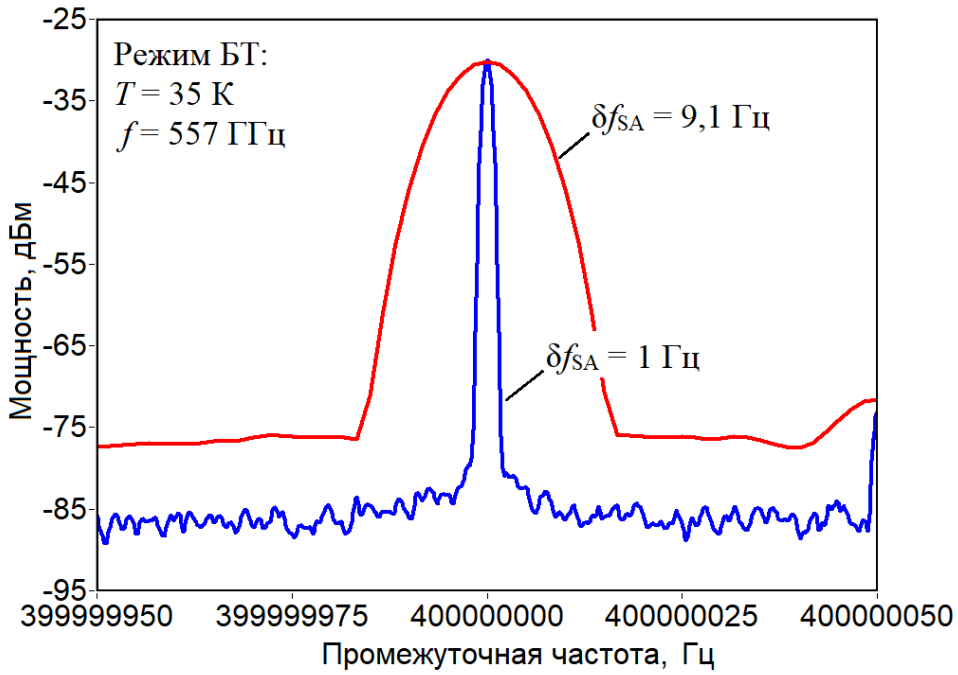
При некоторых условиях работы генератора в режиме высоких токов при автономной ширине линии генерации менее и порядка 20 МГц фазовая автоподстройка частоты была успешно продемонстрирована – спектры генератора на рабочей частоте около 557 ГГц (при $T = 35$ К) в режиме ФАПЧ к опорному сигналу 400 МГц при различном спектральном разрешении анализатора спектра δf_{SA} показаны на рисунке 4.17. Так, на рис. 4.17 а частотная развертка (масштаб) составляет 50 МГц, δf_{SA} – от 1,8 МГц до 9,1 кГц; на рис. 4.17 б: развертка 20 кГц, δf_{SA} – от 0,91 кГц до 9,1 Гц; на рис. 4.17 в: развертка 100 Гц, δf_{SA} – от 0,91 кГц до максимального возможного разрешения анализатора 1 Гц. Спектральное качество стабилизированной по фазе спектральной линии излучения в представленном случае составило порядка 1-2%.


Режим БТ:
T = 35 K
f = 557 ГГц
δf ≈ 20 МГц
δfSA = 1,8 МГц
δfSA = 180 кГц
δfSA = 91 кГц
δfSA = 470 кГц
δfSA = 9,1 кГц
Мощность, дБм
Промежуточная частота, МГц

(а)


Режим БТ:
T = 35 K
f = 557 ГГц
δfSA = 0,91 кГц
δfSA = 91 Гц
δfSA = 9,1 Гц
Мощность, дБм
Промежуточная частота, кГц

(б)



(в)

Рисунок 4.17 – Спектральные характеристики генератора на основе BSCCO, измеренные в режиме ФАПЧ к опорному сигналу 400 МГц, при частоте излучения 557 ГГц и температуре около 35 К: (а) в полосе шириной 50 МГц с наилучшим разрешением δf_{SA} = 9,1 кГц; (б) в полосе шириной 20 кГц с наилучшим разрешением 9,1 Гц; (в) в полосе шириной 100 Гц с наилучшим разрешением 1 Гц. Спектральное разрешение указано для каждой кривой. Линия генерации в автономном режиме представлена на (а) красной кривой.

Таким образом, показано, что ширина линии генерации в режиме фазовой стабилизации составляет менее 1 Гц, а при измерениях она фактически определяется предельным разрешением анализатора спектра.

В серии проведенных экспериментов возможность фазовой стабилизации выходного сигнала существовала не при любых условиях, а лишь при некоторых частотах генерации и рабочих температурах. В общем случае, реализация режима ФАПЧ возможна при отсутствии значительных изменений в тепловыделении при изменении напряжения (вследствие изменения тока), т.е. когда частота может плавно и монотонно перестраиваться с изменением тока. Другим необходимым условием успешной работы ФАПЧ является достаточная скорость отклика системы на сигнал ошибки – быстродействие, которое, вероятнее всего, в случае рассматриваемого генератора достаточно мало из-за инерционных тепловых

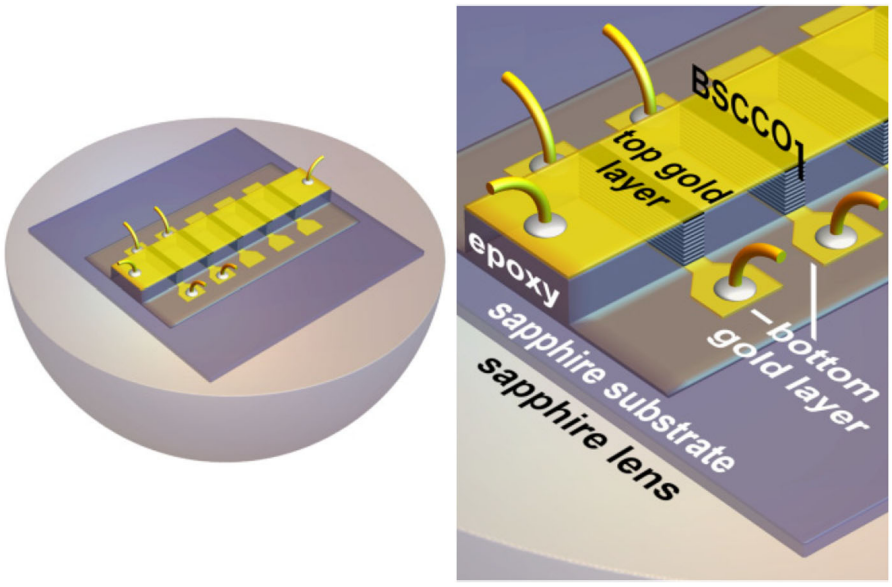
процессов. Вопрос о том, каким именно требованиям должен удовлетворять образец генератора в конкретной рабочей точке/области ВАХ для реализации режима ФАПЧ, до сих пор детально не изучен.

4.2. Синхронизация двух близко расположенных генераторов $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$

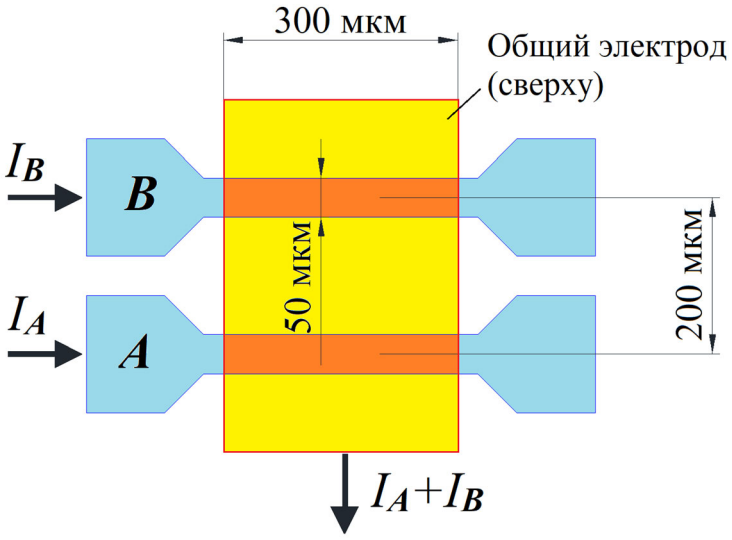
С целью повышения мощности излучения и возможного уменьшения ширины линии известны работы по созданию систем из нескольких отдельных массивов джозефсоновских переходов на основе BSCCO (например, [155]). Однако, спектральные измерения с высоким разрешением, позволяющим точно определять не только частоту, но и ширину линии генерации, в таких системах до настоящей работы не проводились.

В настоящем исследовании была использована улучшенная конструкция генераторов, отличная от представленной на рис. 4.1, с двухсторонним золотым покрытием – сверху и снизу рабочей части монокристалла BSCCO, как показано на рисунке 4.18 а. Структура содержала 5 генераторов в виде мезы BSCCO на общей подложке Al_2O_3, имеющих независимые нижние контактные электроды из золота толщиной ~200 нм и общий верхний электрод толщиной ~70 нм, также изготовленный из золота. Расстояние между соседними мезами составляло 200 мкм Электроды из золота обеспечивают качественный тепловой контакт с подложкой, общий верхний электрод способствует тепловой связи генераторов друг с другом, а также может способствовать электродинамической связи (синхронизации), которая и являлась предметом исследования. Технология изготовления более детально описана в работе **[А3]**. Размер каждой мезы составляет 50 × 300 × 0,7 мкм, а количество переходов, определенное по напряжению и частоте генерации в рабочей точке, составляло примерно $N \approx 460$. Подложка, содержащая 5 генераторов, связанных общим верхним электродом из золота, уставлена на

линзу из Al_2O_3, т.е. материалы подложки и линзы идентичны. Поскольку технология изготовления монокристаллических структур BSCCO в виде мезы является низко воспроизводимой, характеристики генераторов на подложке значительно отличаются, в частности, имеют сильно различную мощность излучения. В работе была исследована синхронизация двух соседних генераторов, расположенных возле края подложки. Для простоты образцы пяти генераторов от одного края к другому были обозначены латинскими литерами ***A***, ***B***,… ***E*** в алфавитном порядке; таким образом, в работе исследовалось излучение и синхронизация двух крайних соседних образцов ***A*** и ***B***, как показано на рисунке 4.18 б. Общий (верхний) электрод из золота использовался в качестве общего «минусового» контакта смещения всех генераторов по постоянному току и был заземлен.



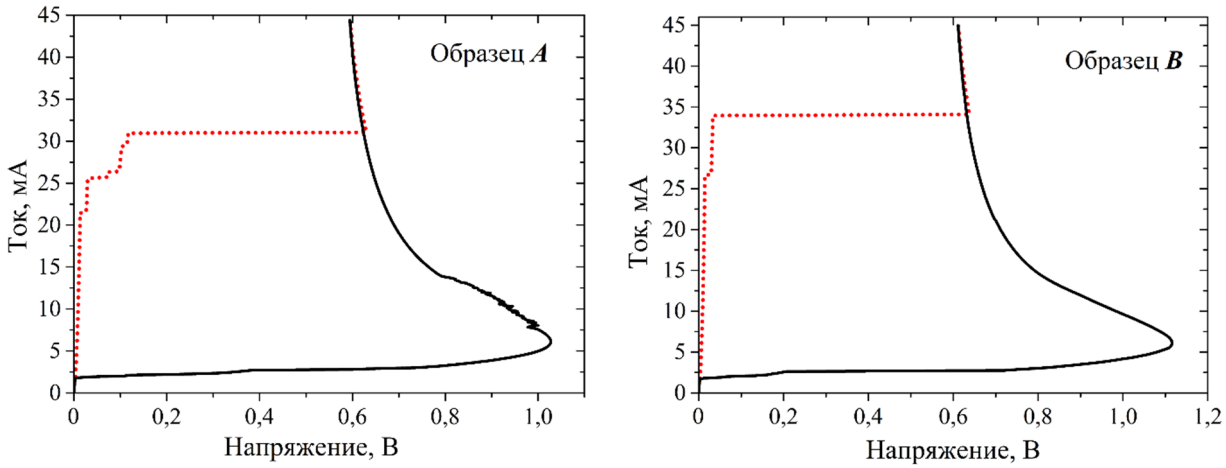
(а)



(б)

Рисунок 4.18 – Схематичное изображение исследуемой структуры. (а) Схема генераторов с указанием материалов (справа) и схема установки на линзу (слева) **[А3]**. (б) Схема смещения по постоянному току исследуемых генераторов ***A*** и ***B*** с общим верхним электродом из золота.

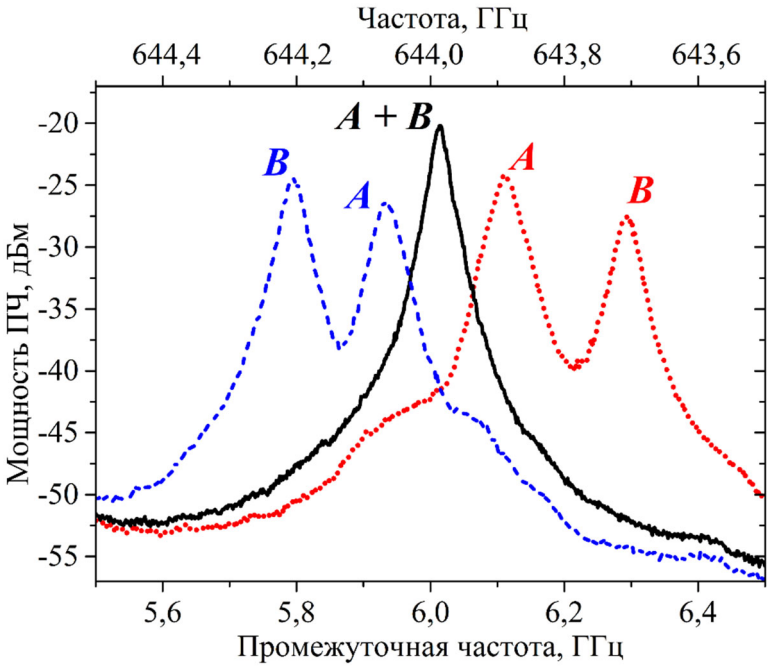
Экспериментальная установка по исследованию спектров излучения при помощи СИП полностью идентична установке, использованной в разделе 4.1.4 (рисунок 2.9 б), с одним лишь отличием: в настоящем исследовании использованы два генератора BSCCO на общей подложке, каждый с независимым заданием тока смещения. Нагреватель в данном эксперименте не использовался, а рабочая температура образцов (датчик был установлен на держателе линзы) вследствие их самонагрева составляла около 15 К. ВАХ образцов ***A*** и ***B*** представлены на рисунке 4.19. Гетеродин СИП был установлен на рабочей частоте 650 ГГц и стабилизирован по фазе, а представленные далее спектры BSCCO регистрировались в «нижней» полосе ПЧ относительно частоты гетеродина, т.е. в диапазоне 642-646 ГГц. В данном эксперименте изменение тока через один из образцов (например, через ***B*** – I_B) и, соответственно, его частоты, приводило к небольшому изменению температуры и, следовательно, частоты генерации другого образца (***A***) за счёт их тепловой связи.



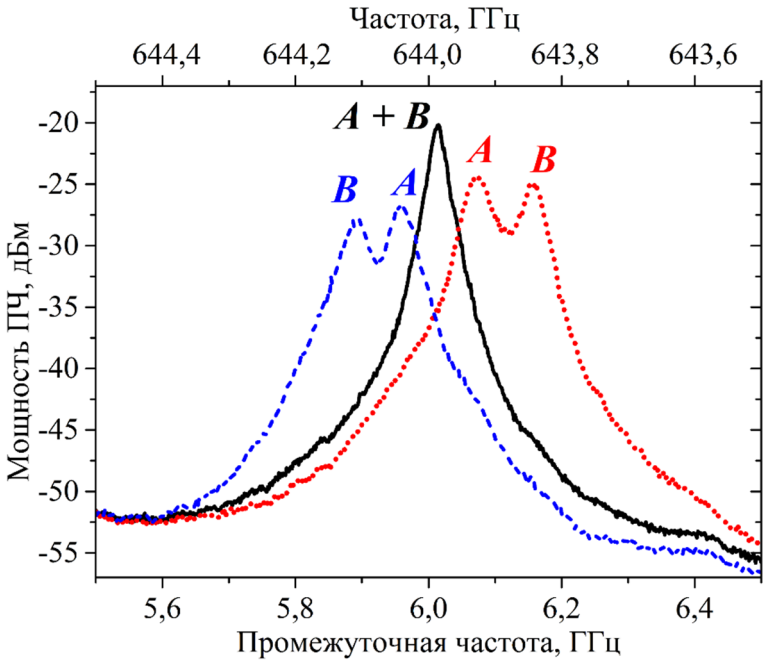
(а) (б)

Рисунок 4.19 – ВАХ исследуемых образцов генератора BSCCO, расположенных на одной микросхеме и связанных общим верхним электродом (а) ***A*** и (б) ***B***. Красная пунктирная кривая – прямое задание тока, чёрная сплошная – обратное задание тока.

Спектры излучения образцов ***A*** и ***B*** в окрестности частоты 644 ГГц представлены на рисунке 4.20 (в логарифмическом масштабе) и рисунке 4.21 (в линейном масштабе). Во всех случаях ток образца ***A*** был неизменен и составлял $I_A = 24{,}571$ мА, в то время как ток образца ***B*** (I_B) варьировался в окрестности значения 32,3 мА. Так, при повышении тока I_B напряжение образца ***B*** и частота генерации уменьшаются; при этом частота образца ***A*** также уменьшается вследствие дополнительного нагрева от «соседнего» генератора ***B***, что соответствует сдвигу на представленных спектрах (рис. 4.20 и 4.21) слева направо с учетом «нижней» полосы ПЧ относительно частоты гетеродина. Из-за неравномерности АЧХ выходного сигнала интегрального приемника в диапазоне 4-8 ГГц, вызванной стоячими волнами в выходном тракте, в близкой окрестности частоты 5,9 ГГц амплитуда пиков уменьшается; все спектры представлены без поправки на неравномерность АЧХ тракта ПЧ.

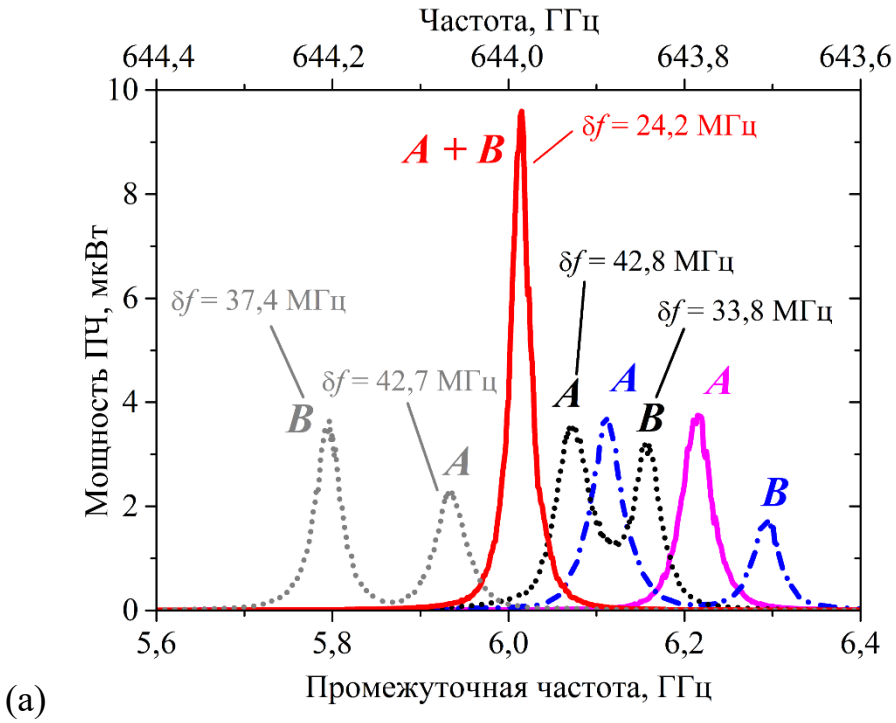


(а)

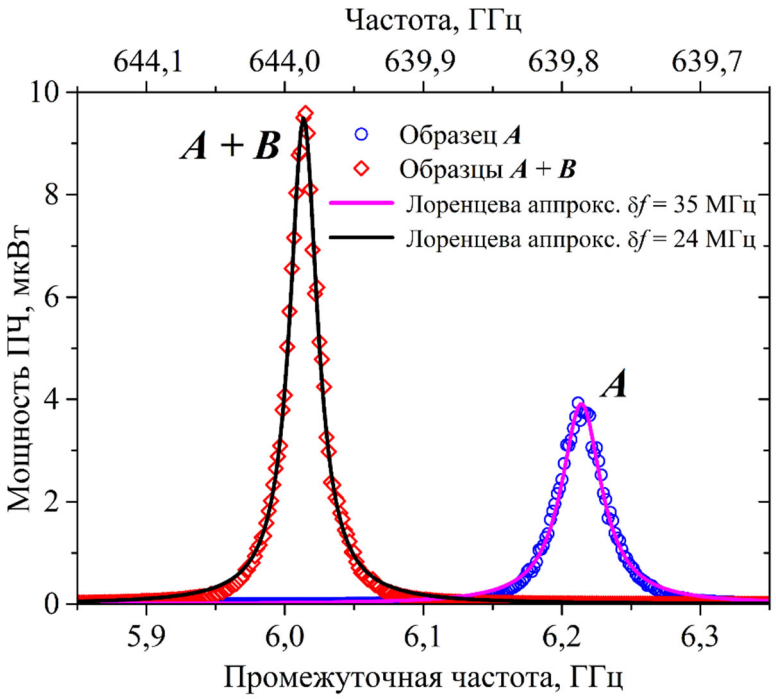


(б)

Рисунок 4.20 – Спектры излучения образцов генератора ***A*** и ***B*** на частоте в окрестности 644 ГГц, измеренные при помощи СИП. Ток I_A = 24,571 мА во всех случаях и неизменен, ток I_B варьировался в малых пределах:
(а) I_B = 32,313 мА (синяя кривая), I_B = 32,363 мА (черная кривая), I_B = 32,438 мА (красная кривая);
(б) I_B = 32,338 мА (синяя кривая), I_B = 32,363 мА (черная кривая), I_B = 32,400 мА (красная кривая).



(а)



(б)

Рисунок 4.21 – Спектры излучения образцов генератора ***A*** и ***B*** на частоте в окрестности 644 ГГц (в линейном масштабе мощности), измеренные при помощи СИП. Ток I_A = 24,571 мА во всех случаях и неизменен, ток I_B варьировался в малых пределах: (а) I_B = 32,313 мА (серая кривая), I_B = 32,363 мА (красная кривая), I_B = 32,400 мА (черная кривая), I_B = 32,438 мА (синяя кривая), I_B = 32,476 мА (пурпурная кривая); (б) I_B = 32,363 мА (красные ромбы и аппроксимация лоренцевой формой – сплошная черная кривая), I_B = 32,476 мА (синие кружки и аппроксимация лоренцевой формой – сплошная пурпурная кривая). Мощность в пике «***A***+***B***» превышает максимальную мощность образца ***A*** в 2,6 раза (~4,3 дБ).

В случае, когда частота генераторов ***A*** и ***B*** совпадают (сплошные кривые на рис. 4.20), результирующая мощность пика возрастает, что более наглядно представлено при построении графика с линейной шкалой мощности (рис. 4.21). Важным результатом является то, что общая мощность излучения в пике в случае совпадения частот генераторов примерно на 15-20% выше, чем сумма мощностей «отдельных» сигналов или удвоенная мощность отдельного генератора (***A*** либо ***B***) в пике. Кроме того, ширина спектральной линии излучения при совпадении частоты генераторов составляет около 24 МГц, в то время как ширина линии излучения генераторов ***A*** и ***B*** «по отдельности» в автономном режиме составляет примерно от 33 до 42 МГц (см. рис. 4.21 а, б). Уменьшение ширины линии при совпадении частоты генераторов ***A*** и ***B*** и увеличение мощности сигнала в пике в сравнении с суммой мощностей отдельных генераторов свидетельствует **о взаимной синхронизации двух генераторов**. Такая синхронизации близко расположенных генераторов может быть вызвана некоторыми резонансными условиями в электродинамической системе.

Таким образом, в настоящей работе впервые была экспериментально продемонстрирована возможность синхронизации нескольких генераторов BSCCO, расположенных на одной подложке на расстоянии меньше длины волны излучаемого сигнала и имеющих общий электрод. Механизмы и эффективность синхронизации требуют более тщательного исследования.

4.3. Спектральные исследования генератора на основе цепочек джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb с высоким разрешением

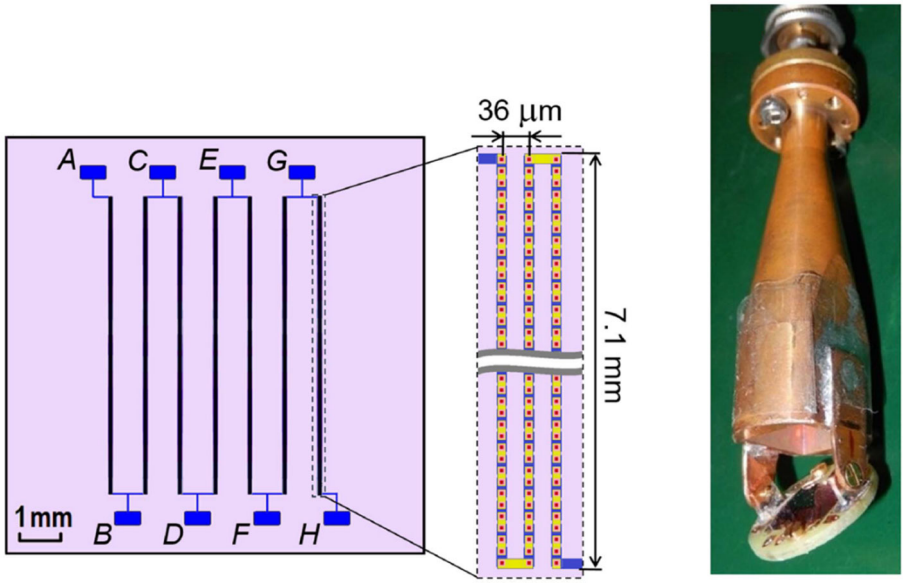
Одной из групп, активно занимающихся разработкой и исследованием генераторов на цепочках джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb, является объединенная группа исследователей из Института физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород (далее – ИФМ РАН), Тюбингенского университета и Стокгольмского университета (г. Стокгольм, Швеция) [97-99]. Ввиду

ограниченных возможностей измерений спектральных характеристик с высоким разрешением в субТгц/ТГц диапазоне частот, первое исследование спектров излучения цепочек Nb/NbSi/Nb состоялось в Институте радиотехники и электроники РАН (г. Москва) в группе диссертанта, поскольку в распоряжении группы имеется спектрометр высокого разрешения диапазона 200-300 ГГц на основе СИС смесителя Nb/AlO_x/Nb высокого качества. Спектральные исследования были проведены непосредственно диссертантом и ключевым представителем из группы ИФМ РАН – М.А. Галиным, в которой генератор был разработан [**A5**].

Экспериментальный образец генератора, использованный в данном разделе, был изготовлен на базе государственного физико-технического института *PTB* (г. Брауншвейг, Германия) и предоставлен коллегами из ИФМ РАН для совместных исследований. СИС приемник диапазона 211-275 ГГц, использованный при исследовании в настоящем разделе, был создан силами объединенной группы исследователей из Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (численные расчёты, разработка схемы) и Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (изготовление микросхемы приемника, сборка на базе криогенной установки на замкнутом цикле) [32,**A2**]. Поскольку основной вклад диссертанта в данном исследовании состоит исключительно в проведении спектральных измерений излучения генератора, разработанного в дружественной научной группе и предоставленного для совместных исследований, результаты и положения, связанные с разработкой генератора и его характеристиками, не выносятся на защиту. Все рисунки, представленные в данном разделе, приведены в неизменном виде из работы **[A5]** на языке оригинала (английском), а необходимые пояснения приведены в тексте.

4.3.1. Описание конструкции генератора и его вольтамперные характеристики

Схема и конструкция генератора на основе ЦДП, состоящего из 9996 последовательно соединенных джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb, представлены на рисунке 4.22.



(а) (б)

Рисунок 4.22 – (а) Топология исследуемого генератора на основе цепочки переходов: 7 частей, каждая состоит из 3 секций, 476 переходов Nb/NbSi/Nb в каждой секции. Переходы обозначены красными квадратами и сформированы в области перекрытия верхнего (желтые прямоугольники) и нижнего (синие прямоугольники, частично перекрытые желтыми) электродов. Массив изготовлен на кремниевой подложке размером 10×10 мм. Латинскими литерами от *A* до *H* обозначены контактные площадки между соседними частями. (б) Фотография криогенного модуля генератора: микросхема установлена на держатель и размещена напротив входного рупора с квадратным сечением 12×12 мм, который собирает излучение генератора и направляет его через волновод в открытое пространство.

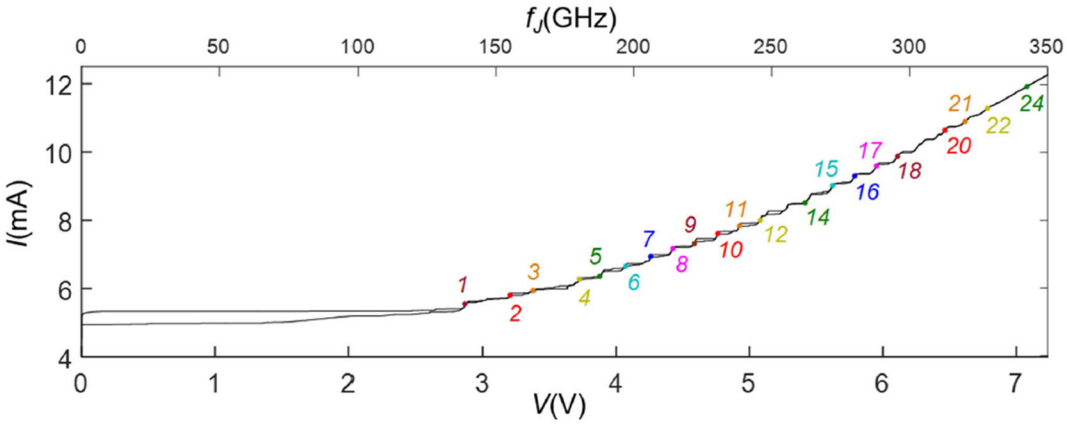
Массив состоит из 21 секции, разделенной на 7 одинаковых визуально параллельных участков (не в смысле электрического соединения) длиной по 7,1 мм в форме меандра; интервал между участками составляет 36 мкм. Каждый участок состоит из 3-х секций, каждая из которых, в свою очередь, содержит 476 переходов Nb/NbSi/Nb площадью 8×8 мкм. Топология

микросхемы формировалась с помощью электронной-лучевой литографии и реактивно-ионного травления [190]. Микросхема устанавливается в специальную зонд-вставку для погружения в сосуд Дьюара с жидким гелием (см. фото на рис. 4.22 б и схему установки на рис. 2.10). Зонд-вставка включает в себя СВЧ волноводную систему общей длиной около 1 м для вывода излучения из полости сосуда Дьюара в открытое пространство. Система вывода состоит из квадратного рупора с сечением 12×12 мм, конического сужения WR12 и прямоугольного волновода 11×5,5 мм. Микросхема с ЦДП размещена в апертуре рупора на нижнем конце зонда-вставки, который погружается в сосуд Дьюара. Таким образом, излучаемый сигнал поступает в рупор, проходит через конус, который отфильтровывает («устраняет») высокие моды, и затем проходит через длинный волновод к верхнему концу погружной вставки, который размещен при комнатной температуре в открытом пространстве. Волновод является сверхразмерным по отношению к рабочей длине волны излучаемого сигнала, что позволяет уменьшить рассеяние излучения на стенках волновода в сравнении со случаем использования одномодового волновода. Рупор и конус изготовлены из меди, в то время как волновод изготовлен из нержавеющей стали для уменьшения притока тепла из комнаты к образцу (теплопроводность стали примерно на порядок ниже, чем у меди). Микросхема генератора окружена экраном из криопермаллоя с целью уменьшения внешних электромагнитных наводок.

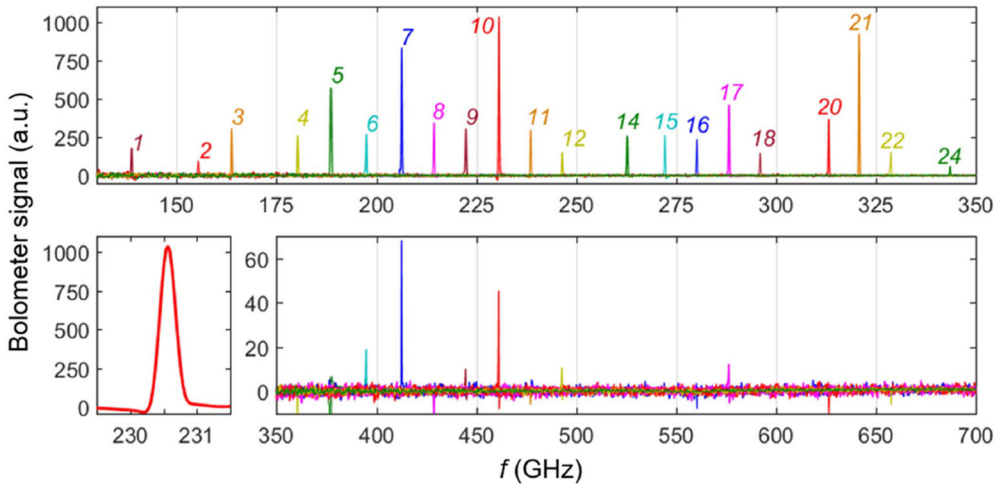
Следует отметить, что чип ориентирован под углом примерно 45° относительно входной апертуры рупора, как видно на рис. 4.22 б. Ранее было экспериментально установлено, что при таком угле наклона достигается максимальная мощность излучения в открытое пространство и составляет ~3 мкВт на выходном конце волновода в диапазоне 140-200 ГГц. Это подтверждает тот факт, что резонансные моды, возбуждаемые в сверхразмерных (относительно излучаемой длины волны) массивах джозефсоновских переходов, содержат компоненты бегущей волны, как было предсказано теоретически [191-192] и наблюдалось экспериментально [25,26].

Из-за компоненты бегущей волны угловое распределение джозефсоновского излучения относительно поверхности образца должно быть асимметричным.

ВАХ полной цепочки ЦДП (между контактными площадками *A* и *H*) представлена на рисунке 4.23 а, а результаты исследования частоты генерации на ступенях ВАХ, проведенные в группе ИФМ РАН при помощи широкополосного Фурье-спектрометра, аналогичного представленному в разделе 2.2.2, – на рисунке 4.23 б. Следует заметить, что реальная частота излучения генератора, измеренная при помощи спектрометра, практически совпадает с джозефсоновской частотой каждого перехода, вычисленная по соотношению (4.1) с учетом их количества. Это свидетельствует об одинаковом падении напряжения на переходах в пределах точности измерений, т.е. низком разбросе параметров переходов внутри массива (их технологической идентичности).



(а)



(б)

Рисунок 4.23 – (а) Вольтамперные характеристики цепочки из $N = 9996$ джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb. Числами на графике обозначен номер ступени, а точками на каждой ступени – рабочие точки, в которых проводились измерения частоты Фурье-спектрометром. Верхняя горизонтальная ось показывает джозефсоновскую частоту f_J, непосредственно пересчитанную из напряжения на ВАХ по соотношению Джозефсона (4.1) с учетом количества переходов N. (б) Сверху – спектры основной гармоники генерации, полученные при помощи Фурье-спектрометра в ИФМ РАН, аналогичного представленному на рис. 2.7; номера пиков соответствуют номерам ступеней на ВАХ. Снизу слева – пик на 10-й ступени в увеличенном масштабе, фактически демонстрирующий спектральное разрешение спектрометра. Снизу справа – часть спектра, в которой наблюдаются слабые линии излучения на второй гармонике. Расположение графиков друг под другом в по шкале частоты в точности соответствует удвоенной частоте для нижнего правого графика относительно верхнего.

4.3.2. Спектры излучения генератора

Исследование спектров излучения ЦДП с высоким разрешением (лучше 0,1 МГц) проводилось при помощи высокочувствительного СИС приемника в диапазоне ПЧ 4-8 ГГц. Схема экспериментальной установке приведена на рисунке 2.10 в разделе 2.3.3. Излучение на основной гармонике наблюдалось практически на каждой ступени ВАХ из рис. 4.23 а, а частота генерации

соответствовала результатам определения частоты по Фурье-спектрометру. При этом ширина и форма спектра излучения значительно зависят от рабочей частоты (ступени), а также от внешних наводок и «перекрестных» помех, возникающих в системе в различной степени. Наибольшая мощность сигнала ПЧ наблюдалась в рабочей точке на 12-й ступени, в окрестности частоты 246 ГГц. При измерении ширины линии были приложены некоторые усилия по уменьшению внешних наводок в системе – подбор наименее шумного источника питания, использование дополнительных фильтров в схеме задания питания элементов, отключение стороннего оборудования высокой мощности в здании (компрессоры и др.), которые могут давать дополнительные помехи как в сети питания ~50 Гц 220 В, так и радиопомехи в открытом пространстве; все перечисленные факторы влияли на результат измерений в большей или меньшей степени. В результате наилучшая ширина линии δf составила порядка 1,5 МГц, как показано на рисунке 4.24. Спектральная линия не слишком качественно аппроксимируется лоренцевой формой, как это успешно выполняется для генераторов на основе РДП и BSCCO, что все еще свидетельствует о влиянии технических наводок в системе, значительно уширяющих спектр генерации. Следует отметить, что в продолженной серии работ группы ИФМ РАН без участия диссертанта авторам удалось достичь уменьшения ширины линии в автономном режиме до ~100 кГц, а также стабилизировать сигнал при помощи частотного детектора и полупроводниковой системы ФАПЧ (напр., [193]), однако первые измерения спектров генератора с высоким разрешением было проведено именно в настоящей работе **[A5]**.

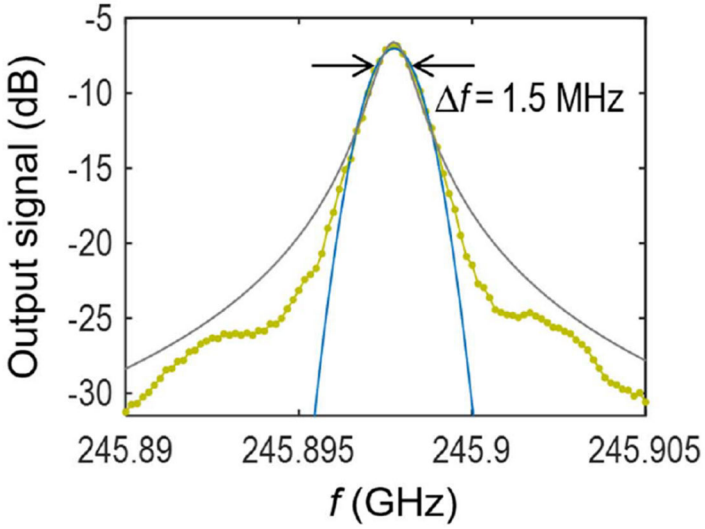


Рисунок 4.24 – Спектр излучения генератора на основе ЦДП, измеренный на 12-й ступени ВАХ из рис. 4.23 а при помощи СИС приемника. Точки – экспериментальные данные (соединены для наглядности); серая кривая – аппроксимация лоренцевой функцией, голубая кривая – аппроксимация гауссовой функцией. На графике использовано обозначение для ширины линии Δf вместо принятого в диссертации δf.

На рисунке 4.25 а показаны результаты измерения ширины линии в зависимости от номера ступени – от 4-й до 20-й; представление данных в виде вертикальных столбиков использовано для наглядности, а цвет столбиков соответствует цвету номера ступени из рис. 4.23. δf составляет около ~3-4 МГц при номерах ступеней до 12, локально увеличиваясь до ~8-10 МГц на ступенях с 9-й по 11-ю. Результат для 12-й ступени из рис. 4.25 а $\delta f \approx 3{,}5$ МГц не соответствует результату из рис. 4.24 ($\delta f \approx 1{,}5$ МГц), поскольку данные для рис. 4.25 а были получены в серии экспериментов с неоптимизированным уровнем внешних наводок. Начиная с 14-й ступени δf значительно возрастает вплоть до максимального измеренного значения около 44 МГц на 19-й ступени. Таким образом, в общей картине наблюдается тенденция к возрастанию δf с ростом номера ступени, что коррелирует с уменьшением дифференциальной проводимости $\mathrm{d}I/\mathrm{d}V = R_\mathrm{d}^{-1}$, как показано на рисунке 4.25 б.

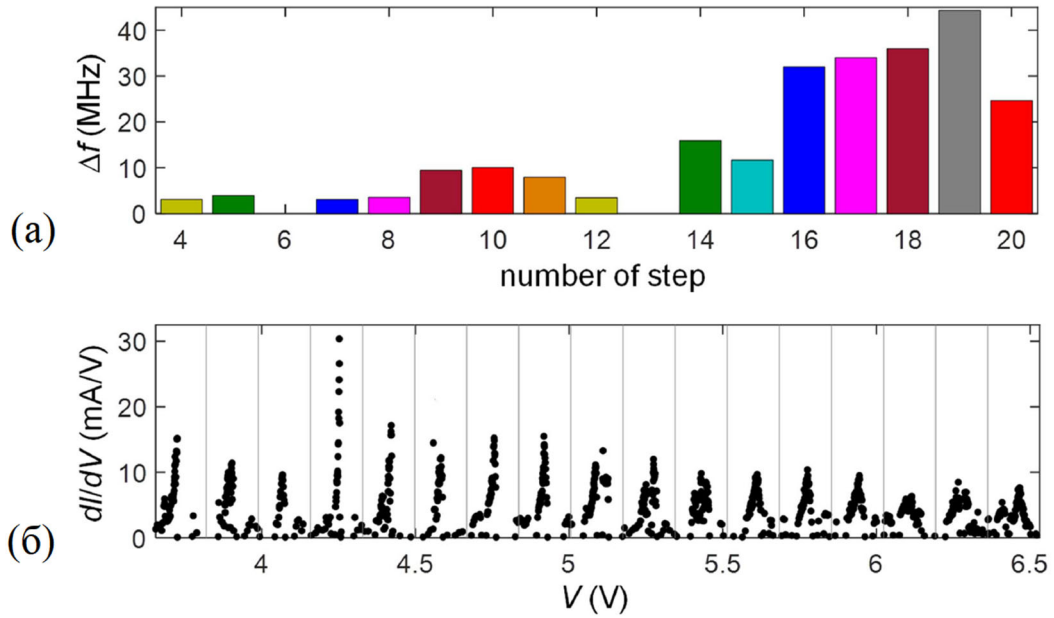


Рисунок 4.25 – (а) Зависимость ширины линии излучения ЦДП на основной гармонике, измеренной при помощи СИС приемника, от номера ступени ВАХ из рис. 4.23. На графике использовано обозначение для ширины линии Δf вместо δf. (б) Дифференциальная проводимость ЦДП в зависимости от напряжения. Вертикальными линиями обозначено положение ступеней тока на ВАХ, расстояние между ними в единицах частоты, пересчитанной по соотношению Джозефсона (4.1), составляет 8,2 ГГц.

4.3.3. Регистрация спектра излучения на второй гармонике

Верхний предел рабочих частот используемого СИС приемника составляет примерно 300 ГГц (напомним, что согласно техническим требованиям, приёмник разрабатывался для входного диапазона частот 211-275 ГГц [32,**А2**] – см. раздел 2.3.3), что позволило зарегистрировать сигнал на второй гармонике для 1-й ступени ВАХ с частотой основного сигнала около 139 ГГц. Спектр второй гармоники на частоте около 277 ГГц представлен на рисунке 4.26. Как и для сигнала основной гармоники, аппроксимация спектральной линии лоренцевой либо гауссовой функцией достаточно далека от экспериментальной формы кривой из-за технических шумов в системе.

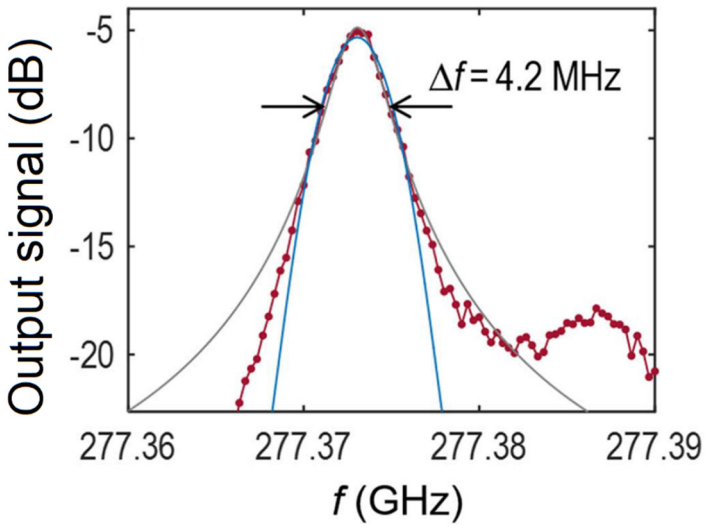


Рисунок 4.26 – Спектр излучения второй гармоники генератора на основе ЦДП, измеренный на 1-й ступени ВАХ из рис. 4.23 а при помощи СИС приемника. Точки – экспериментальные данные (соединены для наглядности); серая кривая – аппроксимация лоренцевой функцией, голубая кривая – аппроксимация гауссовой функцией. На графике использовано обозначение для ширины линии Δf вместо принятого в диссертации δf.

Следует отметить, что при использованном в работе наборе экспериментальных установок и инструментов невозможно проведение спектральных исследований с высоким разрешением одновременно двух гармоник ЦДП в одной рабочей точке, что было успешно реализовано для РДП в разделе 3.6.2 на частоте f в области 300-335 ГГц и $2f$ в области 600-670 ГГц за счёт наличия цепи обратной связи и внешнего приемника (СИП). В условиях отсутствия цепи СВЧ обратной связи с генератором и с учетом рабочего диапазона СИС приемника 200-300 ГГц принципиально (арифметически) невозможна одновременная регистрация 1-й и 2-й гармоник в пределах рабочего диапазона. Сравнение спектральной ширины линии сигнала ЦДП на различных гармониках при фиксированной рабочей точке генерации (подобное проведенному в разделе 3.6.2 для РДП) представляется будущей интересной задачей.

Таким образом, несмотря на достаточно большое количество научных работ по исследованию ширины линии генерации цепочек джозефсоновских переходов $Nb/AlO_x/Nb$, в данной работе проведены первые спектральные

исследования генераторов на основе цепочек переходов Nb/NbSi/Nb. Технические наводки в экспериментальной установке приводили к уширению спектральной линии генерации, что свидетельствует о необходимости оптимизации измерительных схем и уменьшения уровня внешних шумов. Тем не менее, зарегистрированное значение ширины линии на уровне единиц-десятков МГц демонстрирует перспективность использования таких генераторов в качестве практических устройств в субТГц – ТГц диапазоне частот.

4.4. Выводы главы

В данной главе исследованы генераторы субТГц диапазона на основе массивов джозефсоновских контактов с излучением сигнала в открытое пространство, реализованных в двух принципиально различных концепциях и конструктивных реализациях. Первый из исследованных типов основан на естественно образованном массиве джозефсоновских переходов в монокристалле высокотемпературного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$, второй – на специально изготовленной методами напыления и микролитографии цепочки последовательно соединенных сосредоточенных джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb. Основные полученные результаты главы:

1. Проведено исследование мощности сигнала в открытое пространство генератора на основе BSCCO в некалиброванном режиме при помощи широкополосного болометра и исследование частоты генерации при помощи широкополосного Фурье-спектрометра в широком диапазоне температур от 4,2 до 50 К. Экспериментально показано, что частота генерации не определяется измеряемым напряжением образца BSCCO по причине возникновения в системе дополнительного сопротивления вследствие образования «горячего пятна». Предложен метод оценки частоты генерации в рабочей точке на серии ВАХ при различных температурах путем построения

«кривых постоянной частоты» на основе набора калибровочных измерений частоты в некоторых рабочих точках.

2. Проведено исследование спектральных характеристик джозефсоновского генератора на основе монокристалла высокотемпературного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ в зависимости от режима работы (области рабочих точек ВАХ) и температуры образца; ширина линии генерации менялась в широком диапазоне и составила от нескольких МГц в режиме больших токов до ~0,5-1 ГГц в режиме малых токов. Обнаружена нетривиальная зависимость ширины спектральной линии генерации в зависимости от температуры образца, при которой наименьшее значение δf достигается в области значений температуры ~25-40 К (для разных экспериментальных образцов и конструкций теплоотвода в криогенном модуле), далёкой как от нуля, так и критической температуры T_c. Экспериментально полученная нетривиальная зависимость $\delta f(T)$ с оптимумом при некотором значении температуры (далеком от нуля и T_c) позволила построить численную «секционную» модель генератора, в котором система представлена двумя секции переходов с различной температурой (T_1 и T_2), термически связанными с подложкой при температуре T_b, а также шунтирующим сопротивлением при температуре T_2, модельно имитирующим «горячее пятно». Показано, что при наличии градиента двух параметров – критического тока и сопротивления переходов – экспериментально полученная нетривиальная зависимость может быть $\delta f(T)$ объяснена при помощи численной модели. Такой градиент может быть физически объяснен невертикальными («скошенными») краями мезы вследствие травления при изготовлении.

3. Продемонстрирована возможность фазовой стабилизации излучения генератора к внешнему опорному сигналу при помощи полупроводниковой системы ФАПЧ. Ширина спектральной линии в фазо-стабилизированном режиме без учета фазовых шумов опорного синтезатора определялась

спектральным разрешением используемого анализатора спектра и составляла не более 1 Гц.

4. Получена взаимная синхронизация двух генераторов на основе высокотемпературного сверхпроводника BSCCO, расположенных на одной микросхеме на расстоянии 200 мкм друг от друга и имеющих общий электрод из золота. На частоте около 650 ГГц ширина спектральной линии генерации каждого отдельного генератора составляла около 35-40 МГц, в то время как ширина линии сигнала в результате синхронизации составила около 24 МГц, при этом мощность синхронизированного сигнала в центральном пике составила величину на 15-20% выше, чем сумма отдельно взятых мощностей генераторов в пике. Подтверждена принципиальная возможность синхронизации нескольких генераторов данного типа за счет их геометрической близости – расположения на расстоянии, меньшем длины волны излучаемого сигнала.

5. Измерены спектральные характеристики генератора на основе цепочки последовательно соединенных джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb, излучающего сигнал в открытое пространство через волноводную линию передачи, в диапазоне 180-310 ГГц при помощи гетеродинного СИС приемника на основе Nb/AlO_x/Nb со спектральным разрешением лучше 0,1 МГц. Форма спектральной линии генератора была значительно искажена шумами и внешними электромагнитными помехами, которые могут быть минимизированы с целью уменьшения ширины линии. Измерены спектральные характеристики генератора на второй гармонике при основной частоте генерации около 139 ГГц.

Все полученные результаты опубликованы в работах: [**A2, A3, A5, A12, A14, A17, A19, A22, A23, A24, A25, A26, A27, A29, A30, A31, A32, A35, A45, A46**]. Приведенные в данной главе экспериментальные результаты получены автором лично либо с определяющим вкладом автора. Разработка и изготовление экспериментальных образцов BSCCO проведены группой ученых из Нанкинского университета, Национального института

материаловедения (г. Цукуба, Япония) и Тюбингенского университета. Непосредственное построение и решение численной модели BSCCO (раздел 4.1.4) проведено Б. Гроссом из группы Тюбингенского университета. Разработка и изготовление экспериментальных образцов цепочек переходов Nb/NbSi/Nb, а также их характеризация (раздел 4.3.1), за исключением спектральных исследований с высоким разрешением, проведены группами ученых из ИФМ РАН (г. Нижний Новгород) и Германии. Спектральные исследования цепочек проведены диссертантом совместно с Галиным М.А., а численный анализ экспериментальных результатов, представленный в разделах 4.3.2, 4.3.3, – непосредственно Галиным М.А. Гетеродинный СИС приемник диапазона 211-275 ГГц, использованный при исследовании цепочек переходов Nb/NbSi/Nb, был разработан группой ученых из Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва) под руководством Худченко А.В. и собран на базе экспериментального оборудования Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН с непосредственным участием диссертанта.

Глава 5

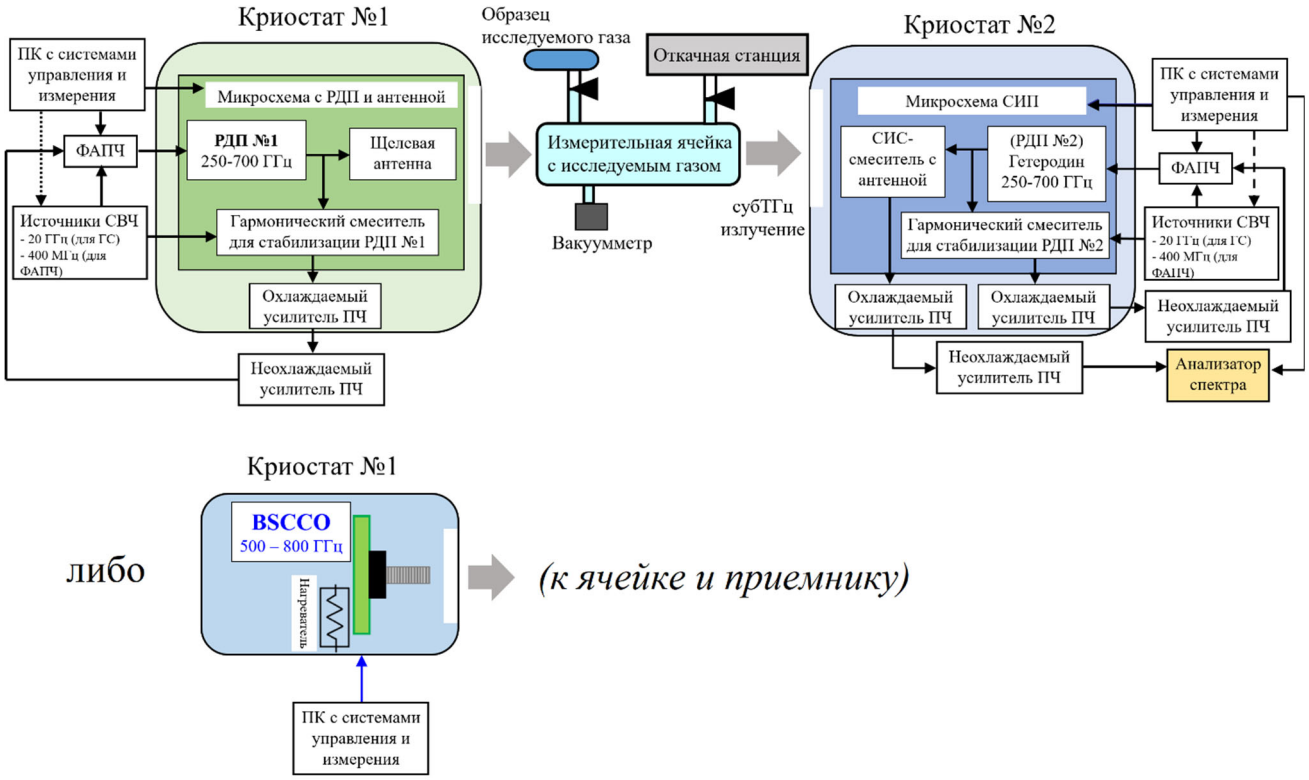
Спектроскопия газовых смесей с использованием сверхпроводниковых генераторов в качестве активного источника субТГц сигнала

Настоящая глава посвящена демонстрации практического использования сверхпроводниковых источников двух типов – на основе РДП и на основе BSCCO – для спектроскопии газовых смесей в субТГц диапазоне частот в лабораторных условиях. В данном подходе применяется метод «активной» спектроскопии, когда перестраиваемый по частоте сигнал активного источника в открытое пространство «просвечивает» исследуемую газовую смесь, после чего спектр сигнала с учетом поглощения в газовой смеси регистрируется гетеродинным приемником. Несмотря на то, что описанные в данной главе экспериментальная установка и метод регистрации спектров не являются оптимальными с точки зрения предельно обнаружимой концентрации газовых компонент, они наглядно демонстрируют широкие возможности для применения джозефсоновских генераторов в ТГц спектроскопии в принципе. В оптимизированном для коммерческих приложений газовом анализаторе данного типа используется, в частности, частотная или фазовая модуляция сигнала источника, а измеряемый спектр поглощения восстанавливается как мощность «дифференциального» сигнала при частотной/фазовой модуляции, измеряемая в процессе плавной перестройкой несущей частоты (см. работу [**A45**] и патент на изобретение **[A49]**). Такая система частотной и фазовой модуляции была разработана для источника на основе ЛОВ, детально описанного в разделе 3.7, группой ИФМ РАН под руководством В.Л. Вакса и апробирована в совместных работах с участием диссертанта, при этом в данной диссертационной работе, посвященной джозефсоновским источникам, не рассматривается.

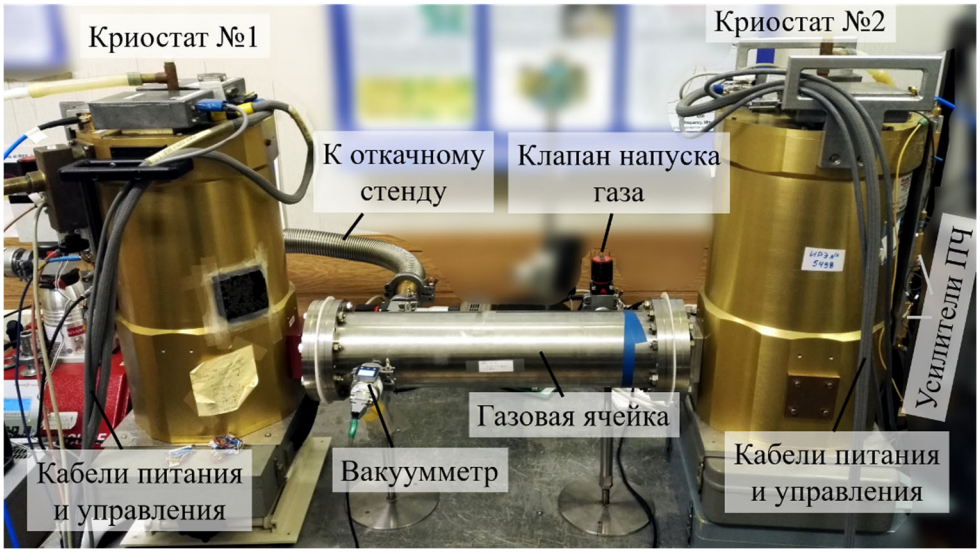
5.1. Разработка лабораторного стенда для исследования спектров поглощения газов в субТГц диапазоне

Система для регистрации линий поглощения газов основана на активном сверхпроводниковом источнике на базе РДП либо на базе BSCCO, подробно исследованных в Главах 3 и 4, соответственно, и сверхпроводниковом интегральном приемнике [21,31,**A24,A45**], описанном в разделе 1.4 и использованном в предыдущих главах для спектральных исследований источников с высоким разрешением по частоте. Схема и фотография комплексной многоэлементной системы, разработанной в рамках работы, показаны на рисунке 5.1. Выходной сигнал источника (РДП либо BSCCO) проходит через измерительную ячейку с исследуемым газом и детектируется субТГц спектрометром на основе СИП после некоторого поглощения, вызванного вращательными переходами молекул газа. Длина ячейки составляет 50 см, окна ячейки выполнены из тефлона, прозрачного в ТГц диапазоне. Ширина линии поглощения в значительной степени определяется давлением газа, которое регулируется скоростью напуска и откачки и измеряется двухдиапазонным вакуумметром. Следует отметить, что в системе имеется дополнительное поглощение сигнала воздухом с водяными парами (влажностью) в помещении, которое, тем не менее, не влияло на результат эксперимента благодаря очень широкой линии при атмосферном давлении, которая вносит однородный вклад в поглощение в частотной полосе анализа и не влияет на форму регистрируемого спектра. Полоса ПЧ приемника составляет 4 – 8 ГГц, как и во всех экспериментах с использованием СИП в рамках диссертации, при этом приемник работает в двухполосном режиме приема (верхняя и нижняя полосы относительно несущей частоты гетеродина). Спектр поглощенного сигнала в конечном итоге регистрируется анализатором спектра в диапазоне ПЧ. Интересно заметить, что случае отсутствия газа в ячейке (высокого вакуума) экспериментальная установка фактически не

отличается от соответствующей установки для исследования спектральной линии излучения генератора, представленной на рис. 2.9.



(а)

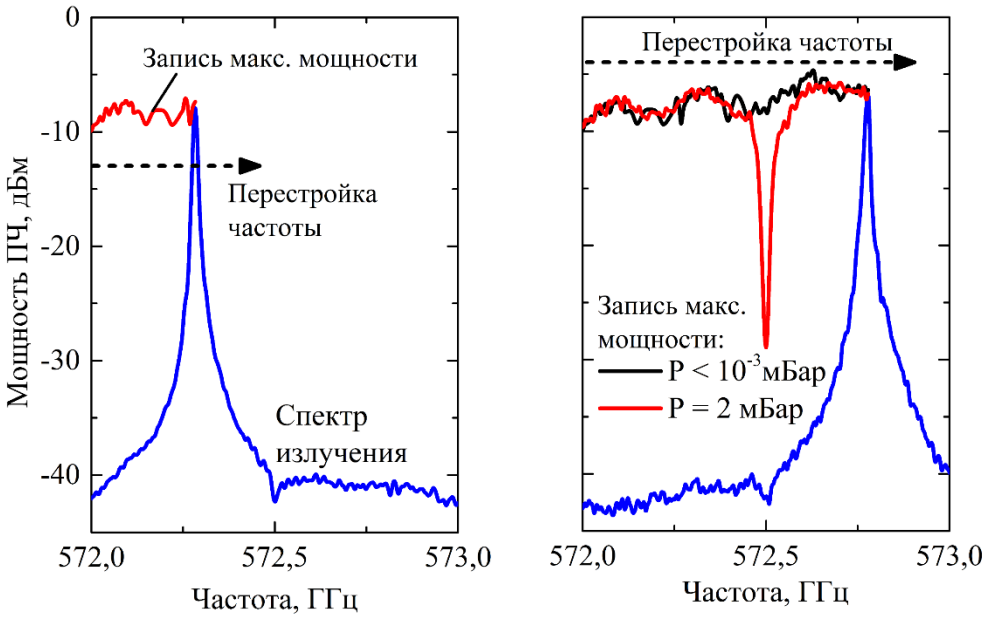


(б)

Рисунок 5.1 – (а) Схема и (б) фотография экспериментальной установки для регистрации линий поглощения газов в субТГц диапазоне на основе РДП и BSCCO. В криостате №1 установлен источник сигнала в открытое пространство на основе РДП (на *а* сверху) либо BSCCO (на *а* снизу), все вспомогательные элементы установки – ПК с системами управления и измерения, источники СВЧ, блоки питания и смещения рабочих элементов схемы, анализатор спектра и др. – находятся за пределами фотографии и не представлены.

Регистрация спектров поглощения производилась следующим образом. Допустим, необходимо произвести анализ наличия (отсутствия) конкретного газа в измерительной (газовой) ячейке, имеющего линию поглощения на частоте f_a (от англ. *absorption*) в рабочем диапазона СИП и источника, а при наличии газа – оценить уровень его парциального давления (относительной концентрации). Например, исследуемым газом является аммиак NH_3, имеющий мощную линию поглощения на частоте $f_a^{NH3} \approx 572{,}5$ ГГц. Частота гетеродина СИП (РДП №2 на рис. 5.1) устанавливается на 6 ГГц выше либо ниже f_a (напр., 578,5 ГГц для частоты поглощения аммиака 572,5 ГГц) и стабилизируется по частоте и фазе при помощи системы ФАПЧ, а частота активного источника (РДП №1 либо BSCCO на рис. 5.1) плавно перестраивается в узком диапазоне (напр., ±0,5 – 1 ГГц) в окрестности частоты f_a, в обоих направлениях либо в несколько «проходов» для повышения точности. Анализатор спектра работает в режиме записи максимального значения пика линии излучения, так что на каждой частоте «сканирования» регистрируется максимальная мощность сигнала прохождения, как показано на рисунке 5.2 а. Если газ присутствует в измерительной ячейке и его давление достаточно для обнаружения, на регистрируемой кривой наблюдается четко выраженный минимум, как показано красной кривой на рисунке 5.2 б. Когда ячейка откачана до высокого вакуума, анализатор спектра записывает относительно плоскую частотную зависимость (см. черную кривую на рис. 5.2 б), которая используется в дальнейшем как опорная кривая для обработки результатов. Поскольку выходной сигнал ПЧ не является идеально равномерным по частоте вследствие собственных частотных характеристик усилителей ПЧ наличия стоячих волн в выходном тракте приемника, регистрируемая кривая максимального значения мощности пика в отсутствии газа (опорная кривая) также не является идеально «плоской». Данная процедура повторяется несколько раз при различном давлении газа, после чего из регистрируемой кривой при каждом давлении вычитается опорная кривая, чтобы привести область спектра с отсутствием поглощения к уровню 0 дБ.

Данный метод был использован, например, в работе [194], где в качестве активного источника узкополосного сигнала использовалась ЛОВ.



(а) (б)

Рисунок 5.2 – Демонстрация методики регистрации линии поглощения газа на примере аммиака в режиме записи максимального значения пика анализатором спектра при перестройке частоты слева направо: (а) частота излучения генератора ещё не достигла частоты поглощения f_a; (б) частота излучения генератора превысила f_a при двух различных значениях давления.

Приведенная методика описывает случай, когда характерная ширина линии излучения источника δf меньше либо соизмерима с шириной линии поглощения δf_a исследуемого газа при установленном давлении; результаты исследования для такого случая описаны в разделе 5.2.1 (для источника на основе BSCCO) и разделе 5.3 (для источника на основе РДП). Если же $\delta f >> \delta f_a$, достаточно установить центральную частоту широкополосного сигнала вблизи исследуемой частоты f_a, при этом производить плавную перестройку частоты источника не требуется, спектр поглощения полностью «охвачен» полосой линии излучения.

Все демонстрационные исследования поглощения, представленные в настоящей диссертации, проводились на двух наиболее доступных газах с

мощной линией поглощения в целевом диапазоне частот – аммиаке ($f_a^{NH3} \approx 572{,}5$ ГГц) и воде ($f_a^{H2O} \approx 556{,}9$ ГГц). В качестве пробы аммиака использован доступный медицинский водный 10% раствор, следовательно, парциальное давление собственно аммиака ниже общего давления смеси, регистрируемого вакуумметром. Однако, поскольку аммиак является намного более летучим веществом, чем вода, в режиме непрерывной «откачки-напуска» газовой смеси предполагается, что аммиак испаряется в рабочий объём значительно эффективнее (быстрее), чем вода.

В качестве пробы воды использована дистиллированная вода, поэтому регистрируемое давление является истинным давлением водяных паров с поправкой на погрешность измерения и калибровочные коэффициенты вакуумметра для разных газов. В настоящем исследовании никакие дополнительные поправки на параметры конкретных газов не производились, а в качестве величины давления используется непосредственный результат измерения вакуумметром без учета его собственной погрешности. Напуск газа в ячейку осуществляется путем естественного испарения жидкости в пробирке, соединенной с входным патрубком ячейки, через игольчатый натекатель с плавной регулировкой величины отверстия напуска. Перед напуском газа ячейка предварительно откачивалась до давления ниже 10^{-5} мБар (предел измерения используемого вакуумметра) в течение 10-15 минут, а также слегка нагревалась феном (на 20-30 градусов) для удаления адсорбированных газов с поверхностей ячейки.

Важно отметить, что характеристики описанной лабораторной системы регистрации газовой смеси определяются преимущественно характеристиками приёмной системы и практически не зависят от характеристик используемого источника, при условии достаточной мощности сигнала (но не приводящей к насыщению). Так, спектральное разрешение регистрируемых спектров поглощения определяется спектральным разрешением СИП (порядка 0,1 МГц), а точность измерения относительной мощности поглощения (по отношению к мощности сигнала в отсутствии газа)

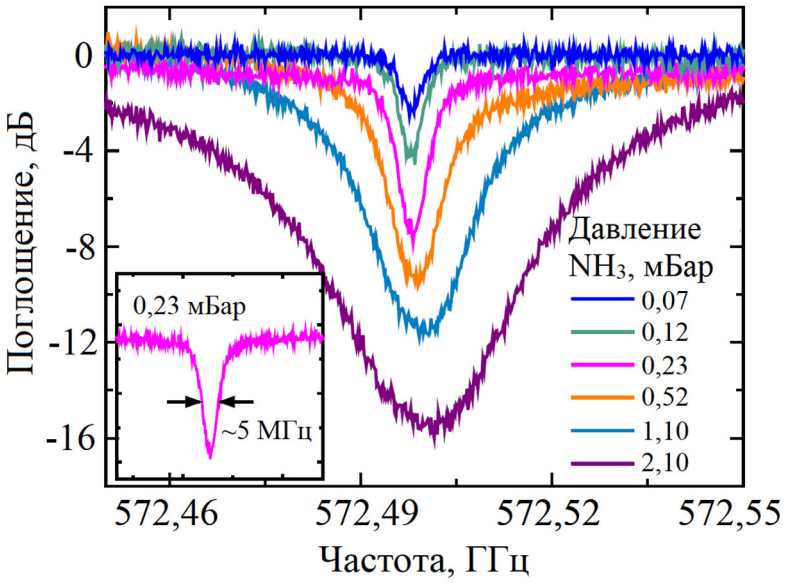
определяются шумовыми характеристиками приёмника. При этом частотная стабильность и ширина линии излучения используемого источника практически не важна, поскольку частота намеренно (методично) перестраивается в процессе измерений, а спектральное разрешение оконечного анализатора спектра может быть выбрано исходя из ширины линии источника, чтобы избежать пропусков точек по частоте (частотных «проскоков») при конечном шаге перестройки (случай слишком малой δf или δ-образного спектра источника). С другой стороны, шаг перестройки должен быть меньше ширины линии, чтобы заведомо обеспечить отсутствие частотных «проскоков» на регистрируемом спектре. Единственной характеристикой источника, влияющим на точность регистрации спектра поглощения, является амплитудная стабильность сигнала, поскольку в режиме записи наибольшего значения сигнала в пике регистрируемый максимум в каждой точке может быть обусловлен амплитудными флуктуациями источника, но не реальной характеристикой поглощения газа. В случае использования источников на основе РДП и BSCCO амплитудные флуктуации в областях стабильной генерации составляют, как правило, не более ~0,2 дБ, так что погрешность измерения мощности поглощения составляет такую же величину (±0,2-0,5 дБ) и определяется также погрешностью используемого анализатора спектра и техническими шумами в выходном тракте ПЧ.

5.2. Исследование поглощения аммиака и воды с использованием активного источника на основе $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$

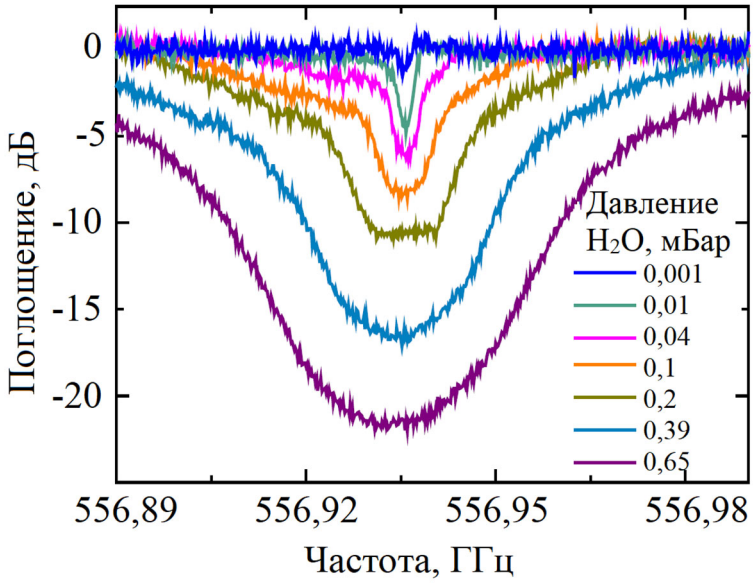
5.2.1. Генератор $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ как источник узкополосного сигнала

Ширина линии генерации генератора на основе BSCCO при регистрации линии поглощения аммиака в окрестности частоты 572,5 ГГц составляла около 60 МГц, а в окрестности линии поглощения воды на частоте 556,9 ГГц– около 57 МГц. Результаты регистрации линий поглощения при помощи метода, описанного в разделе 5.1 (схема на рис. 5.1 а), представлены на

рисунке 5.3 [**A18**]. При высоких давления (более 10 мБар) для обоих газов ширина линии поглощения слишком большая благодаря столкновительному уширению, так что спектр поглощения визуально практически не отличается от фонового шума. При уменьшении давления до ~1 мБар и ниже до сотых долей мБар начинает чётко проявляться «провал» на линии поглощения на спектральной характеристике. Так, при общем давлении паров в ячейке около 0,23 мБар, что является характерным значением по порядку величины для остаточных газов, ширина линии поглощения аммиака δf_a^{NH3} составила около 5 МГц (розовая кривая на рис. 5.3 а). При давлении 0,07 мБар измеренное значение δf_a^{NH3} составило 4 МГц; при этом на ширину линии оказывает влияние доплеровское уширение, анализ которого не проводится в рамках исследования.



(а)



(б)

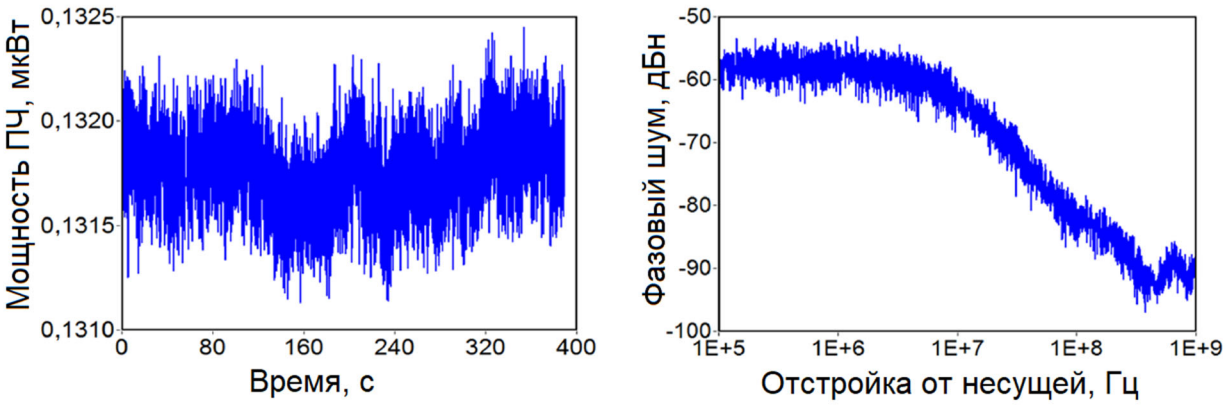
Рисунок 5.3 – Спектры поглощения газов при различных давлениях, измеренные при помощи активного источника на основе BSCCO и спектрометра высокого разрешения на основе СИП: (а) аммиака в составе 10% водного раствора, (б) водяного пара.

Таким образом, наблюдаемые в данном эксперименте частоты вращательных линий поглощения аммиака и воды в точности соответствует табличным значениям – 572,498 ГГц и 556,936 ГГц, соответственно.

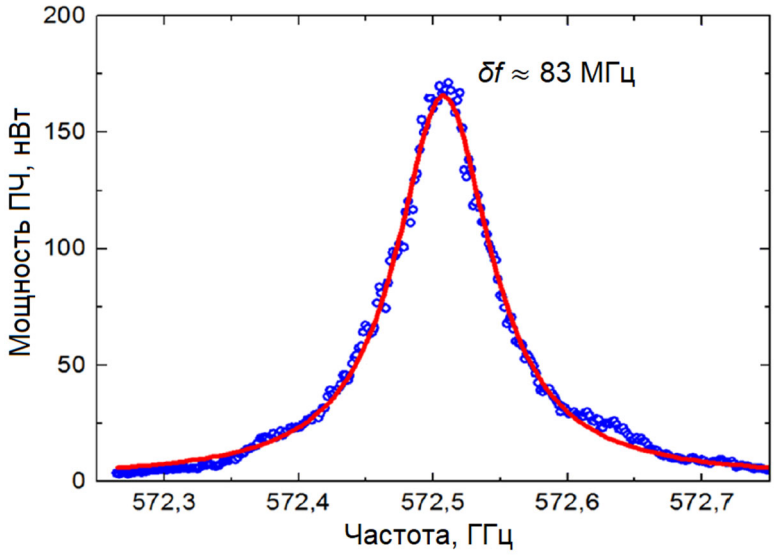
5.2.2. Генератор $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ как источник широкополосного сигнала

В случае, когда ширина линии активного источника значительно превосходит ширину линии поглощения исследуемого газа ($\delta f >> \delta f_a$), возникает вопрос о возможности использования источника в качестве генератора широкополосного шума для ТГц спектроскопии. При этом в процессе регистрации линии поглощения отсутствует необходимость перестройки частоты генератора, а также записи максимальной мощности в пике сигнала, прошедшего через ячейку, как это было описано в разделе 5.1 для случая $\delta f \leq \delta f_a$. Использование при измерениях лишь одной частоты (рабочей точки) генератора без необходимости её перестройки значительно

упрощает процедуру регистрации спектра поглощения и потенциально упрощает экспериментальную установку. Для проверки применимости этой концепции в рамках той же экспериментальной установки было проведено специальное исследование на линии поглощения аммиака ($f_a^{NH3} \approx 572{,}5$ ГГц), при этом линия генерации BSCCO на частоте вблизи f_a^{NH3} была намеренно выбрана достаточно широкой и достаточно мощной за счёт измерения рабочей температуры генератора, которая составила около 20 К. На рисунке 5.4 представлен набор частотных характеристик генератора в выбранной рабочей точке с центральной частотой ~572,5 ГГц, характеризующий генератор как источник широкополосного сигнала ($\delta f \approx 83$ МГц) относительно характерной ширины линии поглощения аммиака при давлении остаточных паров ($\delta f_a^{NH3} \approx 5$ МГц). Так, флуктуация мощности сигнала составила не более 0,1% от среднего значения (рис. 5.4 а). Спектр фазовых флуктуаций достаточно широкий (рис. 5.4 б), то есть фаза претерпевает сильные колебания. Спектр генерации, как уже было продемонстрировано в Главе 4, хорошо аппроксимируется лоренцевой формой (рис. 5.4 в), а ширина линии в данной рабочей точке составила около 83 МГц. Результат регистрации линии поглощения аммиака в зависимости от давления анализатором спектра с использованием одной частоты генерации BSCCO без перестройки представлен на рисунке 5.5 а, а результат вычленения непосредственно мощности поглощения путем «вычитания» опорной кривой (без поглощения) – на рисунке 5.5 б.

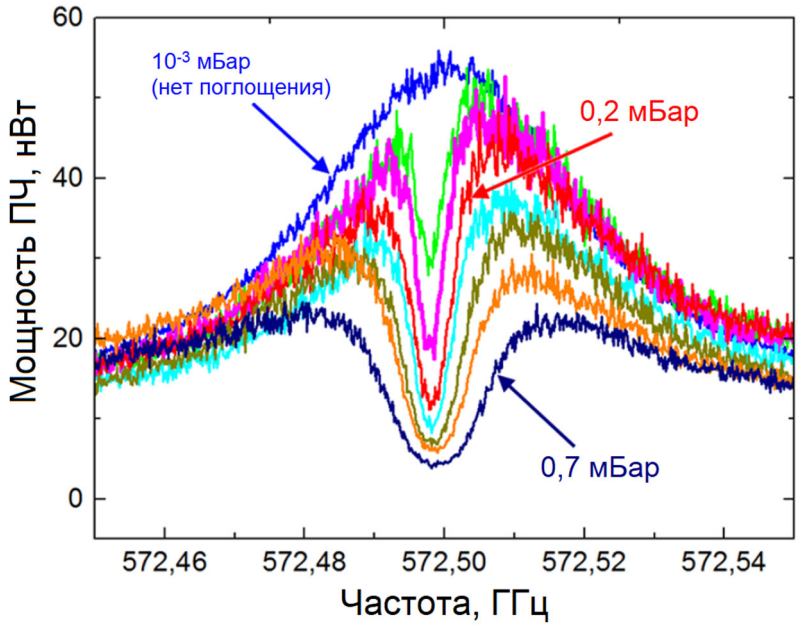


(а) (б)

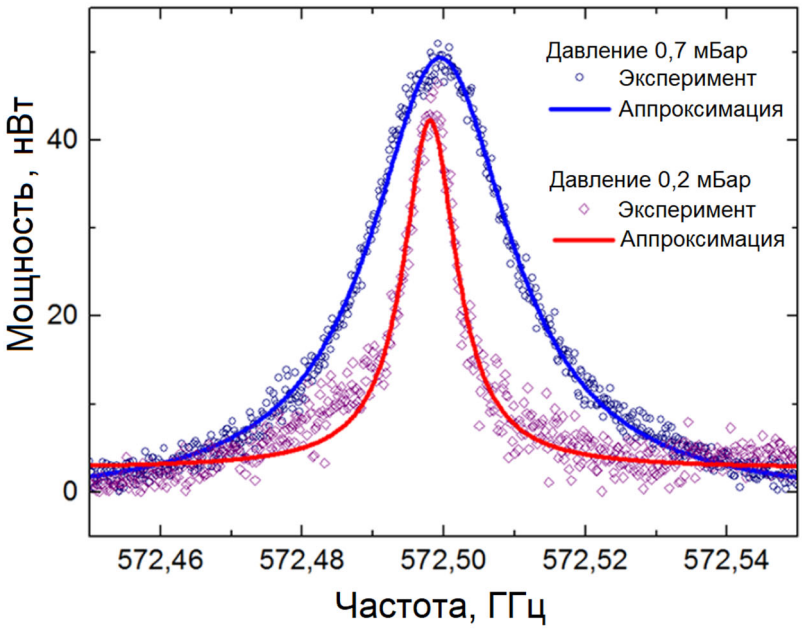


(в)

Рисунок 5.4 – Характеристики выходного сигнала генератора на основе BSCCO на частоте около 572,5 ГГц, измеренные при помощи СИП (схема установки на рис. 2.9 б). Гетеродин приемника установлен на частоту 566 ГГц и стабилизирован по частоте и фазе. (а) Флуктуации мощности выходного сигнала СИП во времени, измеренные при помощи СВЧ измерителя; (б) Фазовый шум сигнала генератора; (в) Автономная линия генерации (синие кружки) и аппроксимация лоренцевой функцией (красная кривая).



(а)



(б)

Рисунок 5.5 – (а) Спектры поглощения аммиака на частоте 572,5 ГГц в диапазоне давлений от 10^{-3} до 0,7 мБар, измеренные с использованием широкополосного сигнала BSCCO без перестройки частоты. (б) Линии поглощения при давлении аммиака 0,2 и 0,7 мБар, полученные в результаты «вычитания» из каждой спектральной кривой «опорной» кривой (без поглощения) – синей кривой на (а).

Как и следовало ожидать, результаты регистрации спектров в диапазоне давлений с использованием широкополосного сигнала излучения BSCCO (рис. 5.5 а) качественно совпадает с результатами, полученными с использованием узкополосного сигнала и плавной перестройки частоты

(рис. 5.3 а), за исключением формы спектра в отдалении от частоты поглощения – в области «крыльев» лоренцевой функции. При этом метод вычленения непосредственной формы спектра поглощения на рис. 5.5 б для данного случая (широкополосный сигнал) считается физически более корректным, чем метод записи наибольшего значения мощности, поскольку функция записи максимального значения мощности в анализаторе спектра хорошо подходит лишь для качественных и демонстрационных измерений и может вносить собственные (дополнительные) искажения.

5.2.3. Анализ применимости источника широкополосного сигнала для терагерцовой спектроскопии

Для анализа применимости источника на основе BSCCO в качестве широкополосного сигнала для спектроскопии газов в ТГц диапазоне коллегами диссертанта из Института физики микроструктур РАН под руководством В.Л. Вакса была построена теоретическая модель, рассматривающая сигнал BSCCO как фазо-диффузионное поле [194] и позволяющая оценить отношение поглощенной мощности к падающей из результатов проведенного эксперимента и сравнить его с теоретическим в рамках предложенной модели [А**20**]. Поскольку непосредственное авторство построенной модели и приведенных численных оценок принадлежит группе коллег из ИФМ РАН, подробное описание теоретической модели из совместной работы [**A20**] не приводится, а сама модель и результаты расчетов приводятся как справочные и не выносятся на защиту в рамках настоящей работы. За детальным описанием теоретической модели следует обращаться непосредственно к статье **[A20]**.

Коэффициент α^{NH3}, характеризующий поглощение в аммиаке, экспериментально определяется как отношение поглощенной мощности ΔP к мощности падающего сигнала P_0

$$\alpha^{\mathrm{NH_3}} = \frac{\Delta P}{P_0}, \tag{5.1}$$

при этом данное соотношение непосредственно связано с коэффициентом поглощения в газе ζ в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$\alpha^{\mathrm{NH_3}} = 1 - \mathrm{e}^{-\zeta l}, \tag{5.2}$$

где l – длина поглощения, фактически равная длине газовой ячейки 50 см. При расчете также следует брать в расчет потери мощности сигнала P_{loss} в квазиоптическом тракте между источником и приемником. Применительно к эксперименту, предложена упрощенная модель вида

$$P_{\mathrm{m}} = xP_0\,\mathrm{e}^{-\zeta l} - P_{\mathrm{loss}}, \tag{5.3}$$

где P_{m} – мощность, дошедшая до приемника в пике поглощения и измеренная в эксперименте, коэффициент x учитывает потери из-за диаграммы направленности источника и отражения от стенок газовой ячейки, а потери P_{loss} в квазиоптическом тракте обусловлены диаграммой направленности приемника. Член P_{loss} может быть исключен посредством измерения мощности P_{vac}, прошедшей через измерительную ячейку при отсутствии в нём газа (т.е. откаченную до высокого вакуума). Тогда экспериментальный коэффициент α^{NH3} может быть получен из следующего соотношения:

$$\alpha^{\mathrm{NH_3}} = \frac{P_{\mathrm{vac}} - P_{\mathrm{m}}}{xP_0}. \tag{5.4}$$

Коэффициент x обычно находится в диапазоне 0,5-1 и может использоваться как неизвестный подгоночный экспериментальный параметр модели при сравнении с теоретически вычисленными значениями. Результат расчета экспериментального α^{NH3} при $x = 0{,}65$, $P_0 = 165$ нВт (мощность сигнала BSCCO в пике из рис.5.4 в), $P_{\mathrm{vac}} = 55$ нВт (синяя кривая из рис.5.5 а) и вычисленном наборе P_{m} при различном давлении из рис.5.5 в пике поглощения представлен на рисунке 5.6 синими ромбами.

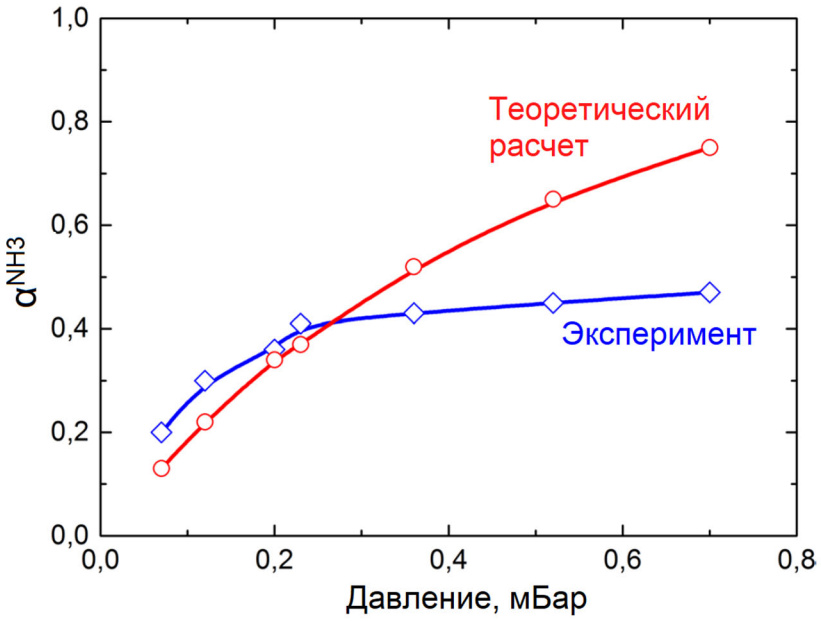


Рисунок 5.6 – Зависимость коэффициента α^{NH3} от давления: экспериментальная оценка (синие ромбы) и теоретический расчет (красные кружки) [**A20**]. Сплошные кривые соответствующего цвета приведены для наглядности.

В теоретическом расчете α^{NH3} в работе [**A20**] сигнал BSCCO был рассмотрен в модели фазо-диффузионного поля в виде когерентного импульсного сигнала со случайной фазой, описываемой дельта-коррелированным гауссовским шумом [195]. Такой сигнал за короткое время $t << t_c$ (t_c – время корреляции фазо-диффузионного поля) взаимодействует с квантовой системой молекулярного газа как когерентный сигнал и наводит в ней макроскопичесую поляризацию. Поле (сигнал генератора) рассматривается как короткий импульс длительностью t_c, малой по сравнению с характерным временем релаксационных процессов в молекулярном газе, что приводит к переходному эффекту поглощения. При времени $t > t_c$ поле перестаёт быть когерентным, в результате чего молекулы начинают испускают излучение. При этом из-за малого времени релаксации молекул, которое определяется давлением газа, переизлучение быстро затухает за счет столкновения молекул и не покидает ячейку. Теоретическая зависимость коэффициента поглощения от давления в предложенной модели, когда поглощение газа вызвано наведением макроскопической поляризацией

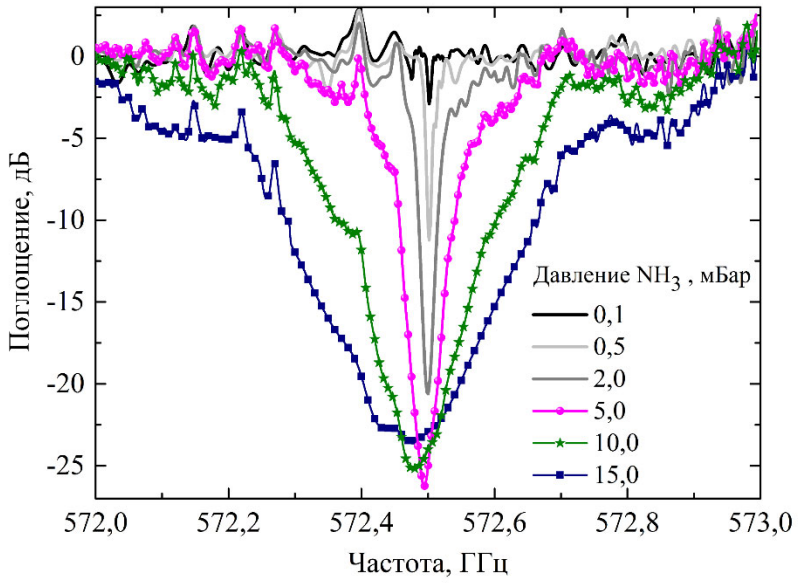
молекул короткими импульсами (фазо-диффузионным полем), представлена на рисунке 5.6 красными кружками.

Расхождение экспериментальной оценки и теоретического расчёта в простой модели фазо-диффузионного поля на рис. 5.6 может быть объяснено несколькими причинами. Так, например, было отмечено, что экспериментально измеряемое давление газа является общим давлением газовой смеси паров аммиака и воды, при этом парциальное давление аммиака точно не известно. Считается, что из-за высокой летучести и величины давления насыщенных паров аммиака много больше, чем у паров воды, аммиак испаряется из жидкого раствора «в первую очередь» в процессе напуска-откачки смеси в ячейку. Также теоретические расчеты проведены при ряде допущений, в том числе о времени корреляции фазы в сигнале t_c много меньше характерного времени релаксации молекул газа. Тем не менее, проведенный анализ показывает, что широкополосный сигнал источника на основе BSCCO может быть применен для спектроскопии в качестве шумового сигнала со случайной фазой.

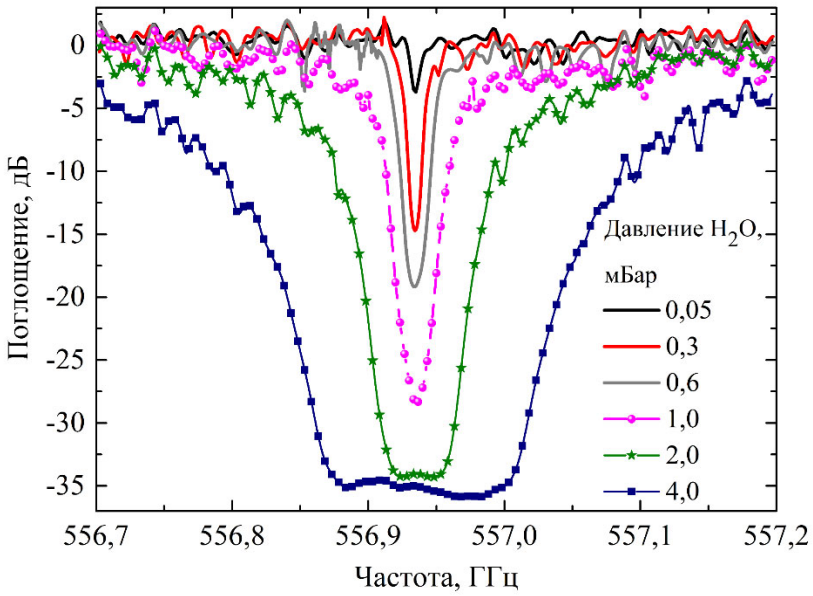
5.3. Исследование поглощения аммиака и воды с использованием активного источника на основе РДП

Автономная ширина линии излучения РДП от долей МГц до ~20 МГц соизмерима с шириной линии поглощения исследуемых газов, поэтому при использовании РДП как активного источника можно использовать метод перестройки частоты в области частоты поглощения газа, как описано в разделе 5.1. Результаты исследования, практически повторяющие результаты для узкополосного сигнала BSCCO (см. рис. 5.3), при этом представленные в более широкой частотной полосе и при более высоких давлениях, приведены на рисунке 5.7. Длительность одного измерения, равное времени «прохода» частоты вверх и обратно вниз, составляла около 2 минут для каждого значения давления. Характерная ширина линии сигнала РДП в эксперименте с

аммиаком (т.е. на частоте в области $f_a^{NH3} \approx 572{,}5$ ГГц) составляла около 15 МГц (спектр линии показан на рис. 5.2), и около 12 МГц в эксперименте с водой (на частоте в области $f_a^{H2O} \approx 556{,}9$ ГГц). При этом частотная и фазовая стабилизация РДП на основе системы ФАПЧ и гармонического смесителя предусмотрена установкой (см. левую часть схемы на рис. 5.1 а), но не используется в данной методике «сканирования» по частоте.



(а)



(б)

Рисунок 5.7 – Спектры поглощения газов при различных давлениях, измеренные при помощи активного источника на основе РДП и спектрометра высокого разрешения на основе СИП: (а) аммиака в составе 10% водного раствора, (б) водяного пара.

Дальнейшее обсуждение результатов относится к системам регистрации на основе обоих источников ТГц сигнала – BSCCO (раздел 5.2) и РДП (текущий раздел). Полученные в данном эксперименте характеристики поглощения паров аммиака и воды – частота, мощность, ширина спектральных линий – хорошо соответствуют справочной литературе и табличным значениям. Предложенная система регистрации газов и проведенный эксперимент демонстрируют спектральное разрешение и чувствительность, близкие к характеристикам других систем либо превосходящие их – например, на основе квантово-каскадных лазеров из работы [196], Фурье-спектрометра на чирпированных импульсах [197]. При этом, как было отмечено ранее, общие характеристики газового анализа в описанном методе определяются преимущественно приемной системой, но не системой источника.

Наконец, стоит отметить, что чувствительность по давлению газов, продемонстрированная в данной работе, в случае использования узкополосного источника (т.е. не в случае шумовой спектроскопии) может быть улучшена на один-два порядка при использовании другой системы считывания и/или при дополнительной частотной либо фазовой модуляции активного источника, как предложено, например в патенте на изобретение **[A49]** и реализовано на примере использования в качестве активного источника лампы обратной волны в работах [**A21,A45**]. Так, в настоящем методе используется анализатор спектра в качестве оконечного устройства для регистрации спектров поглощения, при этом наличие либо отсутствие газа оценивается, в первую очередь, визуально по экрану анализатора оператором установки, после чего проводятся арифметические операции с кривыми, зарегистрированными анализатором спектра (при наличии, в частности, шумов и ошибок при записи кривых). Данный метод далек от оптимального с точки зрения предельно достижимой чувствительности по концентрации (давлению) газовой компоненты. Для повышения чувствительности приёмной системы можно, например, использовать выходной измеритель мощности ПЧ вместо анализатора спектра либо спектрометр на основе быстрого

преобразования Фурье, а также накапливать сигнал долгое время и/или увеличивать число «проходов» линии поглощения при «сканировании» частоты источника в окрестности частоты поглощения, либо использовать частотную/фазовую модуляцию подобно реализованной для источника на основе ЛОВ в работе [**A21**]. Тем не менее, проведенный эксперимент наглядно демонстрирует потенциальную применимость джозефсоновских источников с излучением сигнала в открытое пространство, исследованных в настоящей диссертационной работе, в системах ТГц спектроскопии газов для целого ряда практических задач, таких как медицинская диагностика на основе регистрации веществ-маркеров в выдыхаемом воздухе, контроль технологических процессов и утечек газов, экологической мониторинг и других.

5.4. Выводы главы

В данной главе проведена демонстрация возможностей применения генераторов с излучением сигнала в открытое пространство на основе РДП и на основе BSCCO в спектроскопии терагерцового диапазона на примере лабораторной установки по регистрации линии поглощения газов. Генератор выступал в роли активного источника, а в качестве приемной системы поглощенного сигнала использовался гетеродинный интегральный приемник с высокой чувствительностью. Продемонстрированы два метода записи спектра поглощения газов в зависимости от характерной ширины спектра активного источника δf по отношению к ширине спектра поглощения δf_a: $\delta f < \delta f_a$ либо $\delta f \sim \delta f_a$ (узкополосный сигнал), и $\delta f >> \delta f_a$ (широкополосный сигнал). В случае узкополосного сигнала производилась плавная перестройка частоты источника в окрестности частоты поглощения f_a с непрерывной записью максимального значения мощности прошедшего сигнала, в случае широкополосного сигнала центральная частота источника устанавливалась

равной значению f_a и регистрировался прошедший сигнал. Основные полученные результаты главы:

1. Разработана система детектирования газов на основе спектроскопии поглощения в ТГц диапазоне частот с использованием активного источника. В качестве источника использован перестраиваемый по частоте генератор на основе РДП с шириной спектральной линии от единиц до ~15 МГц либо на основе BSCCO с шириной спектральной линии ~50 МГц; в обоих случаях ширина линии соизмерима с шириной регистрируемого спектра поглощения. В качестве спектрометра использован интегральный СИС приемник диапазона 500-700 ГГц с шумовой температурой порядка 200 К на частотах линий поглощения исследуемых газов, полосой спектрального анализа 4-8 ГГц и гетеродином на основе РДП, стабилизованным по фазе к внешнему опорному сигналу. Продемонстрирована возможность регистрации линии поглощения аммиака на частоте 572,5 ГГц с предельно регистрируемым давлением около 0,05 мБар, и воды на частоте 556,9 ГГц с предельно регистрируемым давлением около 0,005 мБар. В эксперименте продемонстрирована зависимость ширины линии поглощения газа от его давления (концентрации), которая соответствует табличным сведениям и теоретическим ожиданиям (столкновительному уширению линии).

2. Проведена регистрация линий поглощения газов при помощи той же системы с источником на основе BSCCO и спектрометром на основе СИС приемника, но с шириной спектральной линии излучения BSCCO около 83 МГц, заведомой большей, чем ширина линии поглощения аммиака при давлении порядка и менее 1 мБар. В процессе регистрации источник не требовал перестройки по частоте, полностью охватывая полосой спектра излучения регистрируемый спектр поглощения при рабочем давлении 0,1-1 мБар. Экспериментальный результат в диапазоне давлений до ~0,5 мБар оказался близок к теоретическому расчету по величине отношения поглощенной мощности к падающей в модели взаимодействия молекул газа с фазо-диффузионным полем, что демонстрирует применимость

использованного широкополосного генератора для шумовой спектроскопии высокого разрешения.

Все полученные результаты опубликованы в работах: [**A8, A18, A20, A21, A40**]. Приведенные в данной главе экспериментальные результаты получены автором лично либо с определяющим вкладом автора. При исследовании использованы образцы РДП, вклад в разработку которых подробно описан в выводах Главы 3, и образцы BSCCO, вклад в разработку которых подробно описан в выводах Главы 4. Эксперимент по регистрации линий поглощения аммиака с использованием широкополосного сигнала BSCCO (раздел 5.2.2) проведен совместно с Е.А. Собакинской, а теоретическая модель поглощения при взаимодействии с шумовым сигналом (раздел 5.3.3) построена В.Л. Ваксом и Е.А. Собакинской.

Заключение

В настоящей диссертационной работе проведено комплексное исследование источников субтерагерцового диапазона с сигналом излучения в открытое пространство, основанных на нестационарном эффекте Джозефсона. Исследованы три наиболее развитые в настоящее время практические реализации джозефсоновских источников: на основе распределенного джозефсоновского перехода (туннельная СИС структура $Nb/AlO_x/Nb$ либо Nb/AlN/NbN), на основе высокотемпературного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ в форме мезы, и на основе цепочки джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb; при этом источник на основе РДП с системой излучения в открытое пространство был разработан непосредственно в рамках диссертации. Показана возможность практического применения таких источников на примере лабораторной спектроскопии газов.

Основные результаты диссертационного исследования:

1. Предложена и практически реализована концепция сверхпроводникового источника субТГц диапазона, работающего при температуре 4,2 К и излучающего сигнал в открытое пространство, на основе нестационарного эффекта Джозефсона в распределённом джозефсоновском СИС переходе $Nb/AlO_x/Nb$ или Nb/AlN/NbN. Вывод излучения в открытое пространство реализован при помощи передающей щелевой антенны, согласованной с генератором посредством микрополосковой линии передачи. В данной конструкции реализована частотная стабилизация и фазовая стабилизация генератора к внешнему опорному сигналу при помощи гармонического СИС смесителя, расположенного на одной микросхеме с генератором и антенной.

2. Разработан, изготовлен и исследован источник с излучением сигнала в открытое пространство на основе РДП в различных конструкциях, рассчитанных на различные частотные диапазоны – 250 – 410 ГГц, 330 – 570 ГГц и 390 – 700 ГГц (центральная частота около 300 ГГц, 450 ГГц и

550 ГГц, соответственно). Разработаны и апробированы два различных способа возбуждения щелевой антенны с использованием одного и двух отрезков микрополосковой линии; в общей сложности исследовано 10 различных интегральных конструкций, рассчитанных на разные целевые диапазоны частот, как без гармонического смесителя, так и с гармоническим смесителем для частотной и фазовой стабилизации излучения. Разработанные конструкции интегрально покрывают общий частотный диапазон от 250 до 750 ГГц с возможностью частотной и фазовой стабилизации сигнала. Реализована непрерывная перестройка частоты генератора в рабочем диапазоне.

3. Спектральные линии излучения генератора исследованы двумя независимыми способами – как через цепь обратной связи с использованием гармонического смесителя, частотного детектора и системы ФАПЧ без вывода излучения в открытое пространство, так и непосредственным измерением сигнала на субТГц частоте при помощи СИС приемника высокого разрешения. Результаты измерений спектра излучения двумя способами совпадают с точностью до искажений, вносимых спектром гетеродина приемной системы, отличным от δ-функции, а также спектром *n*-й гармоники опорного СВЧ генератора. Показано, что квазиоптический тракт излучения в открытое пространство не вносит искажений в форму спектральной линии. Спектральная линия излучения в открытое пространство имеет лоренцеву форму с шириной от долей до десятков МГц, при этом наименьшая ширина реализуется в резонансной области ВАХ с низкими потерями в электродах, а наибольшая (порядка и более 10 МГц) – в области ВАХ с высокими потерями, где реализуется режим вязкого течения вихрей.

4. Мощность излучения в открытое пространство разработанного генератора на основе РДП оценена при помощи высокочувствительного охлаждаемого полупроводникового болометра на основе кремния и составляет от сотен нВт до единиц мкВт в диапазоне от 250 до 750 ГГц в зависимости от конструкции генератора, рабочей частоты и рабочей точки на

ВАХ. Максимальное значение получено на частоте 340 ГГц и составило около 3,3 мкВт.

5. Проведено прямое экспериментальное наблюдение гармоник джозефсоновской генерации источника на основе РДП при помощи двух различных методик – широкополосного Фурье-спектрометра на основе оптического интерферометра Майкельсона и спектрометра высокого разрешения на основе СИС приемника. При помощи Фурье-спектрометра проведено наблюдение второй и третьей гармоник, доказана истинность наблюдаемой генерации гармоник серией специальных экспериментов. При помощи СИС приемника исследованы спектральные характеристики второй гармоники с разрешением лучше 0,1 МГц. Получено соотношение между шириной спектральной линии второй и первой гармоник около 4, что соответствует теоретическому значению.

6. Проведено исследование эффективности работы линий передачи на основе NbTiN/SiO_2/Al на частотах порядка и выше 1 ТГц в составе приемной интегральной структуры на основе СИС детектора и щелевой антенны. Показано, что линии передачи NbTiN/SiO_2/Al способны эффективно передавать сигнал на частоте, по меньшей мере, до ~1,1 ТГц, однако в структурах с такими линиями передачи и встроенными СИС переходами, имеющими электрод из чистого ниобия, значительно возрастает роль тепловых механизмов на частотах выше щелевой частоты ниобия (~700 ГГц).

7. Проведено исследование мощности сигнала в открытое пространство генератора на основе BSCCO в некалиброванном режиме при помощи широкополосного болометра и исследование частоты генерации при помощи широкополосного Фурье-спектрометра в широком диапазоне температур от 4,2 до 50 К. Экспериментально показано, что частота генерации не определяется измеряемым напряжением образца BSCCO по причине возникновения в системе дополнительного сопротивления вследствие образования «горячего пятна». Предложен метод оценки частоты генерации в рабочей точке на серии ВАХ при различных температурах путем построения

«кривых постоянной частоты» на основе набора калибровочных измерений частоты в некоторых рабочих точках.

8. Проведено исследование спектральных характеристик джозефсоновского генератора на основе монокристалла высокотемпературного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ в зависимости от режима работы (области рабочих точек ВАХ) и температуры образца; ширина линии генерации менялась в широком диапазоне и составила от нескольких МГц в режиме больших токов до ~0,5-1 ГГц в режиме малых токов. Обнаружена нетривиальная зависимость ширины спектральной линии генерации в зависимости от температуры образца, при которой наименьшее значение δf достигается в области значений температуры ~25-40 К (для разных экспериментальных образцов и конструкций теплоотвода в криогенном модуле), далёкой как от нуля, так и критической температуры T_c. Экспериментально полученная нетривиальная зависимость $\delta f(T)$ с оптимумом при некотором значении температуры (далеком от нуля и T_c) позволила построить численную «секционную» модель генератора, в котором система представлена двумя секции переходов с различной температурой (T_1 и T_2), термически связанными с подложкой при температуре T_b, а также шунтирующим сопротивлением при температуре T_2, модельно имитирующим «горячее пятно». Показано, что при наличии градиента двух параметров – критического тока и сопротивления переходов – экспериментально полученная нетривиальная зависимость может быть $\delta f(T)$ объяснена при помощи численной модели. Такой градиент может быть физически объяснен невертикальными («скошенными») краями мезы вследствие травления при изготовлении.

9. Продемонстрирована возможность фазовой стабилизации излучения генератора к внешнему опорному сигналу при помощи полупроводниковой системы ФАПЧ. Ширина спектральной линии в фазо-стабилизированном режиме без учета фазовых шумов опорного синтезатора определялась

спектральным разрешением используемого анализатора спектра и составляла не более 1 Гц.

10. Получена взаимная синхронизация двух генераторов на основе высокотемпературного сверхпроводника BSCCO, расположенных на одной микросхеме на расстоянии 200 мкм друг от друга и имеющих общий электрод из золота. На частоте около 650 ГГц ширина спектральной линии генерации каждого отдельного генератора составляла около 35-40 МГц, в то время как ширина линии сигнала в результате синхронизации составила около 24 МГц, при этом мощность синхронизированного сигнала в центральном пике составила величину на 15-20% выше, чем сумма отдельно взятых мощностей генераторов в пике. Подтверждена принципиальная возможность синхронизации нескольких генераторов данного типа за счет их геометрической близости – расположения на расстоянии, меньшем длины волны излучаемого сигнала.

11. Измерены спектральные характеристики генератора на основе цепочки последовательно соединенных джозефсоновских переходов Nb/NbSi/Nb, излучающего сигнал в открытое пространство через волноводную линию передачи, в диапазоне 180-310 ГГц при помощи гетеродинного СИС приемника на основе Nb/AlO_x/Nb со спектральным разрешением лучше 0,1 МГц. Форма спектральной линии генератора была значительно искажена шумами и внешними электромагнитными помехами, которые могут быть минимизированы с целью уменьшения ширины линии. Измерены спектральные характеристики генератора на второй гармонике при основной частоте генерации около 139 ГГц.

12. Разработана система детектирования газов на основе спектроскопии поглощения в ТГц диапазоне частот с использованием активного источника. В качестве источника использован перестраиваемый по частоте генератор на основе РДП с шириной спектральной линии от единиц до ~15 МГц либо на основе BSCCO с шириной спектральной линии ~50 МГц; в обоих случаях ширина линии соизмерима с шириной регистрируемого спектра поглощения.

В качестве спектрометра использован интегральный СИС приемник диапазона 500-700 ГГц с шумовой температурой порядка 200 К на частотах линий поглощения исследуемых газов, полосой спектрального анализа 4-8 ГГц и гетеродином на основе РДП, стабилизованным по фазе к внешнему опорному сигналу. Продемонстрирована возможность регистрации линии поглощения аммиака на частоте 572,5 ГГц с предельно регистрируемым давлением около 0,05 мБар, и воды на частоте 556,9 ГГц с предельно регистрируемым давлением около 0,005 мБар. В эксперименте продемонстрирована зависимость ширины линии поглощения газа от его давления (концентрации), которая соответствует табличным сведениям и теоретическим ожиданиям (столкновительному уширению линии).

13. Проведена регистрация линий поглощения газов при помощи той же системы с источником на основе BSCCO и спектрометром на основе СИС приемника, но с шириной спектральной линии излучения BSCCO около 83 МГц, заведомой большей, чем ширина линии поглощения аммиака при давлении порядка и менее 1 мБар. В процессе регистрации источник не требовал перестройки по частоте, полностью охватывая полосой спектра излучения регистрируемый спектр поглощения при рабочем давлении 0,1-1 мБар. Экспериментальный результат в диапазоне давлений до ~0,5 мБар оказался близок к теоретическому расчету по величине отношения поглощенной мощности к падающей в модели взаимодействия молекул газа с фазо-диффузионным полем, что демонстрирует применимость использованного широкополосного генератора для шумовой спектроскопии высокого разрешения.

Вопросы авторства, благодарности

Вопросы авторства некоторых результатов, образцов, методов приведены во вступительной части и выводах соответствующих Глав, а также непосредственно в тех разделах, где эти результаты (образцы, методы) представлены либо используются в рамках диссертационного исследования.

Все **экспериментальные** результаты, представленные в диссертационной работе (Главы 3,4,5), получены автором лично либо при его определяющем участии. Использованные экспериментальные установки (Глава 2), за исключением блоков измерения вольтамперных характеристик и отдельных коммерческих приборов, были собраны автором либо при непосредственном участии автора.

Непосредственное численное моделирование интегральных схем (топологий) РДП с передающей антенной и гармоническим смесителем, а также схем с приемным СИС детектором и антенной (часть разделов 3.2, 3.9) проведено Рудаковым Кириллом Игоревичем под руководством диссертанта. Непосредственное построение и решение численно-аналитической модели выделения и распределения тепла в приемной интегральной схеме (часть раздела 3.9) проведено Ханом Федором Владимировичем. Автор благодарит своих коллег – группу технологов Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Филиппенко Людмилу Викторовну, Чекушкина Артема Михайловича, Фоминского Михаила Юрьевича – за изготовление экспериментальных образцов генератора на основе РДП и приемных схем на основе СИС смесителей, без которых диссертационное исследование оказалось бы невозможным.

Образцы генераторов на основе высокотемпературного сверхпроводника BSCCO, использованные в работе, были разработаны и изготовлены иностранными коллегами из объединенной группы Нанкинского университета (г. Нанкин, Китай), Национального института материаловедения (г. Цукуба, Япония) под руководством профессора Хуабинг Ванга, и

Тюбингенского университета (г. Тюбинген, Германия) под руководством проф. Рейнолда Кляйнера, и любезно предоставлены для совместных исследований. Спектральные исследования генераторов при помощи СИП (разделы 4.1.3, 4.1.5, 4.2) проведены автором совместно с иностранными коллегами, а исследование мощности и частоты при помощи болометра и Фурье-спектрометра (раздел 4.1.2) проведены автором лично. Непосредственное построение и решение секционной численной модели BSCCO (раздел 4.1.4) проведено Борисом Гроссом из группы Тюбингенского университета.

Разработка и изготовление экспериментальных образцов цепочек переходов Nb/NbSi/Nb, а также их характеризация (раздел 4.3.1), за исключением спектральных исследований с высоким разрешением, были проведены группой ученых из Института физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород) с участием иностранных коллег. Спектральные исследования цепочек проведены диссертантом совместно с Галиным Михаилом Александровичем, а численный анализ экспериментальных результатов (часть разделов 4.3.2, 4.3.3) – непосредственно Галиным М.А. Гетеродинный СИС приемник диапазона 211-275 ГГц, использованный при исследовании цепочек переходов Nb/NbSi/Nb, был разработан группой ученых из Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва) под руководством Худченко Андрея Вячеславовича и собран на базе экспериментального оборудования Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН с непосредственным участием диссертанта.

Эксперимент по регистрации линий поглощения аммиака с использованием широкополосного сигнала BSCCO (раздел 5.2.2) проведен совместно с Собакинской Екатериной Александровной, а теоретическая модель поглощения в газе при взаимодействии с шумовым сигналом (часть раздела 5.2.3) построена коллегами из ИФМ РАН – Ваксом Владимиром Лейбовичем и Собакинской Е.А.

Автор работы выражает огромную благодарность своему научному консультанту Кошельцу Валерию Павловичу за предоставленную возможность заниматься актуальной и интересной научной работой, а также за неоценимую помощь в проведении исследований и написании данной работы. Автор благодарит большую группу иностранных коллег из Нанкинского университета и Тюбингенского университета, в частности – Хуабинг Ванга, Бориса Гросса, Фабиана Рудау – за предоставление экспериментальных образцов генераторов и возможность провести поистине уникальные исследования, а также за плодотворную широчайшую совместную публикационную деятельность.

Автор безмерно благодарит свою супругу Марину за глубокую моральную поддержку как при следовании научной стезе в целом, так и при написании диссертационной работы. Диссертант также выражает благодарность двоюродному брату Максиму за помощь в оформлении диссертации.

Список сокращений и условных обозначений

АЦП – аналогово-цифровое преобразование

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

БТ – режим «больших токов» генератора BSCCO

ВАХ – вольтамперная характеристика

ВТСП – высокотемпературный(-ая) сверхпроводник(-имость)

ГС – гармонический смеситель

ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота

ИК – инфракрасный

ККЛ – квантово-касакадный лазер

КПД – коэффициент полезного действия

ЛОВ – лампа обратной волны

МДПВ – **м**ассив **д**жозефсоновских **п**ереходов на основе **в**ысокотемпературного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$.

меза – (применительно только к BSCCO) структура в форме стопки, горки с плоской вершиной

МТ – режим «малых токов» генератора BSCCO

МЭШ – мощность, эквивалентная шуму

НТСП – низкотемпературный(-ая) сверхпроводник(-имость)

ПК – персональный компьютер

ПЧ – промежуточная частота

РДП – распределённый джозефсоновский переход

РНФ – Российский научный фонд

РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований

СВЧ – сверхвысокие частоты, сверхвысокочастотный

СИН – сверхпроводник-изолятор-нормальный металл

СИНИС – сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник

СИП – сверхпроводниковый интегральный приемник

СИС – сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник

СКВИД – сверхпроводящий квантовый интерферометр (от англ. ***S**uperconducting **Qu**antum **I**nterference **D**evice*, или *SQUID*)

СНС – сверхпроводник-нормальный металл-сверхпроводник

СР – сверхрешетка

субТГц – субтерагерцовый (до 1 ТГц)

ТГц – терагерц (10^{12} Гц), терагерцовый

ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты

ЦАП – цифро-аналоговое преобразование

ЦДП – цепочка джозефсоновских переходов

ЧД – частотный детектор

BSCCO – $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$

FFO – flux-flow oscillator

HEMT – транзистор на основе электронов с высокой подвижностью (от англ. *High electron mobility transistor*)

LJJ – long Josephson junction

on-chip – (пер. с англ. «*на чипе*») термин предполагает расположение элемента(-ов) планарной структуры на интегральной микросхеме

SR – процент спектральной мощности, сосредоточенной в центральном пике (от англ. *Spectral ratio*)

TELIS – Terahertz Limb Sounder

А-300, **ДА-450, АГС-550, ДАГС-450** и т.п. (*буквенное обозначение* + *число*) – – обозначение интегральных конструкций (дизайнов) генератора с **а**нтенной (**А-…, ДА-…**) либо **а**нтенной и **г**армоническим **с**месителем (**АГС-…**, **ДАГС-…**), где числом обозначена центральная рабочая частота АЧХ

a_{max} – (*только в разделе 4.1.4*) параметр относительного изменения площади образца вдоль выделенного направления

C – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение электрической ёмкости

c – скорость света в вакууме

c_{sw} – скорость Свайхарта

$\hat{C}_1$, $\hat{C}_2$ – (*только в разделе 4.1.4*) теплоёмкость частей массива джозефсоновских переходов

d – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение толщины

e – заряд электрона

f – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение частоты

H – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение величины магнитного поля

h, $\hbar$ – постоянная Планка (классическая и нормированная на 2π, соответственно)

$I_{\boldsymbol{A}}$, $I_{\boldsymbol{B}}$ – (*индекс полужирным шрифтом с курсивом, только в разделе 4.2*) ток через образец ***A*** и образец ***B***

I_{B} – (*индекс прямым шрифтом*) ток смещения (от англ. *bias*)

I_{c} – критический ток джозефсоновского контакта

I_{CL} – ток линии управления магнитным полем (от англ. *control line*)

I_{g} – «щелевой» скачок тока СИС перехода (от англ. *gap*)

I_{p} – ток накачки (от англ. *pumping*)

I_{s} – сверхпроводящий ток через джозефсоновский контакт

$i = I/I_{\mathrm{c}}$ – ток, нормированный на критический ток

j_{c} , j_{g} – плотность критического тока и плотность туннельного тока

K – эмпирический параметр для учета вклада R_d^{CL} в ширину линии генерации

K_1, K_2 – (*только в разделе 4.1.4*) теплопроводность между частями массива джозефсоновских переходов

k_{B} – постоянная Больцмана

L – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение длины либо индуктивности (*пояснения даются непосредственно в тексте*)

L_{step} – шаг подвижного зеркала в установке Фурье-спектрометра

M – (*только в разделе 4.1.4*) количество секций в массиве джозефсоновских переходов в численной модели

N – номер гармоники либо количество джозефсоновских переходов в массиве (*пояснения даются непосредственно в тексте*)

n – номер ступени на ВАХ, номер моды, порядковый номер некоторого эффекта, функции (*пояснения даются непосредственно в тексте*)

P – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение мощности

P_{air} – мощность, излучаемая в открытое пространство

R – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение сопротивления

R_d – дифференциальное сопротивление по току смещения

R_d^{CL} – дифференциальное сопротивление по току линии управления магнитным полем

R_{n} – нормальное сопротивление; сопротивление резистивной ветви

S – площадь джозефсоновского контакта

$S_i(0)$ – спектральная плотность низкочастотных токовых флуктуаций

T – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение температуры

T_{b} – температура массивного теплового резервуара (подложки, холодной ступени криостата и т.д.) (от англ. *bath*)

T_{c} – критическая температура сверхпроводника

t – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение времени

U_{m} – (*только в разделе 4.1.4*) напряжение в секции с номером m массива джозефсоновских контактов в рамках численной модели

u_ω^2 – (*только в разделе 4.1.4*) нормированная мощность высокочастотного излучения массива джозефсоновских контактов

V – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение напряжения

$V_{\mathrm{c}} = I_{\mathrm{c}} \cdot R_{\mathrm{n}}$ – характеристическое напряжение джозефсоновского контакта

V_{g} – щелевое напряжение СИС перехода (от англ. *gap*)

W – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение ширины

Z – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение импеданса

α – безразмерный параметр накачки СИС перехода

α^{damp} – параметр затухания электромагнитной волны в РДП

γ – (*только в разделе 4.1.4*) джозефсоновская фаза единичного контакта внутри массива джозефсоновских контактов

Δ – энергетическая щель сверхпроводника

δf – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение ширины спектральной линии, за исключением отдельно указанных случаев

δf_{FTS} – спектральное разрешение Фурье-спектрометра

$\delta f_{Low\text{-}freq}$ – уширение спектральной линии, вызванное низкочастотными флуктуациями тока

δf_{SA} – спектральное разрешение анализатора спектра

ε – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение диэлектрической проницаемости

λ – (*с индексом или без*) обобщенное обозначение длины волны, за исключением отдельно указанных случаев

λ_{J} , λ_{L} – джозефсоновская глубина проникновения магнитного поля в переход и лондоновская глубина проникновения в сверхпроводник

$v = V/V_{\mathrm{c}}$ – напряжение, нормированное на характеристическое напряжение

$\Phi_0 = \pi\hbar \mathrm{c}/e$ – квант магнитного потока

$\varphi = \theta_1 - \theta_2$ – джозефсоновская фаза, равная разности фаз между электродами джозефсоновского контакта (в разделе 4.1.4 использовано альтернативное обозначение γ)

ω_p – плазменная частота джозефсоновского перехода

Список литературы

1. Космическая обсерватория Apex: сайт. – URL: http://www.apex-telescope.org/.
2. Космическая обсерватория Hershel: сайт. – URL: https://www.herschel.caltech.edu/.
3. Космическая обсерватория ”Миллиметрон“: сайт. – URL: https://millimetron.ru/.
4. Development and characterization of the superconducting integrated receiver channel of the TELIS atmospheric sounder / G. de Lange, M. Birk, D. Boersma, J. Dercksen, P. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, H. Golstein, R.W.M. Hoogeveen, L. de Jong, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, B. van Kuik, A. de Lange, J. van Rantwijk, A. M. Selig, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, Ed de Vries, G. Wagner, P.A. Yagoubov, V.P. Koshelets. – DOI: 10.1088/0953-2048/23/4/045016 // Supercond. Sci. Tech. – 2010. – V. 23, No. 4. – Art.no. 045016.
5. Davies, A.G. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs / A.G. Davies, A.D. Burnett, W. Fan, E.H. Linfield, J.E. Cunningham. // Mater. Today. – 2008. – V. 11, No. 3. – P. 18-26.
6. Dexheimer, S.L. Terahertz spectroscopy: principles and applications / S.L. Dexheimer // New York : CRC Press, 2008. – 360 p.
7. Ferguson, B. Materials for terahertz science and technology / B. Ferguson, X.-C. Zhang. – DOI: 10.1038/nmat708 // Nat. Mater. – 2002. – V. 1, No. 1. – P. 26-33.
8. Applications of terahertz spectroscopy in biosystems / D.F. Plusquellic, K. Siegrist, E.J. Heilweil, O. Esenturk. – DOI: 10.1002/cphc.200700332 // ChemPhysChem. – 2007. – V. 8, No. 17. – P. 2412-2431.
9. Tonouchi, M. Cutting-edge terahertz technology / M. Tonouchi. – DOI: 10.1038/nphoton.2007.3 // Nat. Photon. – 2007. – V. 1, No. 97. – 105 p.
10. Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator / A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, K. Kawase. – DOI: 10.1109/TTHZ.2012.2210282 // Appl. Opt. – 2004. – V. 43, No. 30. – P. 5637-5646.
11. Terahertz-wave imaging system based on backward wave oscillator / G. Chen, J. Pei, F. Yang, X. Y. Zhou, Z. L. Sun, T. J. Cui. – DOI: 10.1109/TTHZ.2012.2210282 // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2012. – V. 2, No. 5. – P. 504-512.

12. Tunable, continuous-wave tterahertz photomixer sources and applications / S. Preu, G. H. Döhler, S. Malzer, L. J. Wang, A. C. Gossard // J. Appl. Phys. – 2011. – V. 109, No. 6. – Art.no. 061301.
13. Optimization of photomixers and antennas for continuous-wave terahertz emission / I.S. Gregory, C. Baker, W.R. Tribe, I.V. Bradley, M.J. Evans, E.H. Linfield. – DOI: 10.1109/JQE.2005.844471 // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2005. – V. 41, No. 5. – P. 717-728.
14. Sushil, K. Recent progress in terahertz quantum cascade lasers / K. Sushil // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2010. – V. 17, No. 1. – P. 38-47.
15. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K / L. Bosco, M. Franckié, G. Scalari, M. Beck, A. Wacker, J. Faist // Applied Physics Letters. – 2019. – V. 115, No. 1. – Art.no. 010601.
16. THz Diode Technology: Status, Prospects, and Applications / I. Mehdi, Jose V. Siles, C. Lee, E. Schlecht. – DOI: 10.1109/JPROC.2017.2650235 // Proceedings of the IEEE. – 2017. – V. 105, No. 6. – P. 990-1007.
17. A review of terahertz sources based on planar Schottky diodes / W. Kou, S. Liang, H. Zhou, Y. Dong, S. Gong, Z. Yang, H. Zeng // Chinese Journal of Electronics. – 2022. – V. 31, No. 3. – P. 467-487.
18. Josephson, B. D. Possible new effects in superconductive tunnelling / B. D. Josephson // Phys. Lett. – 1962. – V. 1, No. 7. – P. 251-253.
19. Бароне, А. Эффект Джозефсона: физика и применения / А. Бароне, Дж. Патерно // Москва: Мир. – 1984. – 640 с.
20. Darula, M. Millimetre and sub-mm wavelength radiation sources based on discrete Josephson junction arrays / M. Darula, T. Doderer, S. Beuven // Supercond. Sci. Technol. – 1999. – V. 12, No. 1. – P. R1-R25.
21. Koshelets, V.P. Integrated superconducting receivers / V.P. Koshelets, S.V. Shitov // Superconductor Science and Technology. – 2000. – V. 13, No. 5. – P. R53-R69.
22. Optimization of the phase-locked flux-flow oscillator for the submm integrated receiver / V. P. Koshelets, P. N. Dmitriev, A. B. Ermakov, A. S. Sobolev, M. Yu. Torgashin, V. V. Kurin, A. L. Pankratov, J. Mygind // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 2005. – V. 15, No. 2. – P. 964-967.
23. Superconducting integrated receivers based on Nb-AlN-NbN circuits / M. Yu. Torgashin, V. P. Koshelets, P. N. Dmitriev, A. B. Ermakov, L.V. Filippenko, P. A. Yagoubov. – DOI: 10.1109/TASC.2007.898624 // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 2007. – V. 17, No. 2 – P. 379-382.

24. Coherent emission from large arrays of discrete Josephson junctions / F. Song, F. Müller, R. Behr, A. M. Klushin // Appl. Phys. Lett. – 2009. – V. 95, No. 17. – Art.no. 172501.
25. Towards local oscillators based on arrays of niobium Josephson junctions / M. A. Galin, A. M. Klushin , V. V. Kurin , S. V. Seliverstov, M. I. Finkel, G. N. Goltsman, F. Müller, T. Scheller, A. D. Semenov. – DOI: 10.1088/0953-2048/28/5/055002 // Supercond. Sci. Technol. – 2015. – V. 28, No. 5. – Art.no. 055002.
26. Synchronization of large Josephson junction arrays by traveling electromagnetic waves / M. A. Galin, E. A. Borodianskyi, V. V. Kurin, I. A. Shereshevskiy, N. K. Vdovicheva, V. M. Krasnov, A. M. Klushin // Phys. Rev. Appl. – 2018. – V. 9, No. 5. – Art.no. 054032.
27. Emission of coherent THz radiation from superconductors / L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, N. Gopalsami, Q. Li, M. Tachiki, K. Kadowaki, T. Yamamoto, H. Minami, H. Yamaguchi, T. Tachiki, K. E. Gray, W.-K. Kwok, U. Welp // Science. – 2007. – V. 318, No. 5854. – P 1291-1293.
28. Bulaevskii, L.N. Radiation due to Josephson oscillations in layered superconductors / L. N. Bulaevskii, A. E. Koshelev. – DOI:10.1103/PhysRevLett.99.057002 // Phys. Rev. Lett. – 2007. – V. 99, No. 5. – Art.no. 057002.
29. Coherent terahertz emission of intrinsic Josephson junction stacks in the hot spot regime / H. B. Wang, S. Guenon, B. Gross, J. Yuan, Z. G. Jiang, Y. Y. Zhong, M. Gruenzweig, A. Iishi, P. H. Wu, T. Hatano, D. Koelle, R. Kleiner. // Phys. Rev. Lett. – 2010. – V. 105, No. 5. – Art.no. 057002.
30. Stepantsov, E. THz Josephson properties of grain boundary YBaCuO junctions on symmetric, tilted bicrystal sapphire substrates / E. Stepantsov, M. Tarasov, A. Kalabukhov, L. Kuzmin, T. Claeson // J. Appl. Phys. – 2004. – V. 96, No. 6. – P. 3357–3361.
31. Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы / В. П. Кошелец, П. Н. Дмитриев, А. Б. Ермаков, Л. В. Филиппенко, О. В. Корюкин, М. Ю. Торгашин, А. В. Худченко // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2005. – Т. 48, № 10-11. – С. 947-954.
32. THz range low-noise SIS receivers for space and ground-based radio astronomy / K. I. Rudakov, A. V. Khudchenko, L. V. Filippenko, M. E. Paramonov, R. Hesper, D. Aragão Ronsó da Costa Lima, A. M. Baryshev, V. P. Koshelets. – DOI: 10.3390/app112110087 // Appl. Sci. – 2021. – V.11, No. 21. – Art.no. 10087.

33. Terahertz technology and its applications / A. Y. Pawar, D. D. Sonawane, K. B. Erande, D. V. Derle. – DOI: 10.1016/j.dit.2013.03.009 // Drug Invention Today. – 2013. – V.5, No. 2. – P. 157-163.
34. The 2017 terahertz science and technology roadmap / S. S. Dhilion, M. S. Vitiello, E. H. Linfield, A. G. Davies, Matthias C. Hoffmann et al. – DOI: 10.1088/1361-6463/50/4/043001 // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2017. – V. 50, No. 4. – Art.no. 043001.
35. 1.6 THz heterodyne receiver for the far infrared space telescope / S. Cherednichenko, M. Kroug, H. Merkel, P. Khosropanah, A. Adam, E. Kollberg, D. Loudkov, G. Gol'tsman, B. Voronov, H. Richter, H. Huebers. – DOI: 10.1016/S0921-4534(02)00715-3 // Physica C: Superconductivity. – 2002. – V. 372-376, Part 1. – P. 427-431.
36. First M87 event horizon telescope results. IV. Imaging the central supermassive black hole / K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef et al. – DOI: 10.3847/2041-8213/ab0e85 // The Astrophysical Journal Letters. – 2019. – V. 875, No. 1. – Art.no. L4.
37. Superconducting integrated receiver for TELIS / V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.B. Ermakov, O.V. Koryukin, L.V. Filippenko, A. V. Khudchenko, M. Yu. Torgashin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, O.M. Pylypenko. – DOI: 10.1109/TASC.2005.850138 // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – V. 15, No. 2. – P. 960-963.
38. HCl and ClO in activated arctic air; first retrieved vertical profiles from TELIS submillimetre limb spectra / A. de Lange, M. Birk, G. de Lange, F. Friedl-Vallon, O. Kiselev, V. Koshelets, G. Maucher, H. Oelhaf, A. Selig, P. Vogt, G. Wagner, J. Landgraf. – DOI: 10.5194/amt-5-487-2012 // Atmospheric Measurement Techniques. – 2012. – Vol. 5, No. 2. – P. 487-500.
39. Siegel, P.H. Terahertz technology in biology and medicine / P.H. Siegel. – DOI: 10.1109/TMTT.2004.835916 // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2004. – V. 52, No. 10. – P. 2438- 2447.
40. Fischer, B. M. Far-infrared vibrational modes of DNA components studied by terahertz time-domain spectroscopy / B. M. Fischer, M. Walther, P. Uhd Epsen. – DOI: 10.1088/0031-9155/47/21/319 // Physics in Medicine and Biology. – 2002. – V. 47, No. 21. – P. 3807-3814.
41. Vacuum electronic high power terahertz sources / J. H. Booske, R. J. Dobbs, C. D. Joye, C. L. Kory, G. R. Neil, G.-S. Park // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2011. – V. 1, No. 1 – P. 54-75.

42. Booske, John H. Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation / John H. Booske // Physics of Plasmas. – 2008. – V. 15, No. 5. – Art.no. 055502.
43. Quantum cascade laser / J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, A. Y. Cho // Science. – 1994. – V. 264, No. 5158. – P. 553-556.
44. Terahertz semiconductor-heterostructure laser / R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti, F. Rossi // Nature. – 2002. – V. 417, No. 6885. – P. 156-159.
45. Electron-lattice coupling in bound-to-continuum THz quantum-cascade lasers / M. S. Vitiello, G. Scamarcio,V. Spagnolo, T. Losco, R. P. Green, A. Tredicucci, H. E. Beere, D. Ritchie // Appl. Phys. Lett. – 2006. – V. 88, No. 24. – Art.no. 241109. – P. 1-3.
46. Threshold reduction in quantum cascade lasers with partially undoped, dualwavelength interdigitated cascades / A. Straub, T. S. Mosely, C. Gmachl, R. Colombelli, M. Troccoli, F. Capasso, D. L. Sivco, A. Y. Cho // Appl. Phys. Lett. – 2002. – V. 80, No. 16. – P. 2845-2847.
47. Resonant-phonon-assisted THz quantum-cascade lasers with metal–metal waveguides / Q. Hu, B. S. Williams, S. Kumar, H. Callebaut, S. Kohen, J. L. Reno // Semicond. Sci. Technol. – 2005. – V. 20, No. 7. – P. 228-236.
48. Electrically switchable, two-color quantum cascade laser emitting at 1.39 and 2.3 THz / G. Scalari, C. Walther, J. Faist, H. Beere, D. Ritchie // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 88, No. 14. – Art.no. 141102.
49. A 180mW InP HBT power amplifier MMIC at 214 GHz / T. B. Reed, Z. Griffith, P. Rowell, M. Field, M. Rodwell // 2013 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. – 2013. – P. 1-4.
50. Power amplification at 0.65 THz using InP HEMTs / V. Radisic, K. M. K. H. Leong, X. B. Mei, S. Sarkozy, W. Yoshida, W. R. Deal // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 2012. – V. 60, No. 3. – P. 724-729.
51. A 0.85 THz low noise amplifier using InP HEMT transistors / K. M. K. H. Leong, X. Mei, W. Yoshida, P.-H. Liu, Z. Zhou, M. Lange // IEEE Microw. Compon. Lett. – 2015. – V. 25, No. 6. – P. 397-399.
52. Demonstration of a room temperature 2.48-2.75 THz coherent spectroscopy source / J. C. Pearson, B. J. Drouin, A. Maestrini, I. Mehdi, J. Ward, R. H. Lin, S. Yu, J. J. Gill, B. Thomas, C. Lee, G. Chattopadhyay, E. Schlecht, F. W. Maiwald, P. F. Goldsmith, P. Siegel // Rev. Sci. Instrum. – 2011. – V. 82, No. 9. – Art.no. 093105.

53. Richter, H. Phase locking of quantum-cascade lasers operating around 3.5 and 4.7 THz with a Schottky-diode harmonic mixer / H. Richter, N. Rothbart, M. Wienold, X. Lü, K. Biermann, L. Schrottke, D. Jayasankar, J. Stake, P. Sobis, H.-W. Hübers // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. – 2024. – V. 14, No. 3. – P. 346–353.
54. Semiconductor–superlattice frequency multiplier for generation of submillimeter waves / F. Klappenberger, K. F. Renk, P. Renk, B. Rieder, Yu. I. Koshurinov, D. G. Pavelev, V. Ustinov, A. Zhukov, N. Maleev, A. Vasilyev // Appl. Phys. Lett. – 2004. – V. 84, No. 19. – P. 3924-3926.
55. Application of superlattice multipliers for high-resolution terahertz spectroscopy / C. P. Endres, F. Lewen, T. F. Giesen, S. Schlemmer, D. G. Paveliev, Y. I. Koschurinov, V. M. Ustinov, A. E. Zhucov // Rev. Sci. Instrum. – 2007. – V. 78, No. 4 . – Art.no. 043106.
56. Экспериментальное исследование умножителей частоты на полупроводниковых сверхрешетках в терагерцовом диапазоне частот / Д. Г. Павельев, Ю. И. Кошуринов, А. С. Иванов, А. Н. Панин, В. Л. Вакс, В. И. Гавриленко, А. В. Антонов, В. М. Устинов, А. Е. Жуков // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, № 1. – С. 125-129.
57. Probable observation of the Josephson superconducting tunneling effect / P. W. Anderson, J. M. Rowell // Physical Review Letters. – 1963. – V. 10, No. 6. – P. 230-232.
58. Лихарев, К. К. Введение в динамику джозефсоновских переходов / К. К. Лихарев. – Москва : Наука, 1985. – 320 с.
59. Шмидт, В. В. Введение в физику сверхпроводников / В. В. Шмидт. – Москва : МЦНМО, 2000. – 402 с.
60. Generation of harmonics and subharmonics of the Josephson oscillation / D. B. Sullivan, R. L. Peterson, V. E. Kose, J. E. Zimmerman // J. Appl. Phys. – 1970. – V. 41, No. 12. – P. 4865-4873.
61. Likes, R. S. Power spectrum of radiation from a Josephson junction / R. S. Likes, C. M. Falco // J. Appl. Phys. – 1977. – V. 48, No. 12. – P. 5370-5371.
62. Zimmerman, J. E. Coherent radiation from high-order quantum transitions in small-area superconducting contacts / J. E. Zimmerman, A. H. Silver // Phys. Rev. Lett. – 1967. – V. 19, No. 1. – P. 14-16.
63. Kittara, P. Theoretical and numerical analysis of very high harmonic superconducting tunnel junction mixers / P. Kittara, S. Withington, G. Yassin // J. Appl. Phys. – 2007. – V. 101, No. 2. – Art.no. 024508.

64. Гармонический смеситель на туннельном переходе сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник / К. В. Калашников, А. В. Худченко, А. М. Барышев, В. П. Кошелец // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56, № 6. – С. 751-759.
65. Shapiro, S. Josephson currents in superconducting tunneling: the effect of microwaves and other observations / S. Shapiro // Phys. Rev. Lett. – 1963. – V. 11, No. 2. – P. 80-82.
66. Heiselberg, P. Shapiro steps in Josephson junctions / P. Heiselberg. – University of Copenhagen, 2013. – 19 p. – URL: https://nbi.ku.dk/english/theses/bachelor-theses/peder-heiselberg/BachProjPHeiselberg2013.pdf
67. Tucker, J. R. Quantum detection at millimeter wavelengths / J. R. Tucker, M. J. Feldman // Rev. Mod. Phys. – 1985. – V. 57, No. 4. – P. 1055-1113.
68. Self-pumping effects and radiation linewidth of Josephson flux flow oscillators / V. P. Koshelets, S. V. Shitov, A. V. Shchukin, L. V. Filippenko, J. Mygind, A. V. Ustinov // Phys. Rev. B. – 1997. – V. 56, No. 9. – P. 5572-5577.
69. Werthamer, N. R. Nonlinear self-coupling of Josephson radiation in superconducting tunnel junctions / N. R. Werthamer // Phys. Rev. – 1966. – V. 147, No. 1. – P. 255-263.
70. Hasselberg, L.-E. Theories of subharmonic gap structures in superconducting junctions / L.-E. Hasselberg, M. T. Levinsen, M. R. Samuelsen // Phys. Rev. B. – 1974. – V. 9, No. 9. – P. 3757.
71. A three photon noise SIS heterodyne receiver at submillimeter wavelength / A. Karpov, J. Blondel, M. Voss, K.-H. Gundlach // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1999. – V. 9, No. 2. – P. 4456-4459.
72. Quantum limited SIS receiver technology for the detection of water isotopologue emission from comets / J. W. Kooi, D. J. Hayton, B. Bumble, H. G. LeDuc, A. Skalare, M. Alonso-delPino, A. Peralta, R. Lin, P. Von Allmen, P. F. Goldsmith, I. Mehdi, G. Chattopadhyay // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2020. – V. 10, No. 6. – P. 569-582.
73. Hamilton, C. A. Josephson voltage standard-a review / C. A. Hamilton, C. J. Burroughs, S. P. Benz // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1997. – V. 7, No. 2. – P. 3756-3761.
74. Jeanneret, B. High precision comparison between SNS and SIS Josephson voltage standards / B. Jeanneret, A. Rufenacht, C. J. Burroughs // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2001. – V. 50, No. 2. – P. 188-191.

75. 1 V and 10 V SNS programmable voltage standards for 70 GHz / F. Mueller, R. Behr, T. Weimann, L. Palafox, D. Olaya, P. D. Dresselhaus, S. P. Benz // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – V. 19, No. 3. – P. 981-986.
76. Fagaly, R. L. Superconducting quantum interference device instruments and applications / R. L. Fagaly // Rev. Sci. Instrum. – 2006. – V. 77, No. 10. – Art.no. 101101.
77. Tutorial: basic principles, limits of detection, and pitfalls of highly sensitive SQUID magnetometry for nanomagnetism and spintronics / M. Buchner, K. Höfler, B. Henne, V. Ney, A. Ney // J. Appl. Phys. – 2018. – V. 124, No. 16. – Art.no. 161101.
78. Dumas, R.K. Recent advances in SQUID magnetometry / R. K. Dumas, T. Hogan // Magnetic measurement techniques for materials characterization. – Cham : Springer, 2021. – P. 39-62. – ISBN 978-3-030-70443-8
79. Sternickel, K. Biomagnetism using SQUIDs: status and perspectives / K. Sternickel, A. I. Braginski // Superconductor Science and Technology. – 2006. – V. 19, No. 3. – P. 160-171.
80. Siddiqi, I. Engineering high-coherence superconducting qubits / I. Siddiqi // Nat. Rev. Mater. – 2021. – V. 6, No. 10. – P. 875-891.
81. High-quality ferromagnetic Josephson junctions based on aluminum electrodes / A. Vettoliere, R. Satariano, R. Ferraiuolo, L. D. Palma, H. G. Ahmad, G. Ausanio, G. P. Pepe, F. Tafuri, D. Massarotti, D. Montemurro, C. Granata, L. Parlato // Nanomaterials. – 2022. – V. 12, No. 23. – Art.no. 4155.
82. High-Q trenched aluminum coplanar resonators with an ultrasonic edge microcutting for superconducting quantum devices / E. Zikiy, A. I. Ivanov, N. S. Smirnov, D. O. Moskalev, V. I. Polozov, A. R. Matanin, E. I. Malevannaya,, V. V. Echeistov, T. G. Konstantinova, I. A. Rodionov // Sci. Rep. – 2023. – V. 13, No. 1. – Art.no. 15536.
83. Single flux quantum-based digital control of superconducting qubits in a multichip module / C. H. Liu, A. Ballard, D. Olaya, D. R. Schmidt, J. Biesecker, T. Lucas, J. Ullom, S. Patel, O. Rafferty, A. Opremcak, K. Dodge, V. Iaia, T. McBroom, J. L. DuBois, P. F. Hopkins, S. P. Benz, B. L. T. Plourde, R. McDermott // PRX Quantum. – 2023. – V. 4, No. 3. – Art.no. 030310.
84. Bell, M. T. Traveling-wave parametric amplifier based on a chain of coupled asymmetric SQUIDs / M. T. Bell, A. Samolov // Phys. Rev. Applied. – 2015. – V. 4, No. 2. – Art.no. 024014.

85. Aumentado, J. Superconducting parametric amplifiers: the state of the art in Josephson parametric amplifiers / J. Aumentado // IEEE Microw. Mag. – 2020. – V. 21, No. 8. – P. 45-59.
86. Darula, M. Millimetre and sub-mm wavelength radiation sources based on discrete Josephson junction arrays / M. Darula, T. Doderer, S. Beuven // Supercond. Sci. Technol. – 1999. – V. 12, No. 1 – P. R1-R25.
87. Benz, S. P. Coherent emission from two-dimensional Josephson junction arrays / S. P. Benz, C. J. Burroughs // Applied Physics Letters. – 1991. – V. 58, No. 19. – P. 2162-2164.
88. Jain, A. K. Observation of phase coherence among multiple Josephson oscillators / A. K. Jain, P. Mankiewich, J. E. Lukens // Appl. Phys. Lett. – 1980. – V. 36, No. 9. – P. 774-776.
89. Mutual phase locking in Josephson junction arrays / A. K. Jain, K. K. Likharev, J. E. Lukens, J. E. Sauvageau // Phys. Rep. – 1984. – V. 109, No. 6. – P. 309-426.
90. Sauvageau, J. E. Millimeter wave phase-locking in distributed Josephson arrays / J. E. Sauvageau, A. K. Jain, J. E. Lukens // Int. J. Infrared Milli Waves. – 1987. – V. 8, No. 10. – P. 1281-1286.
91. Distributed Josephson junction arrays as local oscillators / B. Bi, S. Han, J. E. Lukens, K. Wan // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1993. – V. 3, No. 1. – P. 2303-2306.
92. Demonstration of Josephson effect submillimeter wave sources with increased power / S. Han, B. Bi, W. Zhang, J. E. Lukens // Appl. Phys. Lett. – 1994. – V. 64, No. 11. – P. 1424-1426.
93. Booi, P. A. A. High power generation with distributed Josephson-junction arrays / P. A. A. Booi, S. P. Benz // Appl. Phys. Lett. – 1996. – V. 68, No. 26. – P. 3799-3801.
94. Deus, S. Linewidth measurement of millimeter wave radiation from a Josephson array source coupled to free space / S. Deus, S. Kiryu // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 1999. – V. 9, No. 2. – P. 4325-4328
95. Fundamental and harmonic submillimeter-wave emission from parallel Josephson junction arrays / F. Boussaha, M. Salez, A. Féret, B. Lecomte, C. Chaumont, M. Chaubet, F. Dauplay, Y. Delorme, J.-M. Krieg // J. Appl. Phys. – 2009. – V. 105, No. 7. – Art.no. 073902.
96. Coherent emission from large arrays of discrete Josephson junctions / F. Song, F. Müller, R. Behr, A. M. Klushin // Appl. Phys. Lett. – 2009. – V. 95, No. 17. – Art.no. 172501.

97. Direct visualization of phase-locking of large Josephson junction arrays by surface electromagnetic waves / M. A. Galin, F. Rudau, E. A. Borodianskyi, V. V. Kurin, D. Koelle, R. Kleiner, V. M. Krasnov, A. M. Klushin // Phys. Rev. Applied. – 2020. – V. 14, No. 2. – Art.no. 024051.
98. Coherent amplification of radiation from two phase-locked Josephson junction arrays / M. A. Galin, V. M. Krasnov, I. A. Shereshevsky, N. K. Vdovicheva, V. V. Kurin // Journal of Nanotechnology. – 2022. – V. 13, No. 1. – P. 1445-1457.
99. Cattaneo, R. Observation of collective excitation of surface plasmon resonances in large Josephson junction arrays / R. Cattaneo, M. A. Galin, V. M. Krasnov // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2022. – V. 13, No. 1. – P. 1578-1588.
100. Scott, A. C. Fluxon interactions / A. C. Scott, W. J. Johnson // Appl. Phys. Lett. – 1977. – V. 30, No. 10. – P. 545–547.
101. A Multi-fluxon effects in long Josephson junctions / A. V. Ustinov, T. Doderer, R. P. Huebener, J. Mygind, V. A. Oboznov, N. F. Pedersen // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 1993. – V. 3, No. 1. – P. 2287- 2294.
102. Erné, S. N. Fluxon propagation, zero-field steps, and microwave radiation in very long Josephson tunnel junctions / S. N. Erné, R. D. Parmentier // J. Appl. Phys. – 1981. – V. 52, No. 2. – P. 1091-1095.
103. Yoshida, K. Frequency conversion in a long Josephson junction with a moving vortex array / K. Yoshida, F. Irie // Appl. Phys. Lett. – 1975. – V. 27, No. 8. – P. 469-470.
104. Thermal fluctuations in resonant motion of fluxons on a Josephson transmission line: theory and experiment / E. Joergensen, V. P. Koshelets, R. Monaco, J. Mygind, M. R. Samuelsen, M. Salerno // Phys. Rev. Lett. – 1982. – V. 49, No. 15. – P. 1093–1096.
105. Lee, G. S. Geometric and material dispersion in Josephson transmission lines / G. S. Lee, A. T. Barfknecht // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 1992 – V. 2, No. 2. – P. 67-73.
106. Erné, S. N. Loading effects on Josephson junction fluxon oscillators / S. N. Erné, R. D. Parmentier // J. Appl. Phys. – 1981. – V. 52, No. 3. – P. 1608-1609.
107. Zhang, Y. M. Numerical calculation of the height of velocity-matching step of flux-flow type Josephson oscillator / Y. M. Zhang, P. H. Wu // J. Appl. Phys. – 1990. – V. 68, No. 9. – P. 4703-4709.
108. Zhang, Y. Effect of losses on the output voltage of a flux-flow type Josephson oscillator / Y. Zhang // Nonlinear superconductive electronics and Josephson

devices. – Boston, MA : Springer US, 1991. – P. 145–153. – ISBN 978-1-4615-3852-3.

109. Zhang, Y.M. Detection of mm and submm wave radiation from soliton and flux-flow modes in a long Josephson junction / Y.M. Zhang, D. Winkler, T. Claeson // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1993. – V. 3, No. 1. – P. 2520-2523.
110. Flux-flow type Josephson oscillator for millimeter and submillimeter wave region / T. Nagatsuma, K. Enpuku, F. Irie, K. Yoshida // J. Appl. Phys. – 1983. – V. 54, No. 6. – P. 3302-3309.
111. Flux-flow-type Josephson oscillator for millimeter and submillimeter wave region. II. Modeling / T. Nagatsuma, K. Enpuku, K. Yoshida, F. Irie // J. Appl. Phys. – 1984. – V. 56, No. 11. – 3284-3293.
112. Flux-flow-type Josephson oscillator for millimeter and submillimeter wave region. III. Oscillation stability / T. Nagatsuma, K. Enpuku, K. Sueoka, K. Yoshida, F. Irie // J. Appl. Phys. – 1985. – V. 58, No. 1. – P. 441-449.
113. Qin, J. Flux-flow-type Josephson oscillator for millimeter and submillimeter wave region. IV. Thin-film coupling / J. Qin, K. Enpuku, K. Yoshida // J. Appl. Phys. – 1988. – V. 63, No. 4. – P. 1130-1135.
114. Zhang, Y. Dynamics and applications of long Josephson junctions : Ph.D.-thesis : Physical Sciences / Y. Zhang ; Chalmers University of Technology. – Goteborg, 1993. – ISBN 91-7032-888-9.
115. Fluxon dynamics in long annular Josephson tunnel junctions / N. Martucciello, J. Mygind, V. P. Koshelets, A. V. Shchukin, L. V. Filippenko, R. Monaco // Phys. Rev. B. – 1998. – V. 57, No. 9. – P. 5444-5449.
116. Zhang, Y. M. Linewidth measurements of Josephson flux-flow oscillators in the band 280–330 GHz / Y. M. Zhang, D. Winkler, T. Claeson. // Appl. Phys. Lett. – 1993. – V. 62, No. 24. – P. 3195-3197.
117. Linewidth of submillimeter wave flux-flow oscillators / V. P. Koshelets, S. V. Shitov, A. V. Shchukin, L. V. Filippenko, J. Mygind // Appl. Phys. Lett. – 1996. – V. 69, No. 5, P. 699-701.
118. Koshelets, V. P. Radiation linewidth of flux-flow oscillators / V. P. Koshelets, P. N. Dmitriev, A. B. Ermakov, A. S. Sobolev, A. M. Baryshev, P. R. Wesselius, J. Mygind // Supercond. Sci. Technol. – 2001. – V. 14, No. 12. – P. 1040–1043.
119. Linewidth of Josephson flux flow oscillators / V. P. Koshelets, P. N. Dmitriev, A. S. Sobolev, A. L. Pankratov, V. V. Khodos, V. L. Vaks, A. M. Baryshev, P. R. Wesselius, J. Mygind // Physica C: Superconductivity. – 2002. – V. 372. – P. 316-321.

120. The mm-wave Josephson flux flow oscillator; linewidth measurements and simple theory / J. Mygind, M. R. Samuelsen, V. P. Koshelets, A. S. Sobolev // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 2005. – V. 15, No. 2. – P. 968-971.
121. Phase-locked Josephson soliton oscillators / T. Holst, J. B. Hansen, N. Gronbech-Jensen, J. A. Blackburn // IEEE Trans. on Magnetics. – 1991. – V. 27, No. 2. – P. 2704-2707.
122. Ustinov, A. V. Phase-locked flux-flow Josephson oscillator / A. V. Ustinov, J. Mygind, V. A. Oboznov // J. Appl. Phys. – 1992. – V. 72, No. 3. – P. 1203-1205.
123. Phase locking of 270-440 GHz Josephson flux flow oscillator based on flux flow in long Josephson tunnel junctions / V. P. Koshelets, S. V. Shitov, L. V. Filippenko, V. L. Vaks, J. Mygind, A. B. Baryshev, W. Luinge, N. Whyborn // Rev. of Sci. Instr. – 2000. – V. 71, No. 1. – P. 289-293.
124. Кинев, Н. В. Генерация и прием ТГц излучения с использованием сверхпроводниковых интегральных устройств : диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук : 01.04.03 / Кинев Николай Вадимович ; Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. – Москва, 2012. – 140 с.
125. Gulevich, D. R. Josephson flux-flow oscillator: the microscopic tunneling approach / D. R. Gulevich, V. P. Koshelets, F. V. Kusmartsev // Phys. Rev. B. – 2017. – V. 96, No. 2. – Art.no. 024515.
126. Gulevich, D. R. Microscopic tunneling model of Nb–AlN–NbN Josephson flux-flow oscillator / D. R. Gulevich, L. V. Filippenko, V. P. Koshelets // Journal of Low Temperature Physics. – 2019. – V. 194, No. 3 – P. 312-324.
127. An integrated 500 GHz receiver with superconducting local oscillator / V. P. Koshelets, S. V. Shitov, L. V. Filippenko, A. M. Baryshev, W. Luinge, H. Golstein, H. van de Stadt, J.-R. Gao, T. de Graauw // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 1997. – V. 7, No. 2. – P. 3589-3592.
128. Flux flow oscillators for sub-mm wave integrated receivers / V. P. Koshelets, S. V. Shitov, A. V. Shchukin, L. V. Filippenko, P. N. Dmitriev, V. L. Vaks, J. Mygind, A. M. Baryshev, W. Luinge, H. Golstein // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 1999. – V. 9, No. 2. – P. 4133-4136.
129. An integrated receiver with phase-locked superconducting oscillator / S. V. Shitov, V. P. Koshelets, A. B. Ermakov, P. N. Dmitriev, L. V. Filippenko, P. A. Yagoubov, W.-J. Vreeling, P. R. Wesselius, V. V. Khodos, V. L. Vaks // IEEE Trans. on Appl. Supercond. – 2003. – V. 13, No. 2. – P. 684-687.

130. Koshelets, V. P. Superconducting millimeter wave oscillators and SIS mixers integrated on a chip / V. P. Koshelets, A. V. Shchukin, S. V. Shitov, L. V. Filippenko // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 1993. – V. 3, No. 1. – P. 2524–2527.
131. Fiske, M. D. Temperature and magnetic field dependences of the Josephson tunneling current / M. D. Fiske // Rev. Mod. Phys. – 1964. – V. 36, No. 1. – P. 221-222.
132. Coon, D. D. Josephson ac and step structure in the supercurrent tunneling characteristic / D. D. Coon, M. D. Fiske // Phys. Rev. – 1965. – V. 138, No. 3A. – P. A744-A746.
133. Chang, J.-J. Fiske steps in Josephson junctions / J.-J. Chang // Phys. Rev. B. – 1983. – V. 28, No. 3. – P. 1276-1280.
134. Influence of surface losses and the self-pumping effect on current-voltage characteristics of a long Josephson junction / A. L. Pankratov, A. S. Sobolev, V. P. Koshelets, J. Mygind // Phys. Rev. B – 2007. – V. 75, No. 18. – Art.no. 184516.
135. Khudchenko, A. V. Cryogenic phase locking loop system for superconducting integrated receiver / A. V. Khudchenko, V. P. Koshelets, P. N. Dmitriev, A. B. Ermakov, P. A. Yagoubov, O. M. Pylypenko // Supercond. Sci. Technol. – 2009. – V. 22, No. 8. – Art. no. 085012.
136. Калашников, К. В. Криогенный фазовый детектор / К. В. Калашников, А. В. Худченко, В. П. Кошелец // Изв. РАН. Сер. физ. – 2013. – Т. 77, № 1. – С. 33-36.
137. Kalashnikov, K. V. Harmonic phase detector for phase locking of cryogenic terahertz oscillators / K. V. Kalashnikov, A. V. Khudchenko, V. P. Koshelets // Appl. Phys. Lett. – 2013. – V. 103, No. 10. – P. 102601.
138. Kleiner, R. Intrinsic Josephson effects in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ single crystals / R. Kleiner, F. Steinmeyer, G. Kunkel, P. Müller // Phys. Rev. Lett. – 1992. – V. 68, No. 15. – P. 2394–2397.
139. Bulaevskii, L. N. Radiation due to Josephson Oscillations in Layered Superconductors / L. N. Bulaevskii, A. E. Koshelev // Phys. Rev. Lett. – 2007. – V. 99, No. 5. – Art.no. 057002.
140. Krasnov, V. M. Nonlinear Nonequilibrium Quasiparticle Relaxation in Josephson Junctions / V. M. Krasnov // Phys. Rev. Lett. – 2009. – V. 103, No. 22. – Art.no. 227002.

141. Pedersen, N. F. THz Generation Using Fluxon Dynamics in High Temperature Superconductors / N. F. Pedersen, S. Madsen // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2009. – V. 19, No. 3. – P. 726–729.
142. Lin, S. Z. Response and amplification of terahertz electromagnetic waves in intrinsic Josephson junctions of layered high-Tc superconductors / S. Z. Lin, X. Hu // Phys. Rev. B – 2010. – V. 82, No. 2. – Art.no. 020504.
143. Krasnov, V. M. Coherent flux-flow emission from stacked Josephson junctions: Nonlocal radiative boundary conditions and the role of geometrical resonances / V. M. Krasnov // Phys. Rev. B – 2010. – V. 82, No. 13. – Art.no. 134524.
144. Yurgens, A. A. Temperature distribution in a large $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ mesa / A. A. Yurgens // Phys. Rev. B – 2011. – V. 83, No. 18. – Art.no. 184501.
145. Asai, H., Tachiki, M., Kadowaki, K. Three-dimensional numerical analysis of terahertz radiation emitted from intrinsic Josephson junctions with hot spots / H. Asai, M. Tachiki, K. Kadowaki // Phys. Rev. B – 2012. – V. 85, No. 6. – Art.no. 064521.
146. Wang, H. B. Hot Spots and Waves in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ Intrinsic Josephson Junction Stacks: A Study by Low Temperature Scanning Laser Microscopy / H. B. Wang, S. Guénon, J. Yuan, A. Iishi, S. Arisawa, T. Hatano, T. Yamashita, D. Koelle, R. Kleiner // Phys. Rev. Lett. – 2009. – V. 102, No. 1. – Art.no. 017006.
147. Wang, H. B. Coherent Terahertz Emission of Intrinsic Josephson Junction Stacks in the Hot Spot Regime / H. B. Wang, S. Guénon, B. Gross, J. Yuan, Z. G. Jiang, Y. Y. Zhong, M. Grünzweig, A. Iishi, P. H. Wu, T. Hatano, D. Koelle, R. Kleiner // Phys. Rev. Lett. – 2010. – V. 105, No. 5. – Art.no. 057002.
148. Guénon, S. Interaction of hot spots and terahertz waves in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction stacks of various geometry / S. Guénon, M. Grünzweig, B. Gross, J. Yuan, Z. G. Jiang, Y. Y. Zhong, M. Y. Li, A. Iishi, P. H. Wu, T. Hatano, R. G. Mints, E. Goldobin, D. Koelle, H. B. Wang, R. Kleiner // Phys. Rev. B – 2010. – V. 82, No. 21. – Art.no. 214506.
149. Tsujimoto, M. Geometrical Resonance Conditions for THz Radiation from the Intrinsic Josephson Junctions in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ / M. Tsujimoto, K. Yamaki, K. Deguchi, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki, K. Kadowaki, R. A. Klemm // Phys. Rev. Lett. – 2010. – V. 105, No. 3. – Art.no. 037005.
150. Benseman, T. M. Tunable terahertz emission from $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ mesa devices / T. M. Benseman, A. E. Koshelev, K. E. Gray, W.-K. Kwok, U. Welp,

K. Kadowaki, M. Tachiki, T. Yamamoto // Phys. Rev. B – 2011. – V. 84, No. 6. – Art.no. 064523.

151. Yamaki, K. High-power terahertz electromagnetic wave emission from high-Tc superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ mesa structures / K. Yamaki, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, A. Furukawa, T. Kashiwagi, H. Minami, K. Kadowaki // Opt. Express – 2011. – V. 19, No. 4. – P. 3193–3201.
152. Kashiwagi, T. A high-Tc intrinsic Josephson junction emitter tunable from 0.5 to 2.4 terahertz / T. Kashiwagi, K. Sakamoto, H. Kubo, Y. Shibano, T. Enomoto, T. Kitamura, K. Asanuma, T. Yasui, C. Watanabe, K. Nakade, Y. Saiwai, T. Katsuragawa, M. Tsujimoto, R. Yoshizaki, T. Yamamoto, H. Minami, R. A. Klemm, K. Kadowaki // Appl. Phys. Lett. – 2015. – V. 107, No. 8. – Art.no. 082601.
153. Borodianskyi, E. A. Josephson emission with frequency span 1–11 THz from small $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ mesa structures / E. A. Borodianskyi, V. M. Krasnov // Nat. Commun. – 2017. – V. 8. – Art.no. 1742.
154. Sekimoto, S. Continuous 30 μW terahertz source by a high-Tc superconductor mesa structure / S. Sekimoto, C. Watanabe, H. Minami, T. Yamamoto, T. Kashiwagi, R. A. Klemm, K. Kadowaki // Appl. Phys. Lett. – 2013. – V. 103, No. 18. – Art.no. 182601.
155. Benseman, T. M. Powerful terahertz emission from $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ mesa arrays / T. M. Benseman, K. E. Gray, A. E. Koshelev, W.-K. Kwok, U. Welp, H. Minami, K. Kadowaki, T. Yamamoto // Appl. Phys. Lett. – 2013. – V. 103, No. 2. – Art.no. 022602.
156. Mattis, D. C. Theory of the anomalous skin effect in normal and superconducting metals / D. C. Mattis, J. Bardeen // Phys. Rev. – 1958. – V. 111, No. 2. – P. 412–417.
157. Turneaure, J. P. The surface impedance of superconductors and normal conductors: the Mattis–Bardeen theory / J. P. Turneaure, J. Halbritter, H. A. Schwettman // J. Supercond. – 1991. – V. 4, No. 5. – P. 341–355.
158. Kooi, J. W. Frequency-dependent loss in superconducting transmission lines / J. W. Kooi et al. // Int. J. Infrared Millim. Waves – 1998. – V. 19, No. 3. – P. 373–383.
159. Jackson, B. D. NbTiN/SiO_2/Al tuning circuits for low-noise 1 THz SIS mixers / B. D. Jackson, N. N. Iosad, G. de Lange, A. M. Baryshev, W. M. Laauwen, J. R. Gao, T. M. Klapwijk // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2001. – V. 11, No. 1. – P. 653–656.

160. Cyberey, M. NbTiN/AlN/NbTiN SIS Junctions Realized by Reactive Bias Target Ion Beam Deposition / M. Cyberey, T. Farrahi, J. Lu, A. Kerr, R. M. Weikle, A. W. Lichtenberger // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2019. – V. 29, No. 6. – Art.no. 1100306.
161. Khan, F. V. Characterization of microwave properties of superconducting NbTiN films using TDS / F. V. Khan, E. S. Zhukova, B. P. Gorshunov, L. S. Kadyrov, A. M. Chekushkin, A. V. Khudchenko, V. P. Koshelets // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. – 2023. – V. 13, No. 6. – P. 627–632.
162. Leone, B. Electron heating by photon-assisted tunneling in niobium terahertz mixers with integrated niobium titanium nitride striplines / B. Leone, J. R. Gao, T. M. Klapwijk, B. D. Jackson, W. M. Laauwen, G. de Lange // Appl. Phys. Lett. – 2001. – V. 78, No. 11. – P. 1616–1618.
163. Leone, B. Hot electron effect in terahertz hybrid devices / B. Leone, J. R. Gao, T. M. Klapwijk, B. D. Jackson, W. M. Laauwen, G. de Lange // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2001. – V. 11, No. 1. – P. 649–652.
164. Traini, A. The influence of LO power heating of the tunnel junction on the performance of THz SIS mixers / A. Traini, B. K. Tan, J. D. Garrett, A. Khudchenko, R. Hesper, A. M. Baryshev, P. N. Dmitriev, V. P. Koshelets, G. Yassin // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. – 2020. – V. 10, No. 6. – P. 721–730.
165. Westig, M. P. Improved Nb SIS devices for heterodyne mixers between 700 GHz and 1.3 THz with NbTiN transmission lines using a normal metal energy relaxation layer / M. P. Westig, S. Selig, K. Jacobs, T. M. Klapwijk, C. E. Honingh // J. Appl. Phys. – 2013. – V. 114, No. 12. – Art.no. 124504.
166. Selig, S. Heat transfer coefficient saturation in superconducting Nb tunnel junctions contacted to a NbTiN circuit and an Au energy relaxation layer / S. Selig, M. P. Westig, K. Jacobs, M. Schultz, N. Honingh // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2015. – V. 25, No. 3. – Art.no. 2400705.
167. Khudchenko, A. High Gap Nb-AlN-NbN SIS Junctions for Frequency Band 790–950 GHz / A. Khudchenko, A. M. Baryshev, K. Rudakov, V. Koshelets, P. Dmitriev, R. Hesper, L. de Jong // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. – 2016. – V. 6, No. 1. – Art.no. 057002.
168. Рудаков, К. И. Сверхпроводниковые приёмные структуры диапазона 700–950 ГГц для радиоастрономии / К. И. Рудаков, П. Н. Дмитриев, А. М. Барышев, А. В. Худченко, В. П. Кошелец // Изв. вузов. Радиофизика. – 2016. – Т. 59, № 08–09. – С. 793–797.

169. Broom, R. F. Some temperature-dependent properties of niobium tunnel junctions / R. F. Broom // J. Appl. Phys. – 1976. – V. 47, No. 12. – P. 5432–5439.
170. Pronin, A. V. Direct observation of the superconducting energy gap developing in the conductivity spectra of niobium / A. V. Pronin, M. Dressel, A. Pimenov, A. Loidl, I. V. Roshchin, L. H. Greene // Phys. Rev. B. – 1998. – V. 57, No. 22. – P. 14416–14421.
171. Koshelets, V. P. Superconducting integrated submillimeter receiver for TELIS / V. P. Koshelets, A. B. Ermakov, L. V. Filippenko, A. V. Khudchenko, O. S. Kiselev, A. S. Sobolev, M. Yu. Torgashin, P. A. Yagoubov, R. W. M. Hoogeveen, W. Wild // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2007. – V. 17, No. 2. – P. 336–342.
172. Davidson, A. C. Accuracy improvements in microwave noise parameter measurements / A. C. Davidson, B. W. Leake, E. Strid // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1989. – V. 37, No. 12. – P. 1973–1978.
173. Tiemeijer, L. F. Improved Y-factor method for wide-band on-wafer noise-parameter measurements / L. F. Tiemeijer, R. J. Havens, R. de Kort, A. J. Scholten // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2005. – V. 53, No. 9. – P. 2917–2925.
174. Bell, R. J. Introductory Fourier Transform Spectroscopy / R.J. Bell. – New York and London: Academic Press, 1972. – 382 p. – ISBN 978-0-120-85150-8
175. Рудаков, К.И. Сверхпроводниковые СИС приемники субтерагерцового диапазона для космической и наземной радиоастрономии / К.И. Рудаков, Ф.В. Хан, Л.В. Филиппенко, А.М. Чекушкин, А.В. Худченко, В.П. Кошелец. // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94, № 7. – С. 1087–1094.
176. Filippenko, L. V. Submillimeter superconducting integrated receivers: Fabrication and yield / L. V. Filippenko, S. V. Shitov, P. N. Dmitriev, A. B. Ermakov, V. P. Koshelets, J. R. Gao // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2001. – V. 11, No. 1. – P. 816–819.
177. Dmitriev, P. N. High quality Nb-based tunnel junctions for high frequency and digital applications / P. N. Dmitriev, I. L. Lapitskaya, L. V. Filippenko, A. B. Ermakov, S. V. Shitov, G. V. Prokopenko, S. A. Kovtonyuk, V. P. Koshelets // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2003. – V. 13, No. 2. – P. 107–110.
178. Khudchenko, A. High gap Nb-AlN-NbN SIS junctions for frequency band 790–950 GHz / A. Khudchenko, A. M. Baryshev, K. Rudakov, V. Koshelets,

P. Dmitriev, R. Hesper, L. de Jong // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. – 2016. – V. 6, No. 1. – P. 127–132.

179. Filipovic, D. F. Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses / D. F. Filipovic, S. S. Gearhart, G. M. Rebeiz // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1993. – V. 41, No. 10. – P. 1738–1749.
180. Rudakov, K. Development of Advanced Superconductor-Insulator-Superconductor Mixers for Terahertz Radio Astronomy : Ph.D.-thesis : Astronomy / K. Rudakov ; University of Groningen. – Groningen, 2021. – ISBN 978-94-6419-259-9.
181. Zmuidzinas, J. Quasi-optical slot antenna SIS mixers / J. Zmuidzinas, H. G. LeDuc // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1992. – V. 40, No. 9. – P. 1797–1804.
182. Hamilton, C. A. rf-Induced effects in superconducting tunnel junctions / C. A. Hamilton, S. Shapiro // Phys. Rev. B. – 1970. – V. 2, No. 11. – P. 4494–4503.
183. Kohjiro, S. Radiation power of NbN-based flux-flow oscillators for THz-band integrated SIS receivers / S. Kohjiro, Z. Wang, S. V. Shitov, S. Miki, A. Kawakami, A. Shoji // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2003. – V. 13, No. 2. – P. 672–675.
184. Тарасов, М. А. Изготовление и характеристики сеточных полосовых фильтров в диапазоне 0,3–0,8 ТГц / М. А. Тарасов, В. Д. Громов, Г. Д. Богомолов, Э. А. Отто, Л. С. Кузьмин // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 1. – С. 85–89.
185. Chang, J.-J. Nonequilibrium superconductivity / J.-J. Chang, D. J. Scalapino // J. Low Temp. Phys. – 1978. – V. 31, No. 1/2. – P. 1–32.
186. Goldie, D. J. Non-equilibrium superconductivity in quantum-sensing superconducting resonators / D. J. Goldie, S. Withington // Supercond. Sci. Technol. – 2013. – V. 26. – Art. no. 015004.
187. Welp, U. Superconducting emitters of THz radiation / U. Welp, K. Kadowaki, R. Kleiner // Nat. Photonics. – 2013. – V. 7, No. 9. – P. 702–710.
188. Kakeya, I. Terahertz-wave emission from Bi2212 intrinsic Josephson junctions: a review on recent progress / I. Kakeya, H. Wang // Supercond. Sci. Technol. – 2016. – V. 29, No. 7. – Art. no. 073001.
189. Nakade, K. Applications using high-Tc superconducting terahertz emitters / K. Nakade, T. Kashiwagi, Y. Saiwai, H. Minami, T. Yamamoto, R. A. Klemm, K. Kadowaki // Sci. Rep. – 2016. – V. 6, No. 1. – Art. no. 23178.
190. Kieler, O. Stacked Josephson junction arrays for the pulse-driven AC Josephson voltage standard / O. Kieler, R. Wendisch, R.-W. Gerdau, T.

Weimann, J. Kohlmann, R. Behr // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2021. – V. 31, No. 5. – Art. no. 1100705.

191. Курин, В. В. Джозефсоновские антенны бегущей волны / В. В. Курин, Н. К. Вдовичева, И. А. Шерешевский // Изв. вузов. Радиофизика. – 2016. – Т. 59, № 11. – С. 1030–1046.
192. Galin, M. A. Coherent radiation of active Josephson traveling-wave antennas / M. A. Galin, I. A. Shereshevsky, N. K. Vdovicheva, V. V. Kurin // Supercond. Sci. Technol. – 2021. – V. 34, No. 7. – Art. no. 075005.
193. Галин, М. А. Частотная и фазовая стабилизация излучения массива Nb-NbSi-Nb джозефсоновских контактов / М. А. Галин, М. Ю. Левичев, С. И. Приползин, Л. С. Ревин // Тезисы докладов XXX Симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», 9–13 марта 2026 года, г. Нижний Новгород. – Н. Новгород: ИФМ РАН, 2026. – С. 28.
194. Ревин, Л. С. Взаимодействие молекулярного газа с фазо-диффузионным полем и когерентным сигналом / Л. С. Ревин, В. Л. Вакс, В. П. Кошелец, Х. Ван // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 1. – С. 1-13.
195. Sobakinskaya, E. A. Dynamics of a quantum two-level system under the action of phase-diffusion field / E. A. Sobakinskaya, A. L. Pankratov, V. L. Vaks // Phys. Lett. A. – 2012. – V. 376, No. 4. – P. 265–269.
196. Consolino, L. THz QCL-based cryogen-free spectrometer for in situ trace gas sensing / L. Consolino, S. Bartalini, H. E. Beere, D. A. Ritchie, M. S. Vitiello, P. De Natale // Sensors. – 2013. – V. 13, No. 3. – P. 3331–3340.
197. Gerecht, E. Chirped-pulse terahertz spectroscopy for broadband trace gas sensing / E. Gerecht, K. O. Douglass, D. F. Plusquellic // Opt. Express. – 2011. – V. 19, No. 9. – P. 8973–8984.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и Scopus

A1. F.V. Khan, L.V. Filippenko, A.B. Ermakov, M.E. Paramonov, M.Yu. Fominsky, **N.V. Kinev**, V.P. Koshelets, S.A. Nikitov. Superconducting terahertz generators // **Physics–Uspekhi** – 2025. – Vol. 68, No 6. – P. 584-596. DOI: 10.3367/UFNe.2024.12.039864

A2. L.V. Filippenko, A.M. Chekushkin, M.Yu. Fominskii, A.B. Ermakov, **N.V. Kinev**, K.I. Rudakov, A.V. Khudchenko, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets, S.A. Nikitov. Superconducting terahertz receivers // **Physics–Uspekhi** – 2025. – Vol. 67, No 11. – P. 1139-1152. DOI: 10.3367/UFNe.2024.07.039726

A3. R. Wieland, O. Kizilaslan, **N. Kinev**, E. Dorsch, S. Guenon, Z. Song, Z. Wei, H. Wang, P. Wu, D. Koelle, V.P. Koshelets, R. Kleiner. Terahertz emission from mutually synchronized standalone $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ intrinsic-Josephson-junction stacks // **Phys. Rev. Applied** – 2024. – Vol. 22, No. 4. – Art. no. 044022. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.22.044022

A4. E.S. Zhukova, B.P. Gorshunov, L.S. Kadyrov, K.V. Zhivetev, A.V. Terentiev, A.M. Chekushkin, F.V. Khan, A.V. Khudchenko, **N.V. Kinev**, V.P. Koshelets. Impact of the Buffer Layers and Anodization on Properties of NbTiN Films for THz Receivers // **IEEE Trans. Appl. Supercond**. – 2024. – Vol. 34, No. 3. – Art. no. 1100605. DOI: 10.1109/TASC.2024.3353139

A5. M.A. Galin, **N.V. Kinev**, M.Yu. Levichev, A.I. El'kina, A.V. Antonov, A.V. Khudchenko, G.P. Nazarov, V.V. Kurin, V.P. Koshelets. Linewidth Measurements of a Large Niobium Josephson Junction Array // **IEEE Trans. Appl. Supercond.** – 2024. – Vol. 34, No. 3. – Art. no. 1100405. DOI: 10.1109/TASC.2024.3353139

A6. **N.V. Kinev**, K.I. Rudakov, L.V. Filippenko, V.P. Koshelets. Direct Experimental Observation of Harmonics of Josephson Generation in the Flux-Flow Oscillator // **IEEE Trans. Appl. Supercond.** – 2022. – Vol. 32, No. 4. – Art. no. 1500206. 2022. DOI: 10.1109/TASC.2022.3143483

A7. K.A. Baksheeva, R.V. Ozhegov, G.N. Goltsman, **N.V. Kinev**, V.P. Koshelets, A. Kochnev, N. Betzalel, A. Puzenko, P.B. Ishai, Yu. Feldman. The Sub-THz Emission of the Human Body Under Physiological Stress // **IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.** – 2021. – Vol. 11, No. 4. – P. 381-388. DOI: 10.1109/TTHZ.2021.3066099

A8. **N.V. Kinev**, K.I. Rudakov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. Terahertz Spectroscopy of Gas Absorption Using the Superconducting Flux-Flow Oscillator as an Active Source and the Superconducting Integrated Receiver // **Sensors** – 2020. – Vol. 20, No 24. – P. 7276. DOI: 10.3390/s20247267

A9. K. Baksheeva, A. Vdovydchenko, K. Gorshkov, R. Ozhegov, **N. Kinev**, V. Koshelets, G. Goltsman. Study of human skin radiation in the terahertz frequency range // **Journal of Physics: Conference Series** – 2019. – Vol. 1410. – No. 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/1410/1/012076

A10. **N.V. Kinev**, K.I. Rudakov, L.V. Filippenko, M.Yu. Fominskiy, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. A superconducting flux-flow oscillator of terahertz range // **Journal of Physics: Conference Series** – 2020. – Vol. 1559. – No. 01221. DOI: 10.1088/1742-6596/1559/1/012021

A11. **N.V. Kinev**, K.I. Rudakov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. Terahertz Source Radiating to Open Space Based on the Superconducting Flux-Flow Oscillator: Development and Characterization // **IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.** – 2019. – Vol. 9, No. 6. – P. 557-564. DOI: 10.1109/TTHZ.2019.2941401

A12. H. Zhang, R. Wieland, W. Chen, O. Kizilaslan, S. Ishida, C. Han, W.H. Tian, Z. Xu, Z. Qi, T. Qing, Y.Y. Lv, X.J. Zhou, **N. Kinev**, A.B. Ermakov, E. Dorsch, M. Ziegele, D. Koelle, H. Eisaki, Y. Yoshida, V.P. Koshelets, R. Kleiner, H.B. Wang, P.H. Wu. Resonant Cavity Modes in $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ Intrinsic Josephson Junction Stacks // **Phys. Rev. Applied** – 2019. – Vol. 11, No. 4. – Art. no. 044004. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.11.044004

A13. **N.V. Kinev**, K.I. Rudakov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. Flux-flow Josephson oscillator as the broadband tunable terahertz source to open space // **Journal of Applied Physics** – 2019. – Vol. 125, No. 15. – Art.no. 151603. DOI: 10.1063/1.5070143

A14. V.P. Koshelets, **N.V. Kinev**, A.B. Ermakov, F. Rudau, R. Wieland, D. Koelle, R. Kleiner, H.B. Wang. Spectral measurements of THz radiation emitted from intrinsic Josephson junction stacks // **EPJ Web of Conferences** – 2018. – Vol.195. – No. 05013. DOI: 10.1051/epjconf/201819505013

A15. **N.V. Kinev**, K.I. Rudakov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. Wideband Josephson THz flux-flow oscillator integrated with the slot lens antenna and the harmonic mixer // **EPJ Web of Conferences** – 2018. – Vol.195. – No. 02003. DOI: 10.1051/epjconf/201819502003

A16. **N.V. Kinev**, K.I. Rudakov, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. A 0.3-0.7 THz flux-flow oscillator integrated with the slot antenna and elliptical lens // **Journal of Physics: Conference Series** – 2018. – Vol. 1124. – No. 071001. DOI: 10.1088/1742-6596/1124/7/071001

A17. Y. Huang, H.C. Sun, D.Y. An, X.J. Zhou, M. Ji, F. Rudau, R. Wieland, J.S. Hampp, O. Kizilaslan, J. Yuan, **N. Kinev**, O. Kiselev, V.P. Koshelets, J. Li, D. Koelle, R. Kleiner, B.B. Jin, J. Chen, L. Kang, W.W. Xu, H.B. Wang, P. Wu. Self-Mixing Spectra of Terahertz Emitters Based on $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ Intrinsic Josephson-Junction Stacks // **Phys. Rev. Applied** – 2017. – Vol. 8, No. 5 – Art.no. 054023. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.8.054023

A18. H.C. Sun, Z. Yang, **N.V. Kinev**, O.S. Kiselev, Y.G. Lv, Ya Huang, L. Hao, X.J. Zhou, M. Ji, X.C. Tu, C.H. Zhang, J. Li, F. Rudau, R. Wieland, J.S. Hampp, O. Kizilaslan, D. Koelle, B.B. Jin, J. Chen, L. Kang, W. Xu, R. Kleiner, V.P. Koshelets, H.B. Wang, P. Wu. Terahertz Spectroscopy of Dilute Gases Using $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ Josephson-Junction Stacks // **Phys. Rev. Applied** – 2017. – Vol. 8, No. 5. – Art.no. 054005. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.8.054005

A19. O. Kizilaslan, F. Rudau, R. Wieland, J.S. Hampp, X.J. Zhou, M. Ji, O. Kiselev, **N. Kinev**, Y. Huang, L.Y. Hao, A. Ishii, T. Hatano, V.P. Koshelets, P.H. Wu, H.B. Wang, D. Koelle, R. Kleiner. Tuning THz emission properties of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ intrinsic Josephson junction stacks by charge carrier injection // **Supercond. Sci. Technol.** – 2017. – Vol. 30. – No. 034006. DOI: 10.1088/1361-6668/aa55ae

A20. E. Sobakinskaya, V.L. Vaks, **N. Kinev**, M. Ji, M.Y. Li, H.B. Wang, V.P. Koshelets. High-resolution terahertz spectroscopy with a noise radiation source based on high-T_c superconductors // **J. Phys. D: Appl. Phys.** – 2017. – Vol. 50, No. 3. – Art. no. 035305. DOI: 10.1088/1361-6463/50/3/035305

A21. **N.V. Kinev**, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, O.S. Kiselev, V.L. Vaks, E.G. Domracheva, V.P. Koshelets. Superconducting integrated terahertz receiver for spectral analysis of gas compounds // **Journal of Physics: Conference Series** – 2016. – Vol. 741. – No. 012169. DOI: 10.1088/1742-6596/741/1/012169

A22. F. Rudau, R. Wieland, J. Langer, X.J. Zhou, M. Ji, **N. Kinev**, L.Y. Hao, Y. Huang, J. Li, P.H. Wu, T. Hatano, V.P. Koshelets, H.B. Wang, D. Koelle, R. Kleiner. Three-Dimensional Simulations of the Electrothermal and Terahertz Emission Properties of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ Intrinsic Josephson Junction Stacks // **Phys. Rev. Applied** – 2016. – Vol.5, No. 4. – Art. no. 044017. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.5.044017

A23. X.J. Zhou, J. Yuan, H. Wu, Z.S. Gao, M. Ji, D.Y. An, Y. Huang, F. Rudau, R. Wieland, B. Gross, **N. Kinev**, J. Li, A. Ishii, T. Hatano, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, H.B. Wang, P. H. Wu. Tuning the Terahertz Emission Power of an Intrinsic Josephson-Junction Stack with a Focused Laser Beam // **Phys. Rev. Applied** – 2015. – Vol. 3, No. 4. – Art. no. 044012. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.3.044012

A24. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, M.I. Faley, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, **N.V. Kinev**, O.S. Kiselev, A.A. Artanov, K.I. Rudakov, A. Lange, G. Lange, V.L. Vaks, M. Y. Li, H.B. Wang. Superconducting Integrated Terahertz Spectrometers // **IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.** – 2015. – Vol.5, No.4. – P. 687-694. DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2443500

A25. B. Gross, F. Rudau, **N. Kinev**, M. Tsujimoto, J. Yuan, Y. Huang, M. Ji, X.J. Zhou, A. Iishi, P.H. Wu, T. Hatano, D. Koelle, H.B. Wang, V.P. Koshelets, R. Kleiner. Electrothermal behavior and terahertz emission properties of a planar array of two $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction stacks // **Supercond.**

Sci. Technol. – 2015. – Vol. 28. – No. 055004. DOI: 10.1088/0953-2048/28/5/055004

A26. F. Rudau, M. Tsujimoto, B. Gross, T. Judd, R. Wieland, E. Goldobin, **N. Kinev**, J. Yuan, Y. Huang, M. Ji, X.J. Zhou, A. Iishi, R.G. Mints, P.H. Wu, T. Hatano, H.B. Wang, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner. Thermal and electromagnetic properties of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ intrinsic Josephson junction stacks studied via one-dimensional coupled sine Gordon equations // **Phys. Rev. B** – 2015. – Vol. 91, No. 10. – Art. no. 104513. DOI: 10.1103/PhysRevB.91.104513

A27. L.Y. Hao, M. Ji, J. Yuan, D.Y. An, M.Y. Li, X.J. Zhou, Y. Huang, H.C. Sun, Q. Zhu, F. Rudau, R. Wieland, **N. Kinev**, J. Li, W.W. Xu, B.B. Jin, J. Chen, T. Hatano, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, H.B. Wang, P. H. Wu. Compact Superconducting Terahertz Source Operating in Liquid Nitrogen // **Phys. Rev. Applied** – 2015. – Vol. 3, No. 2. – Art. no. 024006. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.3.024006

A28. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, M.Yu. Fomisky, **N.V. Kinev**, O.S. Kiselev, A. de Lange, G. de Lange, K.E. Rudakov, M.Yu Torgashin, V.L. Vaks, J. Yuan H.B. Wang. Superconducting integrated terahertz receivers // **Journal of Physics: Conference Series** – 2014. – Vol. 486. – No. 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/486/1/012026

A29. M. Ji, J. Yuan, B. Gross, F. Rudau, D.Y. An, M.Y. Li, X.J. Zhou, Y. Huang, H.C. Sun, Q. Zhu, J. Li, **N. Kinev**, T. Hatano, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, W.W. Xu, B.B. Jin, H.B. Wang, P.H. Wu. $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction stacks with improved cooling: Coherent emission above 1 THz // **Appl. Phys. Lett.** – 2014. – Vol. 105, No. 12. – Art. no. 122602. DOI: 10.1063/1.4896684

A30. B. Gross, J. Yuan, D.Y. An, M.Y. Li, **N. Kinev**, X.J. Zhou, M. Ji, Y. Huang, T. Hatano, R.G. Mints, V.P. Koshelets, P.H. Wu, H.B. Wang, D. Koelle, R. Kleiner. Modeling the linewidth dependence of coherent terahertz emission from intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime // **Phys. Rev. B** – 2013. – Vol. 88, No. 1. – Art. no. 014524. DOI: 10.1103/PhysRevB.88.014524

A31. D.Y. An, J. Yuan, **N. Kinev**, M.Y. Li, Y. Huang, M. Ji, H. Zhang, Z.L. Sun, L. Kang, B.B. Jin, J. Chen, J. Li, B. Gross, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, V.P. Koshelets, D. Koelle, R. Kleiner, H.B. Wang, W.W. Xu, P.H. Wu. Terahertz emission and detection both based on high-T_c superconductors: Towards an integrated receiver // **Appl. Phys. Lett.** – 2013. – Vol. 102, No. 9. – Art. no. 092601. DOI: 10.1063/1.4794072

A32. M. Li, J. Yuan, **N. Kinev**, J. Li, B. Gross, S. Guenon, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, D. Koelle, R. Kleiner, V. P. Koshelets, H.B. Wang, Peiheng Wu. Linewidth dependence of coherent terahertz emission from $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$

intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime // **Phys. Rev. B** – 2012. – Vol. 86, No. 6. – Art. no. 060505(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.060505

Статьи в журналах из перечня ВАК и «Белого списка»

A33. **Кинев Н.В.,** Хан Ф.В., Котова Н.Н., Чекушкин А.М., Кошелец В.П. Тепловые эффекты в СИС-переходах и линиях передачи под воздействием ТГц излучения // Журнал технической физики – 2026. – Т. 96, № 9. – С. 1773–1781. DOI: 10.61011/JTF.2026.09.63495.206-26

A34. **Кинев Н.В.,** Хан Ф.В., Чекушкин А.М., Кошелец В.П. Нагрев смесителя сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник под воздействием внешнего терагерцового излучения // **Известия вузов. Радиофизика** – 2025. – Т. 68, № 9. – С. 808–823. DOI: 10.52452/00213462_2025_68_09_808

A35. Хан Ф.В., Филиппенко Л.В., Ермаков А.Б., **Кинев Н.В.**, Кошелец В.П. Сверхпроводниковые генераторы субтерагерцового диапазона частот на основе массивов джозефсоновских переходов // **Известия вузов. Радиофизика** – 2025. – Т. 68, № 9. – С. 723–732. DOI: 10.52452/00213462_2025_68_09_723

A36. **Кинев Н.В.**, Чекушкин А.М., Хан Ф.В., Рудаков К.И., Котова Н.Н., Кошелец В.П. Исследование сверхпроводящих линий передачи на основе NbTiN/Al и накачки СИС-переходов Nb/AlN/NbN в частотном диапазоне выше 1 THz // **Физика твёрдого тела** – 2024. – Т. 66, № 7. – С. 1032-1037. DOI: 10.61011/FTT.2024.07.58368.26НН

A37. **Кинев Н.В.**, Чекушкин А.М., Хан Ф.В., Рудаков К.И. Исследование сверхпроводниковых линий передачи и туннельных переходов для детектирования сигналов на частоте выше 1 ТГц // **Радиотехника и электроника** – 2023. – Т. 68, № 9. – С. 858–863. DOI: 10.31857/S0033849423090127

A38. **Кинев Н.В.**, Рудаков К.И., Филиппенко Л.В., Кошелец В.П. Исследование гармоник джозефсоновской генерации в распределённом туннельном переходе // **Известия вузов. Радиофизика** – 2022. – Т. 65, № 8. – С. 651-661. DOI: 10.52452/00213462_2022_65_08_651

A39. Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., **Кинев Н.В.**, Киселев О.С., Филиппенко Л.В., Фоминский М.Ю., Кошелец В.П. Сверхпроводящие структуры для исследования и фазовой синхронизации интегральных генераторов терагерцового диапазона // **Радиотехника и электроника** – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 410-416. DOI: 10.31857/S0033849421040033

A40. **Кинев Н.В.**, Рудаков К.И., Филиппенко Л.В., Кошелец В.П. Система терагерцевой спектроскопии газовых смесей на основе твердотельных сверхпроводниковых источника и приемника терагерцевого диапазона //

Физика твёрдого тела – 2021. – Т. 63, № 9. – С. 1204-1208. DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51239.03H

A41. **Кинев Н.В.**, Кошелец В.П. Исследование и сравнение лабораторных источников терагерцового излучения различных типов: на основе лампы обратной волны, полупроводникового умножителя СВЧ с высоким номером гармоники и распределенного джозефсоновского перехода // **Радиотехника и электроника** – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 266–278. DOI: 10.31857/S0033849421030116

A42. **Кинев Н.В**., Рудаков К.И., Филиппенко Л.В., Кошелец В.П., Барышев А.М. Источник терагерцового излучения в открытое пространство на основе распределенного джозефсоновского перехода // **Физика твёрдого тела** – 2020. – Т. 62, № 9. – С. 1379-1384. DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49757.02H

A43. **Кинев Н.В.**, Рудаков К.И., Филиппенко Л.В., Барышев А.М., Кошелец В.П. Антенно-фидерная система для сверхпроводникового джозефсоновского генератора терагерцового излучения с системой фазовой стабилизации // **Радиотехника и электроника** – 2019. – Т. 64, № 10. – С. 970–975. DOI: 10.1134/S0033849419090122

A44. **Кинев Н.В.**, Рудаков К.И., Барышев А.М., Кошелец В.П. Линзовая щелевая антенна на основе тонких плёнок Nb для джозефсоновского широкополосного генератора ТГц диапазона // **Физика твёрдого тела** – 2018. – Т.60, № 11. – С. 2132-2136. DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46652.03NN

A45. **Кинев Н.В.**, Дмитриев П.Н., Филиппенко Л.В., Киселев О.С., Домрачева Е.Г., Собакинская Е.А., Вакс В.Л., Ванг Х.Б., Кошелец В.П. Сверхпроводниковый интегральный приёмник: современные достижения и новые применения. // **Журнал радиоэлектроники** – 2017. – № 1. – С. 1-16.

A46. **Кинев Н.В.**, Филиппенко Л.В., Ли М.Ю., Юань Д., Ван Х.Б., Кошелец В.П. Спектральные характеристики генератора терагерцового излучения на основе меза-структуры $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ // **Известия вузов. Радиофизика** – 2013. – Т. 56, №8-9. – С. 647-656. DOI: 10.1007/s11141-014-9462-4

Коллективные монографии

A47. R.V. Ozhegov, K.N. Gorshkov, Yu B. Vachtomin, K.V. Smirnov, M.I. Finkel, G.N. Goltsman, O.S. Kiselev, **N.V. Kinev**, L.V. Filippenko, V.P. Koshelets. Terahertz Imaging System Based on Superconducting Heterodyne Integrated Receiver. – Chapter in the book **"THz and Security Applications. Detectors, Sources and Associated Electronics for THz Applications"**, ed. by. C. Corsi, F. Sizov. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2013. 292 p. ISBN 978-94-017-8827-4

A48. Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Фоминский М.Ю., **Кинев Н.В.**, Худченко А.В., Тарасов М.А., Юсупов Р.А., Чекушкин А.М., Ермаков А.Б., Гунбина А.А. Сверхпроводниковые приемники, детекторы и генераторы терагерцового диапазона. – Глава в коллективной монографии **«Терагерцовая фотоника»**. Москва: РАН, 2023. 712 с. ISBN 978-5-907645-40-0

Патенты РФ

A49. Вакс В.Л., Домрачева Е.Г., **Кинев Н.В.**, Кошелец В.П., Приползин С.И., Яблоков А.А. Способ спектроскопического анализа газовых смесей и спектрометр для его осуществления. Патент на изобретение № 2650354. Приоритет от 20.12.2016.

A50. Кошелец В.П., **Кинев Н.В.** Электрические контакты для сверхпроводникового интегрального приёмника. Патент на изобретение № 2511669. Приоритет 02.11.2012г.