

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ МАССИВОВ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДОВ

Ф. В. Хан^{1,2*}, Л. В. Филиппенко¹, А. Б. Ермаков¹, Н. В. Кинев¹, В. П. Кошелец¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва;

² Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

Для большинства практических приложений сверхпроводниковых генераторов требуется реализовать в одном устройстве терагерцовую генерацию с возможностью перестройки частоты в широком диапазоне и узкую линию излучения. До настоящего времени этого удалось достичь только для систем на основе распределённых джозефсоновских переходов. В статье дан краткий обзор основных достижений в области создания сверхпроводниковых интегральных генераторов и представлены результаты разработки нового типа генераторов на основе массивов джозефсоновских переходов, включённых в сверхпроводящую копланарную линию. Реализация нового типа включения джозефсоновских переходов позволила создать генератор с рабочими частотами до 700 ГГц, ограниченными только энергетической целью ниобия. Применение гармонического смесителя на основе туннельного перехода сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник позволило не только определить частотный диапазон работы генератора и оценить его мощность, но и измерить ширину линии его излучения на частотах до 700 ГГц в режиме частотной стабилизации и реализовать режим фазовой автоподстройки частоты. Обсуждается возможность разработки сверхпроводниковых генераторов терагерцового диапазона частот на основе массивов джозефсоновских переходов для интегральных приёмных систем в наземных и космических радиотелескопах.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка сверхчувствительных приёмных устройств терагерцового диапазона является одним из наиболее бурно и успешно развивающихся направлений сверхпроводниковой электроники; шумовая температура таких устройств приближается к квантовому пределу, а их рабочая частота f уже превзошла 1 ТГц. Смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник (СИС) [1–6] являются наиболее чувствительными входными элементами в гетеродинных приёмных устройствах; их шумовая температура в двухполосном (double sideband, DSB) режиме ограничена величиной $hf/(2k_B)$ [5], где h и k_B — постоянные Планка и Больцмана соответственно.

Для спектральных измерений в терагерцовом диапазоне частот используются гетеродинные приёмники, в которых принимаемый сигнал переносится вниз по частоте с сохранением фазы. Генератор гетеродина для такого типа приёмников должен обеспечивать непрерывную перестройку частоты во всём диапазоне работы СИС-смесителя и достаточную мощность для его накачки; при этом для большинства практических применений очень важны массогабаритные характеристики и энергопотребление генератора гетеродина. Для правильного переноса спектра сигнала на промежуточную частоту необходимо также высокое спектральное качество источника гетеродина и низкий уровень фазовых шумов. В настоящее время в большинстве СИС-приёмников [7–9] в качестве гетеродина используются полупроводниковые умножители частоты опорного синтезатора, работающего на частотах 20 ÷ 30 ГГц, дополненные усилителями мощности на частотах 100 ÷ 120 ГГц [10]. В результате мощность умноженного сигнала на выходе составляет 2 мВт

* valery@hitech.cplire.ru

на частоте 1 ТГц. Однако такие системы (и даже отдельные их элементы) в России недоступны; альтернативным вариантом представляется разработка сверхпроводникового генератора терагерцового диапазона частот.

Работы по созданию и исследованию генераторов субтерагерцового диапазона частот на основе сверхпроводниковых переходов начались сразу же после открытия эффекта Джозефсона. Было предложено множество вариантов использования того факта, что джозефсоновский переход представляет собой генератор, управляемый напряжением, частота которого определяется средним напряжением на контакте. Параметры одиночного перехода не позволяют получить достаточно мощное и узкополосное излучение, поэтому использовались цепочки и массивы, содержащие десятки и сотни джозефсоновских переходов [11–19]. Исследовались различные варианты расположения переходов в массиве: группами на расстояниях, равных половине длины волны излучения λ [12], и регулярное расположение переходов на расстоянии много меньше длины волны [17]. В первом случае спектр излучения ограничен геометрическими резонансами в линии; при этом удаётся получить генерацию излучения с мощностью до 160 мкВт на частоте 240 ГГц [15]. Синхронизации в этом случае достичь проще, т. к. все переходы расположены через $\lambda/2$ и оказываются в пучностях электромагнитной волны. В случае регулярного расположения переходов геометрические резонансы обусловлены размерами всего массива, поэтому резонансы становятся более частыми и менее добротными, что позволяет осуществлять перестройку частоты. В работе [19] были исследованы массивы из 9996 переходов Nb/NbSi/Nb; рабочие частоты таких массивов лежат в диапазоне 139–343 ГГц с возможностью перестройки частоты на отдельных ступенях. Синхронизация переходов в этом случае обеспечивается возбуждением мод в подложке; ширина линии генерации в лучших точках составляет менее 1 МГц.

Однако до недавнего времени реализовать в одном устройстве необходимые для практического использования характеристики (непрерывную генерацию с возможностью перестройки частоты в широком диапазоне и узкую линию излучения, с возможностью фазовой автоподстройки частоты) удалось только для систем на основе распределённых джозефсоновских переходов [6, 20, 21]. Такой переход представляет собой длинный туннельный СИС-переход (с длиной много больше, чем джозефсоновская глубина проникновения магнитного поля в контакт λ_J), в котором приложенное магнитное поле и ток смещения создают однонаправленный поток джозефсоновских вихрей, каждый из которых содержит один квант магнитного потока. Такой генератор является одним из наиболее изученных типов джозефсоновских генераторов [6, 22], однако точное описание его динамики возможно только в рамках микроскопической модели туннельного перехода [23]. Кроме того, форма вольт-амперной характеристики (ВАХ) распределённого джозефсоновского перехода меняется при термоциклированиях, поэтому предварительная настройка гетеродина даже при использовании автоматизированной системы требует не менее 30 с [22, 24].

Таким образом, разработка новых подходов к созданию многоэлементных массивов джозефсоновских переходов, способных работать на частотах до 700 ГГц, обеспечивая непрерывную перестройку частоты в широком диапазоне и возможность стабилизации частоты с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), всё ещё является актуальной задачей.

1. МАССИВЫ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДОВ

Данная статья посвящена исследованию сверхпроводниковых генераторов субтерагерцового диапазона на основе одномерных массивов туннельных СИС-переходов Nb-AlO_x-Nb, шунтированных тонкоплёночными резисторами. Особенностью предлагаемой конструкции является включение цепочки последовательно соединённых шунтированных переходов в центральный электрод копланарной линии. Синхронизация переходов в такой структуре осуществляется электромаг-

нитной волной, распространяющейся по копланарной линии. Использование именно копланарной линии обеспечивает существенное уменьшение влияния потерь в сверхпроводящих электродах на субтерагерцовых частотах по сравнению с распределёнными джозефсоновскими переходами за счёт иной конфигурации высокочастотных токов. Кроме того, на основе копланарной линии возможно реализовать генераторные структуры с малыми поверхностными потерями на частотах порядка 1 ТГц (для материалов с более высокими значениями критической температуры и целевого напряжения), а также использовать туннельные переходы с очень высокой плотностью тока.

Были созданы и исследованы массивы, содержащие 100, 200, 350 и 600 джозефсоновских переходов [25] с плотностями туннельного тока 5, 13 и 20 кА/см²; измерения мощности проводились с помощью интегрального СИС-детектора, изготовленного на той же подложке. Уже в первых экспериментах была реализована перестройка частоты генератора до 700 ГГц. Продемонстрировано, что с увеличением количества переходов N в массиве максимальная мощность генерации возрастает быстрее, чем N ; по-видимому, это обусловлено тем фактом, что в больших цепочках синхронизируется большее число джозефсоновских переходов. Изрезанность частотных зависимостей уровня накачки, наблюдаемая в первой реализации экспериментальных структур, скорее всего, связана с возникновением стоячих волн в линии и захватом частоты в соответствующих рабочих точках. В образцах с 350 переходами изрезанность выражена наиболее ярко из-за большей мощности генерации и, соответственно, большей эффективности захвата частоты.

Неоптимальная конструкция линии подключения массива по постоянному току в первых сериях образцов приводила к оттоку мощности в линию подключения, что обуславливает провал на частотах вблизи 500 ГГц [25]. С целью исправления обозначенных выше проблем были спроектированы новые серии образцов. Топология одного из образцов с массивом из 200 переходов показана на рис. 1а. Переходы в массиве, как и ранее, соединены последовательно и встроены в центральный электрод копланарной линии. Каждый переход шунтирован тонкоплёночным резистором из молибдена для обеспечения безгистерезисного хода ВАХ массива. Увеличенное изображение переходов в массиве показано на рис. 1б.

Как было отмечено ранее, изрезанность частотной зависимости мощности выходного сигнала массива в предыдущих сериях образцов может быть обусловлена возникновением стоячих волн на всей длине массива. С целью обеспечения возможности непрерывной перестройки частоты к обратному концу массива в новой серии присоединена согласованная нагрузка. Она представляет собой плавный переход от копланарной линии к микрополосковой, верхний электрод которой изготовлен из нормального металла (молибдена). Частотная зависимость коэффициента отражения S_{11} от нагрузки, расположенной на конце массива, показана на рис. 2. Согласованная нагрузка на неизлучающем конце массива позволяет добиться уровня отражения до -7 дБ. Результаты измерения частотной зависимости мощности выходного сигнала массива с согласованной нагрузкой из нормального материала приведены ниже.

2. ИЗМЕРЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

На рис. 3 показана ВАХ массива с согласованной нагрузкой. В области малых напряжений наблюдаются ступени, связанные с резонансами на всей длине массива и петли гистерезиса (см. вставку к рис. 3). С увеличением напряжения на массиве изрезанность уменьшается, что может быть связано с большим коэффициентом затухания волны, распространяющейся по копланарной линии.

Сигнал, генерируемый массивом, регистрируется при помощи детектора на основе одиночного туннельного перехода, подключённого к генератору через согласующую интегральную структуру

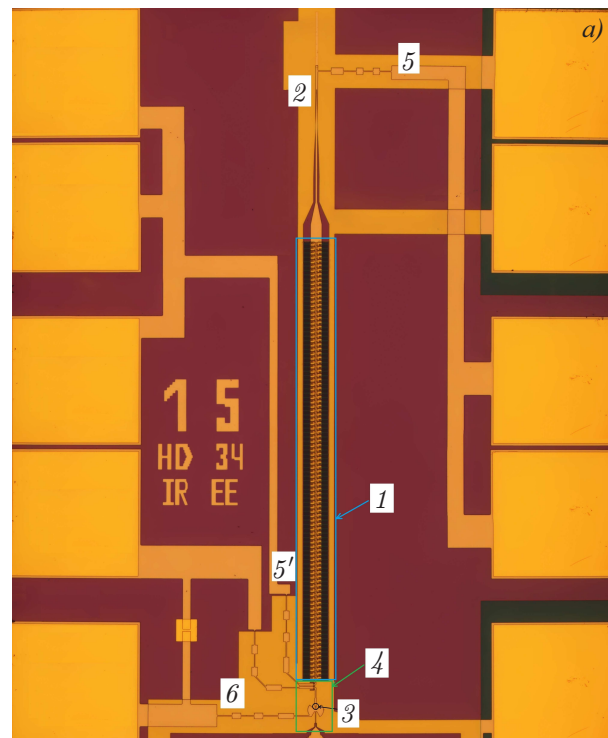
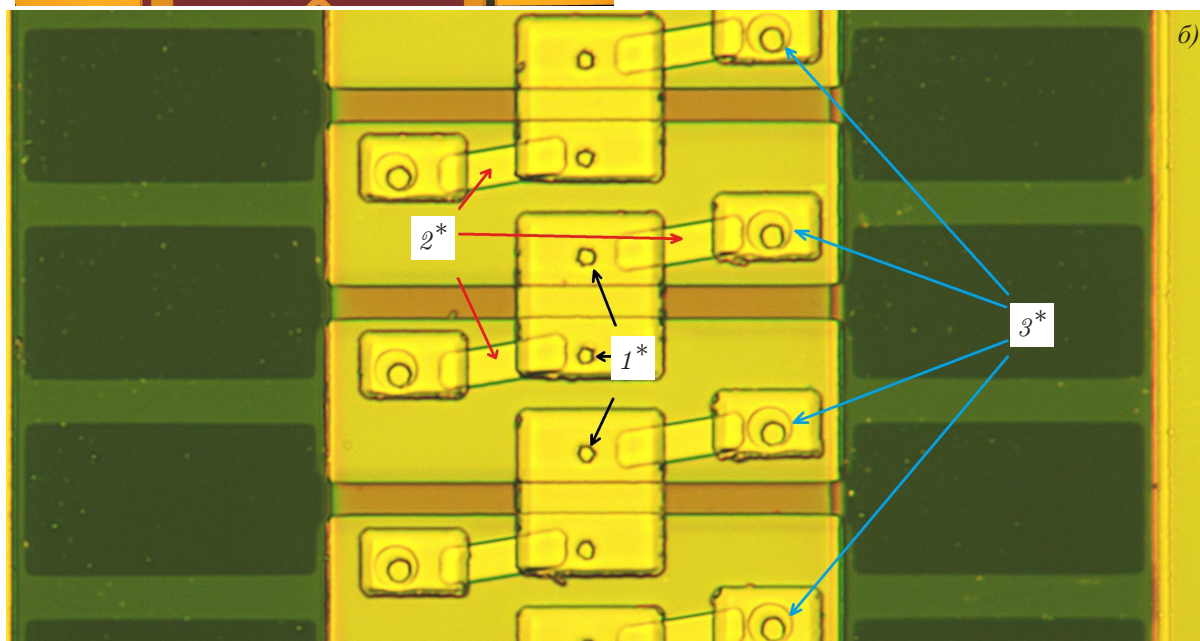


Рис. 1. (а) Изображение одного из исследуемых образцов: 1 — массив из 200 джозефсоновских переходов, 2 — согласованная нагрузка для устранения стоячих волн, 3 — гармонический СИС-смеситель, 4 — схема согласования СИС-смесителя с массивом, 5 и 5' — линии подключения питания массива по постоянному току, 6 — линия задания магнитного поля для управления критическим током СИС-смесителя. (б) Увеличенное изображение переходов в массиве: 1* — туннельные СИС-переходы, 2* — шунты из нормального металла, 3* — контакт между верхним и нижним сверхпроводящими слоями



(см. рис. 1а). Под действием излучения квазичастицы туннелируют через барьер (эффект стимулированного излучением туннелирования, *photon assisted tunneling* [1, 3]), что приводит к появлению квазичастичных ступеней на ВАХ СИС-перехода (см. рис. 4) на напряжениях, отстоящих от щелевого напряжения V_g на величину hf/e (3'' на рис. 4а), где e — элементарный заряд.

Вольт-амперные характеристики СИС-детектора при воздействии излучения массива на трёх частотах показаны на рис. 4. На рис. 4а критический ток СИС-детектора подавлен внешним магнитным полем. Штриховыми и штрихпунктирными кривыми поверх экспериментальных точек показаны теоретические ВАХ, рассчитанные при помощи выражений модели Такера—Фелдмана

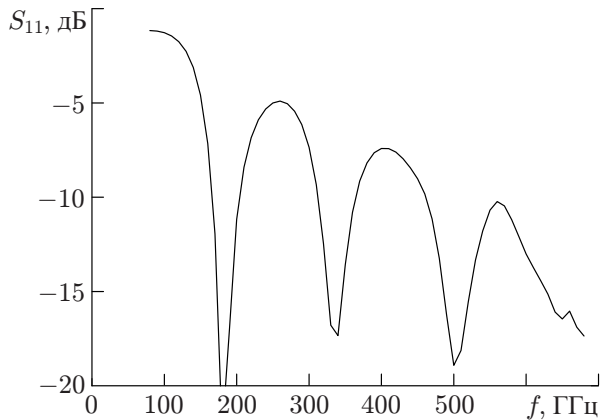


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента S_{11} при отражении волны от конца массива с согласованной нагрузкой, рассчитанная в Ansys HFSS

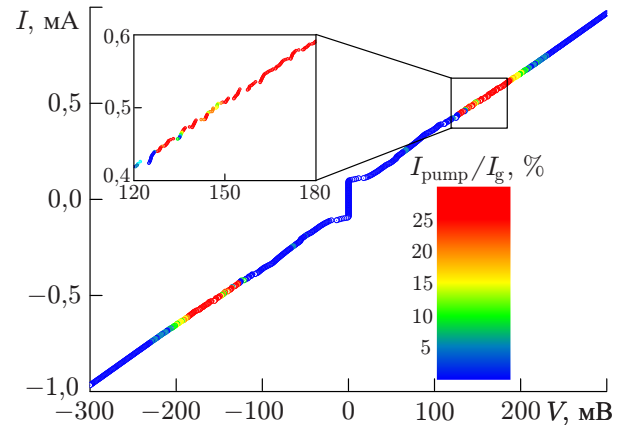


Рис. 3. ВАХ массива из 200 шунтированных джозефсоновских переходов Nb-AlO_x-Nb. Цветом показан ток накачки гармонического смесителя. В областях, отмеченных красным цветом, ток накачки I_{pump} превышает 25 % от скачка тока на щели I_g ; соответствующей мощности массива достаточно как для реализации режима ФАПЧ, так и для гетеродинирования

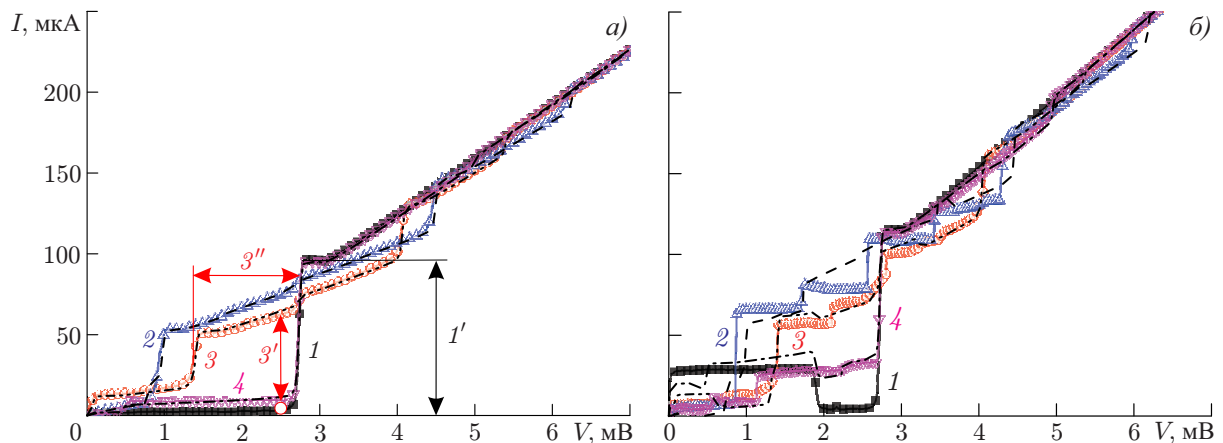


Рис. 4. ВАХ СИС-смесителя при воздействии сигнала от массива — кривые 2 (430 ГГц), 3 (330 ГГц), 4 (550 ГГц) — и автономные ВАХ (кривые 1) при полном (а) и частичном (б) подавлении критического тока магнитным полем; 1' — скачок тока на щели I_g ; 3' — ток накачки I_{pump} в рабочей точке (обозначен кружком около нижнего конца стрелки); 3'' — энергия кванта hf/e . Экспериментальные данные показаны цветными маркерами такого же цвета, как и номер соответствующей кривой. Штриховыми и штрихпунктирными кривыми чёрного цвета поверх экспериментальных точек показаны расчётные ВАХ, полученные по формулам из модели Такера—Фелдмана

[1] из автономной ВАХ детектора при воздействии излучения на соответствующих частотах. Вертикальные участки на рассчитанных ВАХ с накачкой на рис. 4б обусловлены наличием критического тока на автономной ВАХ, а на экспериментальных — ступенями Шапиро. Значения мощности излучения, дошедшего до СИС-детектора, оценивались путём аппроксимации экспериментальных ВАХ кривыми, рассчитанными по формулам Такера—Фелдмана. Для кривых на рис. 4а мощность на частотах 330, 430 и 550 ГГц составляет 0,12; 0,22 и 0,02 мкВт соответственно. Мощности накачки для трёх частот на рис. 4б составили 0,09; 0,3 и 0,07 мкВт.

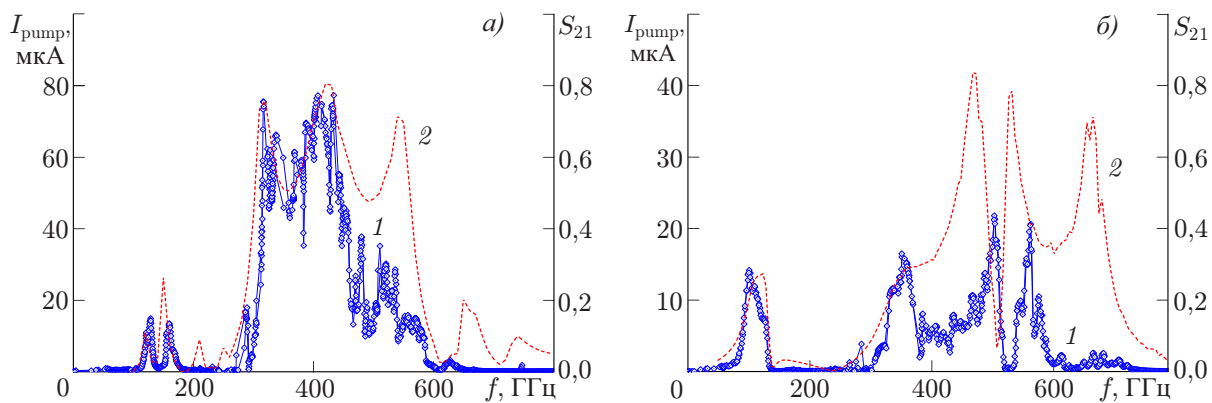


Рис. 5. Зависимость тока накачки от частоты для массива с согласованной нагрузкой (а) и без неё (б): 1 — экспериментальная зависимость тока накачки СИС-смесителя от частоты генерации массива (левая шкала); 2 — рассчитанная в Ansys HFSS характеристика схемы согласования (правая шкала)

Изменение туннельного тока под действием приходящего излучения при напряжении немного ниже V_g принято называть током накачки I_{pump} (3' на рис. 4а). На рис. 3 цветом представлен ток накачки СИС-детектора, измеренный при напряжении на СИС-переходе 2,5 мВ и нормированный на скачок тока на щели I_g СИС-перехода (1' на рис. 4а).

На рис. 5а кривой 1 показана зависимость тока накачки СИС-смесителя (по левой вертикальной оси) от частоты генерации массива, пересчитанной из напряжения по формуле Джозефсона. Для сравнения по правой оси штриховой кривой 2 показана зависимость коэффициента S_{21} схемы согласования от частоты, рассчитанная в Ansys HFSS; данная схема была спроектирована для работы в диапазоне 300÷550 ГГц. Методика расчёта сверхпроводниковых согласующих структур, а также постановка портов и задания граничных условий подробно описана в [26]; следует отметить, что вариации коэффициента отражения от нагрузки (см. рис. 2) не были учтены при расчёте. На частотах до 500 ГГц экспериментальная зависимость тока накачки от частоты определяется схемой согласования. При этом уровень накачки СИС-детектора более 10 % реализуется в полосе 300÷575 ГГц (62 % от центральной частоты), а уровень накачки 50 % (3 дБ) — в полосе 305÷460 ГГц (более 40 % от центральной частоты). Расхождение с расчётом на частотах более 500 ГГц частично обусловлено тем фактом, что коэффициент затухания в копланарной линии, в которую встроен массив, резко увеличивается вследствие излучения в подложку и мощности сигнала, распространяющегося по линии, становится недостаточно для синхронизации всех переходов. На рис. 5б показана аналогичная зависимость тока накачки от частоты для образца из предыдущей серии, в которой на обратном конце массива не было согласованной нагрузки. При этом плотность туннельного тока и площади переходов практически не отличаются. Из рис. 5б можно заключить, что регистрируемая детектором мощность и ширина полосы эффективной накачки СИС-детектора генератором оказываются существенно меньше для случая массива без согласованной нагрузки.

Таким образом, согласованная нагрузка на неизлучающем краю массива позволяет реализовать широкий диапазон перестройки частоты генератора (более 40 % по уровню 3 дБ), при этом вариации уровня мощности не превышают 1÷2 дБ, что делает возможным использование таких генераторов в интегральных приёмных системах терагерцового диапазона частот. Важно отметить высокую стабильность и воспроизводимость уровня мощности на любой частоте, что делает возможным быструю перестройку частоты и проведение измерений без дополнительной настройки.

3. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СВОЙСТВА, ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ ЛИНИИ, РЕЖИМ ФАПЧ

Интегральную структуру с СИС-переходом, которая применялась для измерения уровня накачки и оценки мощности массива на различных частотах, можно использовать не только для детектирования сигнала, но и для измерения спектров излучения массива, а также для стабилизации его частоты [27–29]. При этом туннельный СИС-переход используется как гармонический смеситель с высоким номером гармоники [30]. Сигнал от опорного синтезатора f_{synth} с частотой порядка 20 ГГц через направленный ответвитель подаётся на СИС-переход, в котором n -ая гармоника сигнала синтезатора смешивается с сигналом с частотой f_{arr} , излучаемым массивом. Разностный сигнал на промежуточной частоте $f_{\text{IF}} = \pm(f_{\text{arr}} - nf_{\text{synth}}) \sim 1$ ГГц подаётся на криогенный усилитель на основе транзистора с высокой подвижностью электронов (шумовая температура приблизительно 5 К, усиление 30 дБ), выводится из криостата и попадает на дополнительный усилитель (регулируемое усиление 40÷60 дБ). Далее одна часть преобразованного сигнала подаётся на спектроанализатор для записи спектров, а другая — на систему ФАПЧ с дополнительным частотным детектором. Частотный детектор с полосой регулирования порядка 10 кГц стабилизирует частоту, устраняя низкочастотные наводки и дрейфы температуры (см. рис. 6).

На рис. 6 показана зависимость мощности выходного сигнала промежуточной частоты P_{IF} от частоты; видна автономная линия излучения массива на основе 200 шунтированных туннельных переходов Nb-AlO_x-Nb, её ширина равна $\delta f = 3,2$ МГц, отношение сигнал/шум 27 дБ. При использовании системы ФАПЧ проходящий сигнал сравнивается с опорным сигналом частоты 400 МГц от синтезатора, сигнал фазовой ошибки подаётся на массив для стабилизации его частоты. Результат представлен на рис. 6 сплошной кривой; отношение мощности сигнала в центральном пике к полной мощности в полосе наблюдения, называемое спектральным качеством, составляет 80 %. Полоса регулирования системы ФАПЧ — около 17 МГц, она определяется длиной кабелей от гармонического смесителя до системы ФАПЧ и обратно, к массиву переходов в криостате.

Отметим, что используемая методика позволяет проводить измерения спектра излучения генератора и обеспечивать режим ФАПЧ даже при небольшом уровне мощности сигнала, достигающего до гармонического смесителя. В работе [27] было показано, что предельное значение спектрального качества (определяемого параметрами линии излучения сверхпроводникового генератора) может быть реализовано даже при малой мощности проходящего сигнала, которая вызывает лишь небольшой ток накачки гармонического смесителя (5 % от скачка тока на щели СИС-смесителя). Кроме того, в СИС-переходе сосуществуют два режима преобразования: квазичастичный режим, основанный на эффекте стимулированного туннелирования электронов под действием фотонов, и джозефсоновский, с использованием нелинейности сверхпроводящего тока, при котором можно получить меньшие потери преобразования, но при большем уровне шумов. Исследование и сравнение этих двух режимов в [30] показало, что при работе в режи-

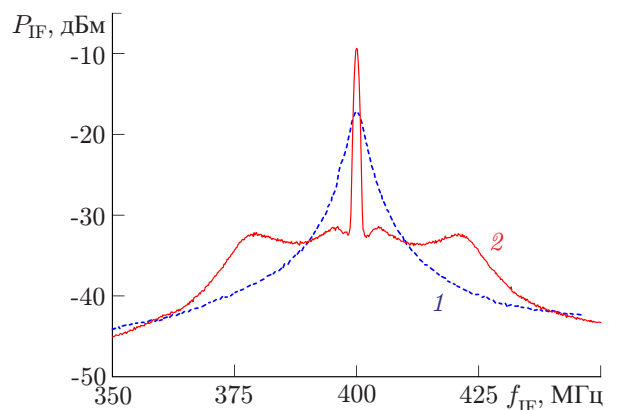


Рис. 6. Преобразованный вниз по частоте спектр сигнала массива на частоте 488 ГГц; 1 — автономная линия генерации (ширина линии генерации 3,2 МГц, отношение сигнал/шум 27 дБ), 2 — спектр с включённой системой ФАПЧ (спектральное качество 80 %)

ме джозефсоновского смесителя с высоким номером гармоники возможно реализовать отношение сигнал/шум, сравнимое с получаемым в традиционном квазичастичном режиме, при этом выходной сигнал джозефсоновского смесителя на $1 \div 2$ порядка превосходит сигнал в квазичастичном режиме, что важно для эффективной работы системы ФАПЧ.

Ширина линии генерации в большей части рабочего диапазона была существенно меньше 10 МГц, что позволяло реализовывать режим ФАПЧ, необходимый для проведения спектральных измерений с помощью интегрального приёмника с генератором на массиве шунтированных переходов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена и реализована новая конструкция интегрального сверхпроводникового генератора субтерагерцового излучения на основе массивов джозефсоновских переходов, включённых в сверхпроводящую копланарную линию. Реализация нового типа включения джозефсоновских переходов, а также использование согласованной нагрузки на неизлучающем краю массива позволили разработать генератор с рабочими частотами до 700 ГГц и возможностью плавной перестройки частоты при небольших вариациях мощности генерации, выделяемой в нагрузке. Применение интегральных согласующих структур на основе СИС-перехода дало возможность оценить мощность излучения на различных частотах, измерить спектр излучения такого генератора и реализовать режим ФАПЧ. Создаваемые интегральные генераторы представляются перспективными для интегральных приёмных систем наземных и космических радиотелескопов субтерагерцового диапазона.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение 075-15-2024-538). Изготовление образцов выполнено с использованием уникальной научной установки «Криоинтеграл» (УНУ 352529) ИРЭ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tucker J. R., Feldman M. J. // *Rev. Mod. Phys.* 1985. V. 57, No. 4. P. 1055–1113. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.57.1055>
2. Zmuidzinas J., Richards P. L. // *Proc. IEEE*. 2004. V. 92, No. 10. P. 1597–1616. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.833670>
3. Tucker J. R. // *IEEE J. Quantum Electron.* 1979. V. 15, No. 11, P. 1234–1258. <https://doi.org/10.1109/JQE.1979.1069931>
4. Richards P. L., Shen T. M., Harris R. E., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1979. V. 34. P. 345–347. <https://doi.org/10.1063/1.90782>
5. Kerr A. R., Feldman M. J., Pan S. K. // *Proc. 8th Int. Symposium on Space Terahertz Technology*. 25–27 March 1997, Cambridge, USA. P. 101–111.
6. Филиппенко Л. В., Чекушкин А. М., Фоминский М. Ю. и др. // *Успехи физ. наук*. 2024. Т. 194, № 11. С. 1207–1222. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.07.039726>
7. <https://www.almaobservatory.org/en/about-alma/>
8. De Graauw T., Helmich F. P., Phillips T. G., et al. // *Astron. Astrophys.* 2010. V. 518. Art. no L6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014698>
9. <http://millimetron.ru/index.php/en/>
10. Siles J. V., Cooper K. B., Lee C., et al. // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2018. V. 8, No. 6. P. 596–604. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2018.2876620>

11. Jain A. K., Likharev K. K., Lukens J. E., et al. // Phys. Rep. 1984. V. 109, No. 6. P. 310–426. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(84\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(84)90002-4)
12. Barbara P., Cawthorne A. B., Shitov S. V., et al. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82, No. 9. P. 1963–1966. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.82.1963>
13. Darula M., Doderer T., Beuven S. // Supercond. Sci. Tech. 1999. V. 12, No. 1. P. R1–R25. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/12/1/001>
14. Galin M. A., Kurin V. V., Shereshevsky I. A., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2021. V. 31, No. 5. Art. no. 1500905. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3064533>
15. Booi P. A. A., Benz S. P. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68, No. 26. P. 3799–3801. <https://doi.org/10.1063/1.116621>
16. Kawakami A., Uzawa Y., Wang Z. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. V. 9, No. 2. P. 4554–4557. <https://doi.org/10.1109/77.784039>
17. Bi B., Han S., Lukens J. E., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1993. V. 3, No. 1. P. 2303–2306. <https://doi.org/10.1109/77.233544>
18. Booi P. A. A., Benz S. P. // Appl. Phys. Lett., 1994. V. 64, No. 16. P. 2163–2165. <https://doi.org/10.1063/1.111984>
19. Galin M. A., Kinev N. V., Levichev M. Yu., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2024. V. 34, No. 3. Art. no. 1100405. <https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3337197>
20. Koshelets V. P., Birk M., Boersma D., et al. // Fundamentals of Superconducting Nanoelectronics / ed. by A. Sidorenko. Berlin : Springer, 2011. P. 263–296. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20158-5_10
21. Dmitriev P. N., Filippenko L. V., Koshelets V. P. // Josephson Junctions. History, Devices, and Applications / ed. by E. L. Wolf, G. B. Arnold, M. A. Gurvitch, J. F. Zasadzinski. Singapore : Pan Stanford Publishing, 2017. P. 185–244. <https://doi.org/10.1201/9781315364520-7>
22. Koshelets V. P., Dmitriev P. N., Faley M. I., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. V. 5, No. 4. P. 687–694. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2015.2443500>
23. Gulevich D. R., Koshelets V. P., Kusmartsev F. V. // Phys. Rev. B. 2017. V. 96, No. 2. Art. no. 024515. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.024515>
24. De Lange G., Birk M., Boersma D., et al. // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 23, No. 4. Art. no. 045016. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/23/4/045016>
25. Хан Ф. В., Филиппенко Л. В., Ермаков А. Б. и др. // Успехи физ. наук. 2025. Т. 195, № 6. С. 621–634. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.12.039864>
26. Хан Ф. В., Атепалихин А. А., Филиппенко Л. В. и др. // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68, № 10. С. 1003–1007. <https://doi.org/10.31857/S0033849423100066>
27. Дмитриев П. Н., Ермаков А. Б., Кинев Н. В. и др. // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 4. С. 410–416. <https://doi.org/10.31857/S0033849421040033>
28. Koshelets V. P., Shitov S. V., Shchukin A. V., et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69, No. 5. P. 699–701. <https://doi.org/10.1063/1.117811>
29. Koshelets V. P., Shitov S. V., Filippenko L. V., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71, No. 1. P. 289–293. <https://doi.org/10.1063/1.1150195>
30. Kalashnikov K. V., Artanov A. A., de Lange G., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2018. V. 28, No. 4. Art. no. 2400105. <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2803043>

Поступила в редакцию 15 мая 2025 г.; принята в печать 6 августа 2025 г.

SUPERCONDUCTING SUBTERAHERTZ OSCILLATORS BASED ON JOSEPHSON JUNCTION ARRAYS

F. V. Khan, L. V. Filippenko, A. B. Ermakov, N. V. Kinev, and V. P. Koshelets

For most practical applications of superconducting oscillators, it is necessary to implement terahertz generation with the ability to tune the frequency in a wide range and a narrow emission line in a single device. Until now, this has been achieved only for systems based on long Josephson junctions. This paper gives a brief overview of the main achievements in the field of creating superconducting integrated oscillators and present the results of developing a new type of oscillators based on arrays of Josephson junctions included in a superconducting coplanar line. The implementation of a new type of Josephson junctions array allowed creating an oscillator with operating frequencies of up to 700 GHz, limited only by the energy gap of niobium. The use of a superconducting harmonic mixer based on a tunnel superconductor—insulator—superconductor junction made it possible not only to determine the operating frequency range of the oscillator and estimate its power, but also to measure the radiation linewidth of a superconducting oscillator at frequencies of up to 700 GHz in the frequency-lock mode and to implement the phase-locked loop (PLL). The possibility of developing superconducting terahertz-range oscillators for integrated receiving systems of ground-based and space radio telescopes is discussed.