

Российская Академия Наук
Отделение Физических Наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и
электроники им.В.А.Котельникова Российской академии наук
(ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН)

УДК: 537.312.62; 621.385.6
ВГК ОКП 668420
№ госрегистрации 01201176434
Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
директор ИРЭ
им.В.А.Котельникова РАН
академик РАН

Ю.В. Гуляев
5 апреля 2013 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации
и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии

по теме

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ИСПЫТАНИЯ, ОБОБЩЕНИЕ И ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ
ИССЛЕДОВАНИЙ
(заключительный)

Шифр 2011-1.9-519-005-083

Государственный контракт от 18 августа 2011 г. № 11.519.11.4005

Зав. лабораторией

подпись, дата В.Н.Губанков

Руководитель НИР

подпись, дата В.Н.Губанков

Москва 2013 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, д.ф.-м.н., зав. отделом	_____	В. Н.Губанков (Введение, Заключение)
	подпись, дата	
Исполнители темы:		
с.н.с, д.ф.-м.н.	_____	Ю.Я. Дивин (Введение, Раздел 1)
	подпись, дата	
г.н.с, д.ф.-м.н.	_____	М.Ю. Куприянов (Введение, Раздел 1)
	подпись, дата	
в.н.с, д.ф.-м.н.	_____	И.А. Девятов (Раздел 2)
	подпись, дата	
с.н.с, д.т.н.	_____	И.М. Котелянский (Раздел 4)
	подпись, дата	
с.н.с., к.т.н.	_____	В.А.Шахунов (Раздел 3, Приложение А)
	подпись, дата	
с.н.с.	_____	Н.М.Марголин (Заключение, Приложение А)
	подпись, дата	
с.н.с. к.ф.-м.н.	_____	А.В. Семенов (Раздел 1)
	подпись, дата	
н.с., к.ф.-м.н.	_____	М.В.Лятти (Раздел 6)
	подпись, дата	

н.с.	_____	В.В.Павловский (Раздел 5)
	подпись, дата	
н.с.	_____	О.Ю.Волков (Раздел 5)
	подпись, дата	
Инженер	_____	И.И.Гундарева (Раздел 6)
	подпись, дата	
Лаборант	_____	А.В. Бурмистрова (Раздел 1)
	подпись, дата	
Лаборант	_____	С.В. Бакурский (Раздел 1)
	подпись, дата	
Нормоконтролер	_____	А.В. Снежко
	подпись, дата	

РЕФЕРАТ

Отчет 100 страниц, 1 часть, 1 приложение, 33 рисунка, 8 таблиц, 52 источника.

СЛАБАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ, ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА, НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ, ТОНКИЕ БИКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ, ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, СУБТЕРАГЕРЦОВЫЙ И ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ЧАСТОТНЫЕ ДИАПАЗОНЫ.

Объектом исследования является метод анализа зависящих от частоты характеристик электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации в терагерцовой области частот.

Цель работы - стимулирование развития международных интеграционных процессов в науке и содействие формированию устойчивых кооперационных связей российских и иностранных научно-исследовательских организаций и университетов, направленных на создание технологий, соответствующих мировому уровню, либо превосходящих его, получение международных патентов и привлечение молодых ученых и специалистов к исследованиям в рамках международной кооперации с научно-исследовательскими организациями стран Европейского Союза, выполнение международных обязательств Российской Федерации по развитию научно-технического сотрудничества со странами Европейского Союза.

В работе исследуется возможность применения джозефсоновской терагерцовой спектроскопии для анализа характеристик элементов терагерцовой электроники, систем телекоммуникации и обработки информации.

Методология, используемая в работе, основана на изменении статических характеристик сверхпроводящего джозефсоновского перехода из высокотемпературного сверхпроводника под влиянием его электромагнитного окружения.

В ходе работы были получены следующие результаты:

- проведены исследовательские испытания макета терагерцового джозефсоновского анализатора цепей в соответствии с Программой исследовательских испытаний, которые показали соответствие параметров макета Техническому заданию, но выявили ряд конструктивных недостатков, которые рекомендовано было устранить;
- произведена доработка макета терагерцового анализатора цепей в соответствии с замечаниями, сделанными в процессе испытаний, в том числе:

- доработано программное обеспечение в части задания параметров температурного контроллера LS331 с помощью интерфейса пользователя;
- изменена конструкция подводящих контактов к активному элементу в части обеспечения компенсации изменения размеров активного элемента при тепловом расширении;
- изменена конструкция усилителя переменного сигнала в части понижения шумов до $1 \text{ нВ/Гц}^{0.5}$
- доработано программное обеспечение в части автоматического определения действительной и мнимой частей адмиттанса исследуемого объекта после сканирования.
- проведено обобщение и оценка результатов работы, в частности, представлены результаты восстановления частотных характеристик ряда пассивных электромагнитных структур в диапазоне частот от 64 до 1130 ГГц;
- выработаны предложения и рекомендации по внедрению разработанного метода для оптимизации быстродействующих микроэлектронных и волноводных устройств терагерцового диапазона частот;
- составлен проект Технического задания на проведение ОКР «Разработка терагерцового джозефсоновского анализатора цепей»;
- проведены эксперименты по использованию джозефсоновской спектроскопии для исследования параметров волноводов терагерцового диапазона: частот (работа выполнена с участием иностранного партнёра)

Как показали исследования научно-технических источников по данному направлению и состоянию рынка коммерческих анализаторов цепей, полученные результаты превосходят результаты, получаемые с помощью имеющихся на рынке или опубликованных в печати аналогов по совокупности параметров, включающих размер исследуемых элементов, полосу перестройки по частоте, быстродействие. Кроме того, разработанный метод применим для исследования объектов при низких температурах, что является актуальным при разработке охлаждаемых приёмников электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот.

Разработанная методика продемонстрировала следующие конструктивные характеристики:

- возможность измерения “на кристалле” зависимости Y -параметров пассивной электромагнитной структуры от частоты и определения параметров эквивалентной схемы электромагнитной структуры;
- диапазон частот от 64 до 1130 ГГц;
- разрешение по частоте не хуже 0.95 ГГц;
- осуществление сканирование по частоте во всём диапазоне электронным образом, без использования механической перестройки внешних резонаторов и волноводных трактов.

Внедрение разработанной методики предполагается после выполнения опытно-конструкторской работы, проект технического задания на которую был разработан.

Область применения разработанной методики включает в себя измерение частотных характеристик антенн, планарных волноводов и резонаторов субтерагерцового и терагерцового диапазонов частот, соединительных и передающих элементов терагерцовой электроники. Методика может быть применима при разработке приёмников терагерцового излучения, в частности, для систем пассивной регистрации изображений, а также при разработке микросхем, работающих при частотах свыше 100 ГГц.

Экономическая эффективность может быть достигнута при серийном выпуске устройств на основе разработанной методики. Проведённые оценки показали, что стоимость таких устройств может быть в 10 раз ниже, чем стоимость предлагаемых в настоящее время на рынке аналогов.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	12
1 Проведение исследовательских испытаний макета терагерцового джозефсоновского анализатора цепей в соответствии с Программой исследовательских испытаний.....	17
1.1 Подготовка изделия к испытанию.....	17
1.1.1 Предварительная подготовка.....	17
1.1.2 Проверка калибровочных данных измерителя температуры калиброванного диода LakeShore DT-470-SD-13-1.....	17
1.1.3 Проверка всех измерительных цепей с использованием омического эквивалента джозефсоновского перехода.....	17
1.1.4 Проверка процесса установления рабочей температуры с использованием нагревателя и термоконтроллера Lakeshore LS331.....	19
1.1.5 Проверка программы управления процессом измерений и сбора данных для макета джозефсоновского анализатора цепей.....	20
1.2 Проверка на соответствие комплектности и оценка качества конструкторской документации.....	20
1.3 Проверка соответствия макета джозефсоновского анализатора цепей его спецификации и общей схеме.....	21
1.4 Проверка минимального размера исследуемого объекта.....	22
1.5 Проверка нижней рабочей частоты.....	23
1.6 Проверка верхней рабочей частоты.....	25
1.7 Проверка разрешения по частоте.....	26
1.8 Проверка времени сканирования частотного диапазона.....	27
1.9 Заключение.....	28
2 Доработка макета терагерцового джозефсоновского анализатора цепей по результатам экспериментальных исследований.....	31
2.1 Доработка программного обеспечения в части задания параметров температурного контроллера LS331 с помощью интерфейса пользователя.....	31
2.2 Определение значений характеристического напряжения и сопротивления в нормальном состоянии джозефсоновских переходов.....	34
2.3 Изменение конструкции подводящих контактов к активному элементу в части обеспечения компенсации изменения размеров активного элемента при тепловом расширении.....	35
2.4 Изменение конструкции усилителя переменного сигнала в части понижения шумов до $1 \text{ нВ/Гц}^{0.5}$	36

2.5	Доработка эскизной конструкторской документации	38
2.6	Доработка программного обеспечения в части автоматического определения действительной и мнимой частей адмиттанса исследуемого объекта после сканирования.	39
3	Обобщение и оценка результатов.....	41
3.1	Введение	41
3.2	Разработка теоретических основ метода.....	41
3.2.1	Анализ текущего состояния проблемы и обоснование выбранных методов и средств	41
3.2.2	Выбор типа и определение оптимальных условий работы активного элемента	43
3.2.3	Компьютерная программа для моделирования джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения и восстановления схемных параметров электромагнитного окружения	45
3.2.4	Проведение математического моделирования характеристик джозефсоновского перехода с подключенной к нему электромагнитной структурой.	45
3.2.5	Основные параметры и характеристики джозефсоновского анализатора цепей.....	46
3.3	Разработка технологии изготовления чувствительных элементов джозефсоновского анализатора цепей на основе бикристаллических джозефсоновских переходов из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	47
3.3.1	Изготовление бикристаллических подложек.....	47
3.3.2	Выращивание и исследование свойств гетероэпитаксиальных пленок (001) $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	49
3.3.3	Изготовление переходов.....	49
3.3.4	Контроль качества плёнок и переходов.....	49
3.3.5	Метод обратимого изменения параметров уже изготовленных джозефсоновских переходов, предназначенных для использования в качестве активных элементов в составе макета джозефсоновского анализатора цепей.....	50
3.4	Разработка, изготовление и испытания макета джозефсоновского анализатора цепей	51
3.4.1	Лабораторные образцы бикристаллических джозефсоновских переходов, предназначенных для использования в качестве активных элементов в составе макета джозефсоновского анализатора цепей.....	51
3.4.2	Разработка и изготовление макета джозефсоновского анализатора цепей.	52

3.5	Применение джозефсоновского анализатора цепей для анализа электромагнитных структур.....	53
3.5.1	Характеристика широкополосной логопериодической антенны.....	53
3.5.2	Эквивалентная схема широкополосной логопериодической антенны.....	55
3.5.3	Характеристика логопериодической антенны с дефектом.....	57
3.6	Преимущества разработанного метода по сравнению с уже существующими	60
3.7	Заключение	62
4	Выработка предложений и рекомендаций по внедрению разработанного метода для оптимизации быстродействующих микроэлектронных и волноводных устройств терагерцового диапазона частот.....	63
5	Составление проекта Технического задания на проведение ОКР	65
6	Проведение экспериментов по использованию джозефсоновской спектроскопии для исследования параметров волноводов терагерцового диапазона частот	67
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	74
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	76
	ПРИЛОЖЕНИЕ А Отчёт о патентных исследованиях	80

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчёте о нир применяют следующие термины с с соответствующими определениями:

Стационарный эффект Джозефсона – эффект в контакте двух сверхпроводников, заключающийся в том, что при пропускании через контакт тока, величина которого не превышает критическую, падение напряжения на контакте отсутствует (несмотря на наличие слоя диэлектрика);

Нестационарный эффект Джозефсона – эффект в контакте двух сверхпроводников, заключающийся в том, что при пропускании через контакт тока, величина которого превышает критическую, контакт начинает излучать электромагнитные волны;

Сверхпроводящая слабая связь – пространственная область с подавленными сверхпроводящими свойствами в контакте двух сверхпроводников;

Джозефсоновский переход – сверхпроводящая слабая связь, в которой наблюдаются эффекты Джозефсона;

Бикристаллическая подложка – пластина из двух сращенных монокристаллов одного и того же материала с различной ориентацией;

Бикристаллическая тонкая пленка – эпитаксиальная пленка, выращенная на поверхности бикристаллической подложки;

Дифференциальный импеданс – отклик напряжения электронного элемента на гармоническое возмущение тока с малой амплитудой, деленный на это возмущение;

Электромагнитное согласование – подбор параметров передающего и принимающего электромагнитный сигнал элементов таким образом, чтобы минимизировать коэффициент отражения передаваемого сигнала.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ДП джозефсоновский переход

ВТСП высокотемпературный сверхпроводник

ВАХ вольтамперная характеристика

ЭМИ электромагнитное излучение

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные волны терагерцовых частот, в отличие от волн инфракрасного и терагерцового диапазонов до последнего времени практически не использовались в телекоммуникациях из-за отсутствия устройств генерации и детектирования. В последнее время был разработан ряд устройств на основе композитных полупроводников, работающие при частотах до 1 ТГц [1],[2]. Даже кремниевые КМОП технологии, которые ранее представлялись совершенно бесперспективными при терагерцовых частотах из-за потерь в подложках, продемонстрировали устройства, обладающие достаточно заметными мощностями при частотах свыше 100 ГГц [3], [4]. Благодаря этим достижениям возник интерес к терагерцовым волнам с точки зрения их применимости в системах связи из-за их широкой частотной полосы. Для систем беспроводной связи широкие перспективы открывает использование частот в интервале 275-3000 ГГц. Применение терагерцового диапазона для глобальных телекоммуникационных систем ограничено достаточно сильным поглощением излучения при частотах выше 1 ТГц в атмосфере [5], но это ограничение не существенно для локальных применений при передаче данных на расстояние до 10 м. При этом только на частоте 300 ГГц по оценкам [6], скорость передачи данных может достигать 100 Гб/с. Наиболее вероятные применения терагерцовых систем связи – это беспроводные дисплеи, локальные беспроводные сети, в том числе, линии связи в производстве между промышленными установками, линии связи между спутниками на орбите. Важным преимуществом рассматриваемого частотного диапазона является отсутствие рассеяния в пылевых облаках.

В настоящее время наиболее перспективной элементной базой для терагерцовой электроники являются композитные полупроводники. Уже созданы транзисторы на InP с частотой единичного усиления 1 ТГц [1], [2]. Были продемонстрированы полупроводниковые усилители с частотной полосой до 500 ГГц [7]-[9], микросхемы модулятора и демодулятора на частоте 120 ГГц и микросхема приёмника со смесителем, усилителем и умножителем частоты, работающая на частоте 220 ГГц [10], [11]. Были разработаны усилители мощности с коэффициентом усиления >50 и выходной мощностью 10 мВт на 220 ГГц [12] и 338 ГГц [13]. Существенные продвижения имеют место в разработке терагерцовых компонент на основе более дешевой кремниевой технологии. Так, были созданы генераторы с частотой 324 ГГц [14] и 410 ГГц [15]. Была также продемонстрирована микросхема приёмника-передатчика, работающая на частоте 160 ГГц и изготовленная по технологии КМОП [16]. Недавно был представлен генератор на основе резонансного туннельного диода, работающий на частоте 1 ТГц при комнатной температуре

с обеспечивающей мощностью на выходе 7 мкВт [17], [18]. Также широко применяются детекторы и умножители частоты на диодах Шоттки, работающие на частоте 1 ТГц и изготовленные на основе GaAs [19], [20]. Были продемонстрированы различные типы фотодиодов, используемых для генерации в терагерцовой области частот, с мощностью на выходе 0.5 мВт в диапазоне 270-410 ГГц [21].

На основе разработанной полупроводниковой элементной базы создаются телекоммуникационные системы. В [22] была представлена широкополосная система передачи данных на расстояние 1 км со скоростью 20 Мбит/с на частоте 120 ГГц. Была также продемонстрирована система, работающая на частотах 250 и 300 ГГц [23], [24].

Среди нерешённых проблем, стоящих на пути широкого применения устройств терагерцовой электроники в телекоммуникациях основными являются проблемы, связанные с оптимизацией межсоединительных структур в микросхемах, а также обеспечение оптимального согласования различных частей приёмо-передающих и волноводных устройств. Для этих целей достаточно широко используются анализаторы цепей, в которых рабочая частота может непрерывно меняться от 40 КГц до 125 ГГц. Существующие устройства на основе полупроводниковых умножителей частоты позволяют расширить эту полосу до 1 ТГц, но они достаточно дороги и обладают рядом недостатков, препятствующих их широкому распространению. Кроме того при частотах более 100 ГГц имеются определённые трудности в обеспечении согласования исследуемых объектов субмикронных и микронных размеров с внешним анализатором цепей, для чего применяются многочисленные волноводные секции и специальные высокочастотные микрощупы. При этом фактически измерения производятся на внешних входах волноводов, и требуется использование достаточно специальных процедур для экстракции параметров исследуемого устройства (deembedding) [25], которые включают в себя калибровочные измерения с использованием апробированных эталонов и использование достаточно сложных математических процедур обработки данных, что приводит к высокой погрешности получаемых результатов. Всё вышперечисленное привело к идее процедуры характеристики “на кристалле”, когда высокочастотная часть измерительного устройства собрана на той же подложке, что и исследуемый объект и с контактных площадок кристалла снимаются только низкочастотные сигналы [25]. В частности, в [26] представлены результаты реализации измерительной системы на одной подложке с исследуемым объектом. Измерительная система реализована на биполярных гетеротранзисторах SiGe и работает на частотах до 120 ГГц.

Ранее независимо была предложена реализация измерений “на кристалле” частотно-зависимых параметров микрополосковых линий [27], антенн и других резонансных структур

[28], [8] в субтерагерцовой области частот с использованием нестационарного эффекта Джозефсона в переходах из высокотемпературных сверхпроводников. Известно, что вольтамперная характеристика (ВАХ) джозефсоновского перехода (ДП) обладает высокой чувствительностью к электромагнитному окружению, что было продемонстрировано в [29]-[31] в СВЧ диапазоне с использованием ДП из ниобия [32] был теоретически исследован ДП с подключённым к нему внешним элементом с частотно-зависимыми параметрами в рамках резистивной модели [33] и было показано, что поправка к ВАХ ДП, пропорциональна частотно-зависимому адмиттансу этого элемента $Y(f)$, где частота f связана с напряжением на ДП V соотношением Джозефсона $f=2eV/h$, где h – постоянная Планка а e – заряд электрона. Таким образом, измерение статических характеристик ДП позволяет характеризовать присоединённую к нему электромагнитную структуру в частотной области, что соответствует принципу измерения “на кристалле”. Как известно, в бикристаллических ДП, изготовленных из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) [34], нестационарный эффект Джозефсона наблюдается в частотной области вплоть до нескольких ТГц, и это обстоятельство активно используется для развития методов терагерцового спектрального анализа электромагнитного излучения [35] и электромагнитного поглощения в жидкостях [36].

В [28] было продемонстрировано применение джозефсоновской спектроскопии для характеристики широкополосной логопериодической антенны. Для анализа данных использовалось аналитическое выражение из [32], не учитывающее тепловых флуктуаций тока нормальных квазичастиц и справедливое только для случая слабой связи джозефсоновского перехода с исследуемым объектом. В [37] представлены результаты исследования частотного диапазона спектрального метода. Для этого было проведено численное моделирование системы, состоящей из джозефсоновского перехода и соединённого с ним последовательного колебательного контура, резонансная частота которого варьировалась. Из расчётов следует, что нижняя граница частотного интервала определяется тепловыми флуктуациями тока нормальных квазичастиц, а верхняя – линеаризацией ВАХ ДП при больших напряжениях. При этом уменьшение критического тока I_c ДП приводит к сдвигу частотной полосы в область низких частот. Таким образом, вариация I_c в процессе измерений позволяет увеличить эффективную частотную полосу.

При разработке устройств такого типа с джозефсоновскими переходами возникает необходимость в создании адекватных моделей цепей содержащих ДП в субтерагерцовой и терагерцовой областях частот. Как было показано в [28], характеристики ДП весьма чувствительны к электромагнитному окружению. Кроме того известно, что характеристики ДП во многом определяются флуктуациями тока нормальных электронов, которые, в свою

очередь, также зависят от частотных характеристик взаимодействующих с ДП электромагнитных структур. По этим причинам достаточно сложно, если вообще возможно, создать компактную модель автономного ДП, которую далее можно использовать в программных пакетах схемотехнического моделирования типа SPICE, как это делается в полупроводниковой электронике. Эту проблему можно решить созданием модели для конкретной электромагнитной системы, включающей ДП. Обычно параметры моделей, используемых в схемотехническом моделировании, получают из экспериментальных данных, но методики непосредственных измерений при частотах выше 100 ГГц сталкиваются с существенными трудностями. В полупроводниковой электронике в настоящее время максимальные частоты, при которых были получены параметры компактных моделей, составляют 170 ГГц [38]. Однако, как показали проведённые ранее исследования [28], [39], электродинамические характеристики устройств с ДП могут быть восстановлены из их статических характеристик при значительно более высоких частотах.

Для всех указанных выше приложений требуется использование компьютерного моделирования ДП, взаимодействующего с электромагнитной средой. Эта задача несколько упрощается для бикристаллических ДП из ВТСП на границах зёрен. Вследствие внутреннего шунтирования характеристики этих переходов с высокой точностью описываются резистивной моделью [33]. С другой стороны, необходимость учёта тепловых флуктуаций тока нормальных квазичастиц приводит к необходимости решать систему стохастических дифференциальных уравнений. В простейшем случае уединённого перехода эта система сводится к уравнению Фоккера-Планка (УФП), для которого существует эффективный алгоритм решения с использованием преобразования Фурье [33]. В более сложных случаях, когда ДП соединён с реактивными элементами, этот метод достаточно сложно применять, так как добавление одного элемента ёмкостного или индуктивного типа увеличивает размерность уравнения Фоккера-Планка. Так в [40] для анализа ВАХ ДП, шунтированного ёмкостью, использовалось двумерное УФП. Более универсальными являются стохастические методы. В [41] метод молекулярной динамики использовался для моделирования ДП, соединённого с ёмкостью, в [42] также анализировалась динамика шунтированного ёмкостью ДП, а тепловые флуктуации моделировались в виде последовательности прямоугольных импульсов со случайной амплитудой.

Решению указанных проблем был посвящён данный проект. В процессе выполнения работ по проекту были представлены следующие промежуточные отчеты:

—Отчёт о научно-исследовательской работе «Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе

терагерцовой джозефсоновской спектроскопии» по теме: «Выбор направления исследований» от 30.11.2011;

—Отчёт о научно-исследовательской работе «Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии» по теме: « Теоретические и технологические исследования поставленных перед НИР задач» от 27.04.2012;

—Отчёт о научно-исследовательской работе «Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии» по теме: «Разработка и создание макета терагерцового джозефсоновского анализатора цепей» от 27.10.2012;

Настоящий этап является четвёртым и заключительным этапом выполнения НИР. Он посвящен исследовательским испытаниям разработанного ранее макета терагерцового джозефсоновского анализатора цепей, обобщению и оценке результатов.

В частности, было выполнено следующее:

—проведены исследовательские испытания в соответствии с разработанной ранее программой;

—сделано обобщение и оценка результатов работы;

—выработаны предложения и рекомендации по внедрению разработанного метода для оптимизации быстродействующих микроэлектронных и волноводных устройств терагерцового диапазона частот;

—составлен проект технического задания на проведение ОКР «Разработка терагерцового джозефсоновского анализатора цепей»;

—с участием иностранного партнёра проведены эксперименты по использованию джозефсоновской спектроскопии для исследования параметров волноводов терагерцового диапазона частот.

В настоящем отчете содержатся результаты исследований по перечисленным направлениям. В соответствии с требованиями к патентной чистоте и патентоспособности научно-исследовательских работ были проведены патентные исследования, отчёт о которых приведён в Приложении А.

1 Проведение исследовательских испытаний макета терагерцового джозефсоновского анализатора цепей в соответствии с Программой исследовательских испытаний.

1.1 Подготовка изделия к испытанию

1.1.1 Предварительная подготовка.

Предварительная подготовка заключалась в прогреве всей электронной температуры в течение 30 мин.

1.1.2 Проверка калибровочных данных измерителя температуры калиброванного диода LakeShore DT-470-SD-13-1.

Для проверки использовалась термопара ТХК (ГОСТ 3044-84). Проверка производилась в диапазоне температур 5 К – 77 К с шагом 1 К. Максимальная разность значений температуры, измеренных с использованием термопары и диода – 0.2 К.

1.1.3 Проверка всех измерительных цепей с использованием омического эквивалента джозефсоновского перехода.

1.1.3.1 Предварительная подготовка.

Для проверки измерительных цепей был подготовлен омический эквивалент джозефсоновского перехода. Эквивалент был изготовлен из резистора SMD 0805 1 Ом, смонтированного на пластине из стеклотекстолита размером 5x5 мм, и установлен в джозефсоновский анализатор цепей. Далее в течение 30 мин производился прогрев всех электронных частей установки. В закороченном состоянии эквивалента устанавливалось нулевое значение напряжения с помощью регулятора постоянного смещения устройства развёртки.

1.1.3.2 Проверка цепи задания тока через магнит.

Магнит охлаждался до температуры жидкого гелия. В усилителе с синхронным детектированием LIA 7280 на выходе постоянного напряжения DAC1 было задано напряжение 0 мВ. При этом напряжение на входе постоянного напряжения ADC1 составило 0.02 мВ, что соответствует нулевому значению усилителя У7-5. Затем последовательно задавались напряжения 10 мВ, 20 мВ, 30 мВ. Изменение напряжения производилось с шагом 1 мВ. После каждого задания напряжения производился контроль напряжения на входе постоянного напряжения ADC1. Значения напряжений составили, соответственно 18.52 мВ, 37.04, 55.62 мВ. Затем последовательно задавались напряжения -10 мВ, -20 мВ, -30 мВ. При этом значения напряжений на входе постоянного напряжения ADC1 составили -18.48 мВ, -36.96 мВ, -55.5 мВ. Полученные результаты свидетельствовали о том, что цепи задания тока через магнит функционируют должным образом.

1.1.3.3. Проверка цепи измерения вольтамперной характеристики

джозефсоновского перехода.

Разъём BNC7 блока электроники соединялся с разъёмом “Вход 2” осциллографа TDS220. На входных усилителях каналов 1 и 2 осциллографа устанавливался режим DC. На устройстве развёртки постоянного тока устанавливались следующие режимы: период развёртки 100 мс, максимальная амплитуда развёртки 1 мА. С помощью регулятора постоянного смещения устройства развёртки постоянного тока постоянный ток смещения устанавливался равным 0. Контроль сигнала развёртки осуществлялся по синусоидальному сигналу на канале 2 осциллографа TDS220. Амплитуда развёртки увеличивалась с помощью регулятора амплитуды устройства развёртки постоянного тока до достижения амплитуды сигнала на канале 2 осциллографа TDS220 значения 5 В. При этом на канале 1 осциллографа наблюдался синусоидальный сигнал амплитудой 1 В. Полученный результат свидетельствовал о том, что цепь измерения вольтамперной характеристики джозефсоновского перехода функционируют должным образом.

1.1.3.4 Проверка цепи измерения дифференциального сопротивления

джозефсоновского перехода.

Разъём BNC7 блока электроники соединялся с разъёмом “Вход 2” осциллографа TDS220. Выход Канал 1 усилителя с синхронным детектированием PAR7280 соединялся с входом вольтметра В7-43. На входном усилителе канала 1 осциллографа устанавливался режим DC, а канала 2 – режим AC. На устройстве развёртки постоянного тока устанавливались следующие режимы: период развёртки 1 с, максимальная амплитуда развёртки 1 мА.

С помощью регулятора амплитуды устройства развёртки постоянного тока амплитуда развёртки устанавливалась равной 0. С помощью регулятора постоянного смещения устройства развёртки постоянного тока постоянный ток смещения устанавливался равным 0. Частота генератора, встроенного в усилитель с синхронным детектированием PAR7280 устанавливалась равной 300 кГц, а амплитуда – 2 В, чувствительность 1 В, синхронизация int.. На канале 1 осциллографа TDS220 наблюдался синусоидальный сигнал с частотой 300 кГц и амплитудой 2.8 В. На канале 2 осциллографа наблюдался синусоидальный сигнал с частотой 300 кГц и амплитудой 2.7 В. Сдвиг по времени между сигналами, поступающими на каналы 1 и 2 составлял 100 нс. На усилителе с синхронным детектированием PAR7280 включался режим Auto Phase. Показания вольтметра В7-43 составляли 1.96 В. Далее с помощью регулятора амплитуды устройства развёртки постоянного тока амплитуда развёртки устанавливалась равной 5 В с контролем по каналу 2 осциллографа TDS220 и все измерения повторялись. При этом показания вольтметра В7-43 и канала 1 осциллографа

TDS220 не изменялись. Полученные результаты свидетельствовали о том, что цепь измерения вольтамперной характеристики джозефсоновского перехода функционируют должным образом.

1.1.3.5 Проверка цепи измерения температуры.

Криогенная часть джозефсоновского анализатора цепей заполнялась газообразным гелием. В контроллере температуры LS331 был установлен тип сенсора: Silicon Diode и выключен нагреватель. Криогенная часть устройства была помещена в смесь льда и воды. Через 20 мин было достигнуто устойчивое показание температуры на дисплее термоконтроллера, которое составляло 273.43 К. Далее криогенная часть устройства была помещена в сосуд Дьюара с жидким азотом. Через 20 мин было достигнуто устойчивое показание температуры на дисплее термоконтроллера, которое составляло 77.65 К. Далее криогенная часть устройства была помещена в сосуд Дьюара с жидким гелием. Через 20 мин было достигнуто устойчивое показание температуры на дисплее термоконтроллера, которое составляло 4.84 К. Полученные результаты свидетельствовали о том, что цепь измерения температуры функционируют должным образом.

1.1.4 Проверка процесса установления рабочей температуры с использованием нагревателя и термоконтроллера Lakeshore LS331

Проверка осуществлялась непосредственно после выполнения проверки цепи измерения температуры. Криогенная часть устройства была погружена в сосуд Дьюара с жидким гелием. Показания контроллера температуры LS331 составляли 4.84 К. В контроллере была задана температурная точка 5 К и диапазон нагревателя Medium. Через 3 мин было достигнуто показание температуры на дисплее термоконтроллера, которое составляло 5.02 К, при этом медленные изменения наблюдались в третьем десятичном знаке. Далее на контроллере была задана температурная точка 6 К. Через 5 мин было достигнуто показание температуры на дисплее термоконтроллера, которое составляло 5.99 К. Далее на контроллере была задана температурная точка 8 К. Через 6 мин было достигнуто показание температуры на дисплее термоконтроллера, которое составляло 8.01 К. Полученные результаты свидетельствовали о том, что цепь измерения температуры функционирует должным образом и вносить поправки в коэффициенты автоматического регулирования термоконтроллера нет необходимости.

Замечание. Для удобства проведения измерений рекомендуется доработать программу управления измерениями в части задания параметров температурного контроллера LS331 с помощью интерфейса пользователя

1.1.5 Проверка программы управления процессом измерений и сбора данных для макета джозефсоновского анализатора цепей

- Программа запускалась командой Das16.exe. После запуска на экране компьютера появились окна многодокументного интерфейса, управления и конфигурации.
- В элементе управления Discretisation time interval было установлено значение 1.e-3
- В элементе управления Range было установлено значение 10 В.
- В элементе управления Points number было установлено значение 1000.
- В элементе управления Auto save была снята отметка
- В элементе управления Plot type был выбран режим Current vs. voltage.
- В элементе управления Voltage был выбран канал 0 и задано усиление 1000
- В элементе управления Current был выбран канал 1 и задано усиление 3680
- После запуска процесса измерений с помощью кнопки Start появилось окно, представленное на рисунке. 1.1.

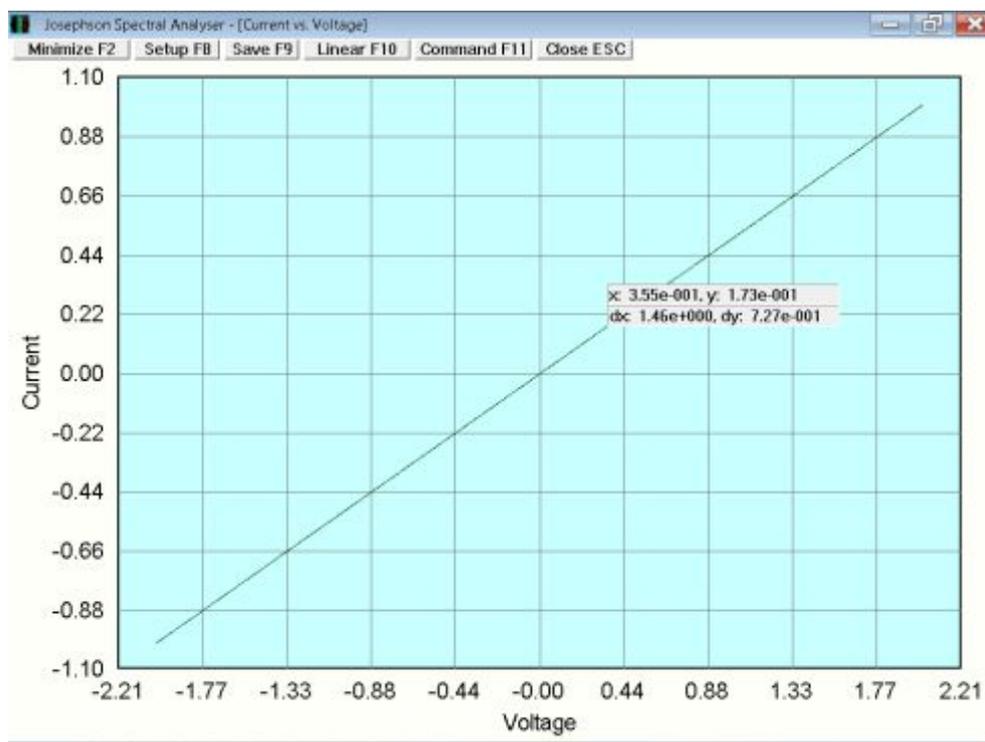


Рисунок 1.1 - Результат измерения вольтамперной характеристики омического эквивалента джозефсоновского перехода.

1.2 Проверка на соответствие комплектности и оценка качества конструкторской документации.

Была произведена проверка эскизной конструкторской документации в составе:

- чертёж общего вида измерительного блока 02699085.468911.001 ВО;

—схема электрическая функциональная макета джозефсоновского анализатора цепей 02699085.468162.001 Э2;

—схема электрическая соединений и подключения макета джозефсоновского анализатора цепей 02699085.468162.001 Э4;

Было установлено, что комплектность эскизной конструкторской документации соответствует Техническому заданию. Качество эскизной конструкторской документации было оценено как удовлетворительное.

1.3 Проверка соответствия макета джозефсоновского анализатора цепей его спецификации и общей схеме.

1.3.1 Проверка соответствия макета джозефсоновского анализатора цепей конструкторской документации

Была проведена проверка соответствия макета джозефсоновского анализатора цепей спецификации 02699085.468162.001, Схеме электрической соединений и подключения макета джозефсоновского анализатора цепей Схема электрическая функциональная макета джозефсоновского анализатора цепей 02699085.468162.001 Э2 и 02699085.468162.001 Э4. Было установлено полное соответствие макета указанным документам.

Замечание. В случае использования реализованной в держателе образца конструкции прижимных контактов возможно разрушение активного элемента при охлаждении из-за различия коэффициентов теплового расширения материалов активного элемента и контактов. Рекомендуется изменить конструкцию подводящих контактов к активному элементу таким образом, чтобы обеспечения компенсации изменения размеров активного элемента при тепловом расширении.

1.3.2. Проверка соответствия параметров макета Техническому заданию

Была проведена проверка соответствия параметров изготовленного макета техническому заданию. Проверяемые параметры приведены в Промежуточном отчёте за 3 этап, Глава 2. Было установлено, что все проверяемые параметры соответствуют Техническому заданию.

Замечание. Отсутствуют данные о значениях характеристического напряжения при температуре 4.2 К, а также сопротивления в нормальном состоянии при температуре 4.2 К образца джозефсоновского перехода, используемого в качестве чувствительного элемента макета. Рекомендуется определить значения этих параметров.

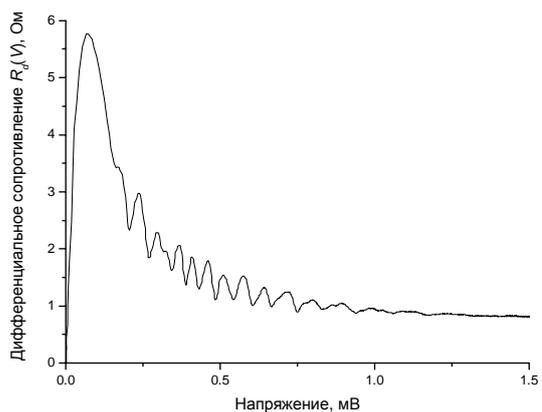
1.3.3 Проверка соответствия макета джозефсоновского анализатора цепей требованиям безопасности.

Разработанный макет не относится к электрооборудованию машин и механизмов, поэтому не попадает под действие ГОСТ Р МЭК 60204-1-99. Питание электронной части

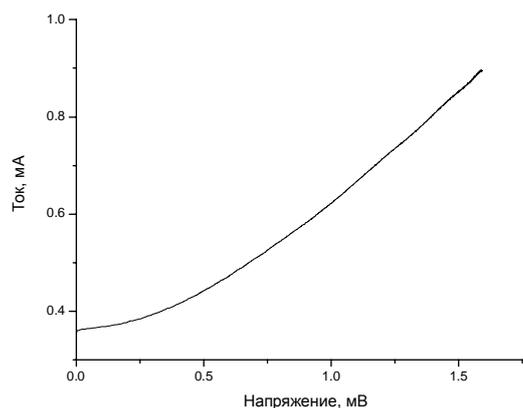
макета осуществляется от батареи с напряжением 30 В, которое не является опасным согласно ГОСТ Р МЭК 60950-2002. В качестве ёмкости для криогенной жидкости используется гелиевый сосуд Дьюара СТГ-40, который удовлетворяет требованиям ОСТ 26-04-2153-77.

1.4 Проверка минимального размера исследуемого объекта.

Была проведена проверка минимального размера исследуемого объекта. В держатель был установлен образец джозефсоновского переходов с интегрированной логопериодической антенной. Криогенная часть устройства была охлаждена до рабочей температуры 5 К. Температура контролировалась с помощью калиброванного диода LakeShore DT-470-SD-13-1 и измерялась прибором LS331 фирмы Lakeshore. Для измерения вольтамперной характеристики ДП через ДП задавался ток с помощью устройства развёртки постоянного тока, который увеличивается от 0 до 2 мА с шагом 0.05 мА. При этом сила тока измерялась в соответствии с [43]. Для измерения силы тока использовался прибор Пикоамперметр А2-4. Напряжение V на активном элементе измерялось в соответствии с [43]. Для измерения напряжения использовался вольтметр Вольтметр универсальный быстродействующий В7-43, который подключался к разъёму BNC6 блока электроники. Кроме того, на каждом шаге измерялось дифференциальное сопротивление ДП в соответствии с [44]. Для задания переменного тока через ДП с частотой 289 кГц использовался Генератор сигналов низкочастотный ГЗ-112, который подключался к разъёму BNC3 блока электроники. Амплитуда переменного тока I_d и амплитуда переменного напряжения U_d измерялись с использованием осциллографа TDS220.. Дифференциальное сопротивление ДП R_d определялось по формуле $R_d = U_d/I_d$. Также измеряется напряжение V на активном элементе в соответствии с [43]. Далее на основе полученных данных был построен график $R_d(V)$, представленный на рисунке 1.2. По этой кривой определялось максимальное напряжение V , при котором еще наблюдаются логопериодические максимумы, соответствующие резонансам исследуемой логопериодической структуры. Это напряжение составило 1.14 мВ. По этому напряжению определялся минимальный размер резонатора L по формуле: $L=0.0183/V$, который был равен 160 мкм. .



а



б

Зависимость дифференциального сопротивления от напряжения (а) и вольтамперная характеристика (б). Температура активного элемента – 5 К.

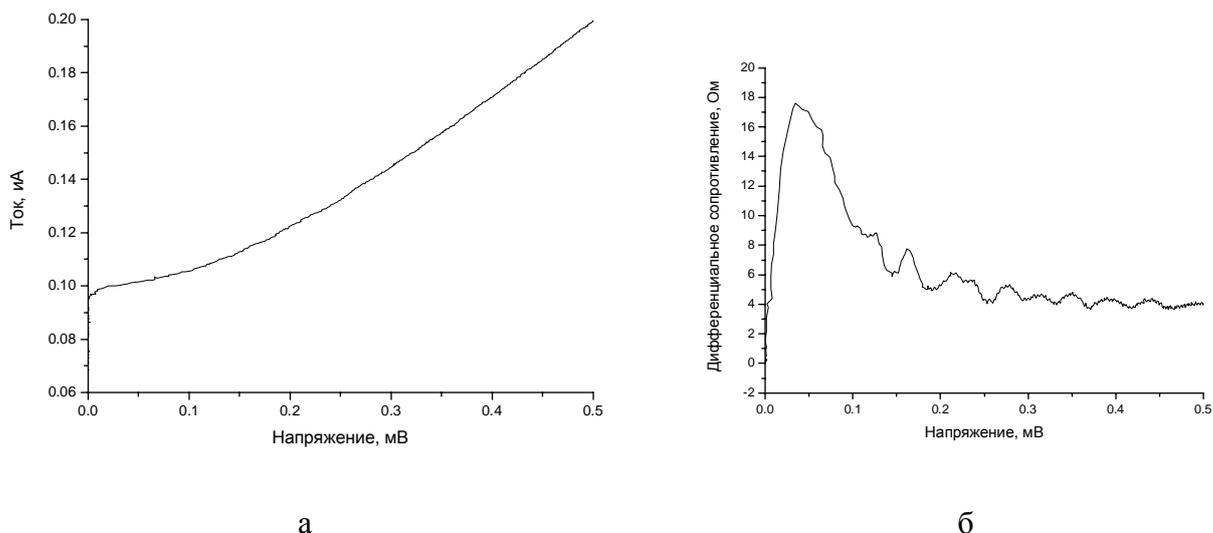
Рисунок 1.2-Характеристики активного элемента макета джозефсоновского анализатора цепей с интегрированной логопериодической антенной для определения минимального размера исследуемого объекта.

Полученное значение не превышает значения 500 мкм, указанного в п. 4.3 Программы исследовательских испытаний.

1.5 Проверка нижней рабочей частоты

Была проведена проверка нижней рабочей частоты макета. Для этого была установлена рабочая температура 5 К. Для измерения рабочей температуры использовался калиброванный диод LakeShore DT-470-SD-13-1. Температура измерялась прибором LS331 фирмы LakeShore. Ток через ДП задавался с помощью устройства развёртки постоянного тока в пределах от 0 до 2 мА с шагом 0.05 мА. При этом сила тока измерялась с использованием аналого-цифрового преобразователя DT 9836 фирмы Data Translations. На каждом шаге измерялось дифференциальное сопротивление активного элемента в соответствии с [44]. При этом переменный ток через ДП с частотой 289 кГц задавался с использованием Генератора сигналов низкочастотного Г3-112. Амплитуда тока I_d и амплитуда напряжение U_d измерялись с использованием Осциллографа двухканального С1-127и прибора LIA 7280 фирмы Signal Recovery. Дифференциальное сопротивление активного элемента R_d определялось по формуле $R_d = U_d / I_d$. Также измерялось напряжение V на активном элементе с использованием устройства DT 9836 фирмы Data Translations. (рисунок 1.3.а).

Далее на основе полученных данных строится кривая $R_d(V)$ (рисунок 1.3 б.)



Вольтамперная характеристика (а) и зависимость дифференциального сопротивления от напряжения (б). Температура активного элемента – 5 К.

Рисунок 1.3 - Характеристики активного элемента макета джозефсоновского анализатора цепей с интегрированной логопериодической антенной для определения минимальной рабочей частоты.

По этой кривой определялись напряжения, соответствующие логопериодическим максимумам V_m . Затем строился график V_m как функции $\log n$, где n - номер максимума(рисунок 1.4).

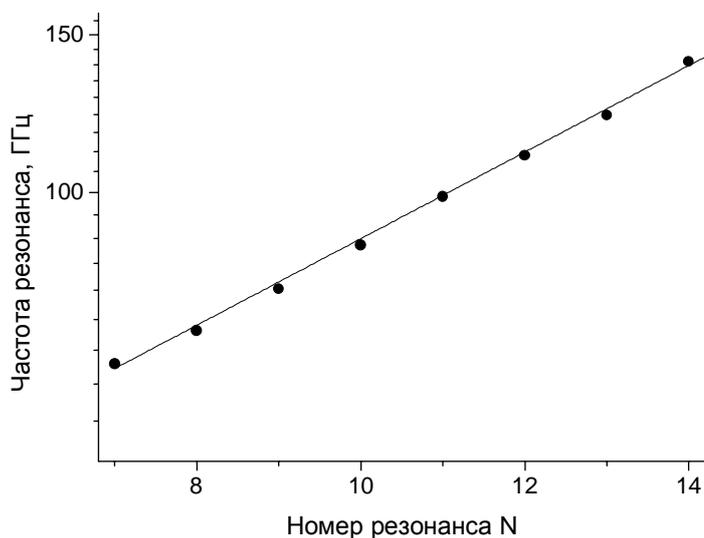


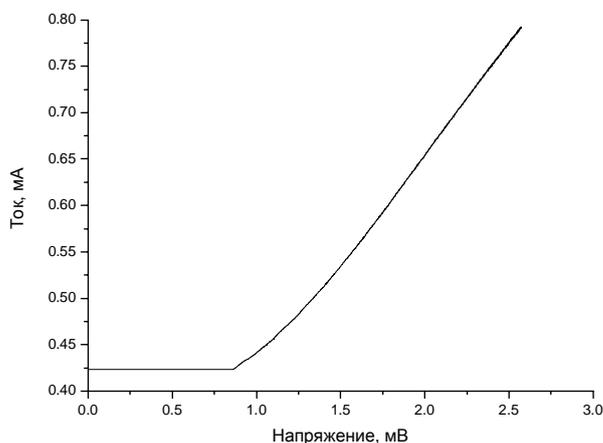
Рисунок 1.4 - Зависимость частоты резонанса от его номера, полученная для определения минимальной рабочей частоты джозефсоновского анализатора цепей.

Из этого графика находилось минимальное значение V_m , при котором отклонение соответствующей точки от прямой не превышает 2%. Это значение составило 133.6 мкВ,

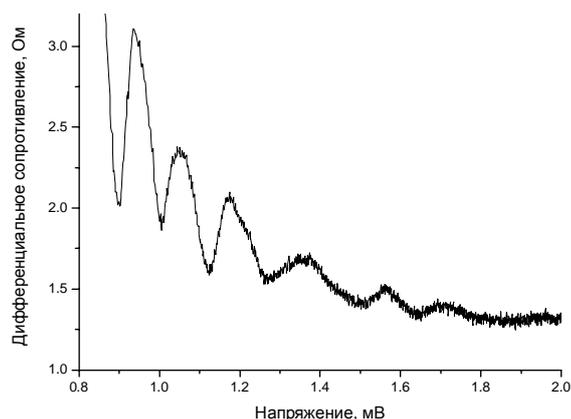
причём отклонение от линейной зависимости составило менее 0.1%. Минимальная частота определялась по формуле $f=483.5 V_m$, и составила 64.6 ГГц. Полученное значение не превышает величины 100 ГГц, указанной в п. 4.4 Программы исследовательских испытаний.

1.6 Проверка верхней рабочей частоты

Была проведена проверка верхней рабочей частоты макета. Для этого была установлена рабочая температура 5 К. Для измерения рабочей температуры использовался калиброванный диод LakeShore DT-470-SD-13-1. Температура измерялась прибором LS331 фирмы LakeShore. Ток через ДП задавался с помощью устройства развёртки постоянного тока в пределах от 0 до 2 мА с шагом 0.05 мА. При этом сила тока измерялась с использованием аналого-цифрового преобразователя DT 9836 фирмы Data Translations. На каждом шаге измерялось дифференциальное сопротивление активного элемента в соответствии с [44]. При этом переменный ток через ДП с частотой 289 кГц задавался с использованием Генератора сигналов низкочастотного ГЗ-112. Амплитуда тока I_d и амплитуда напряжение U_d измерялись с использованием Осциллографа двухканального С1-127и прибора LIA 7280 фирмы Signal Recovery. Дифференциальное сопротивление активного элемента R_d определялось по формуле $R_d= U_d/I_d$. Также измерялось напряжение V на активном элементе с использованием устройства DT 9836 фирмы Data Translations. (рисунок 1.5.а). Далее на основе полученных данных строится кривая $R_d(V)$ (рисунок 1.5 б.)



а



б

Вольтамперная характеристика (а) и зависимость дифференциального сопротивления от напряжения (б). Температура активного элемента – 5 К.

Рисунок 1.5 - Характеристики активного элемента макета джозефсоновского анализатора цепей с интегрированной логопериодической антенной для определения минимальной рабочей частоты:

По этой кривой определялись напряжения, соответствующие логопериодическим максимумам V_m . Затем строился график V_m как функции $\log n$, где n - номер максимума (рисунок 1.6). Из этого графика находилось минимальное значение V_m , при котором отклонение соответствующей точки от прямой не превышает 2%. Это значение составило 1.752 мВ, причём отклонение от линейной зависимости составило 1.4%. Минимальная частота определялась по формуле $f=483.5 V_m$ и составила 847 ГГц.

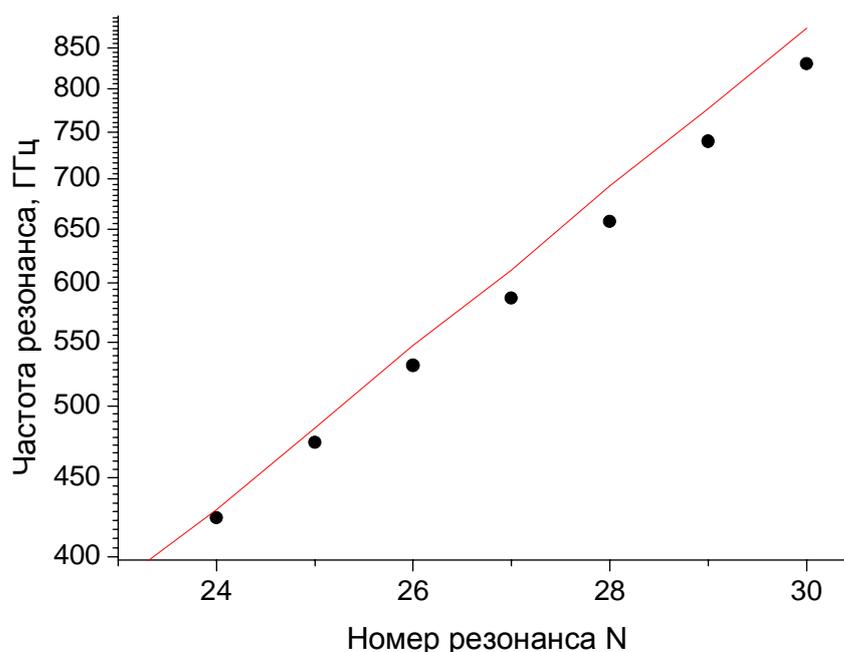


Рисунок 1.6 - Зависимость частоты резонанса от его номера, полученная для определения минимальной рабочей частоты джозефсоновского анализатора цепей.

Полученное значение превышает величину 700 ГГц, указанной в п. 4.5 Программы исследовательских испытаний.

Замечание. На зависимости дифференциального сопротивления от температуры наблюдались избыточные шумы при напряжениях выше 1.2 мВ. Рекомендуется изменить конструкцию усилителя переменного сигнала с тем, чтобы понизить шумы до $1 \text{ нВ/Гц}^{0.5}$

1.7 Проверка разрешения по частоте

Была произведена проверка разрешения по частоте макета устройства. Была установлена рабочая температура 5 К. Для измерения рабочей температуры использовался калиброванный диод LakeShore DT-470-SD-13-1. Температура измерялась прибором LS331 фирмы LakeShore. Ток через чувствительный элемент увеличивается от 0 до 2 мА с шагом 0.05 мА. При этом сила тока измерялась в соответствии с [43]. Для измерения силы тока использовался Пикоамперметр А2-4. На каждом шаге измерялось напряжение V на

активном элементе в соответствии с [43] и дифференциальное сопротивление активного элемента R_d в соответствии с [44] с использованием устройства DT 9836 фирмы Data Translations. На активный элемент устройства подавалось электромагнитное излучение от Генератора высокочастотного Г4-142 с умножителем частоты Х4. Частота электромагнитного излучения составила 282 ГГц. Отклик напряжения ΔV на активном элементе на внешнее монохроматическое излучение измерялся с помощью усилителя с синхронным детектированием LIA7280. Для этого использовалась внутренняя модуляция амплитуды излучения генератора Г4-142 с частотой 1 кГц. На основе полученных данных измерений была построена зависимость отклика тока через активный элемент $\Delta I = \Delta V / R_d$ от напряжения. Зависимость $\Delta I(V)$ приведена на рисунке 1.7.

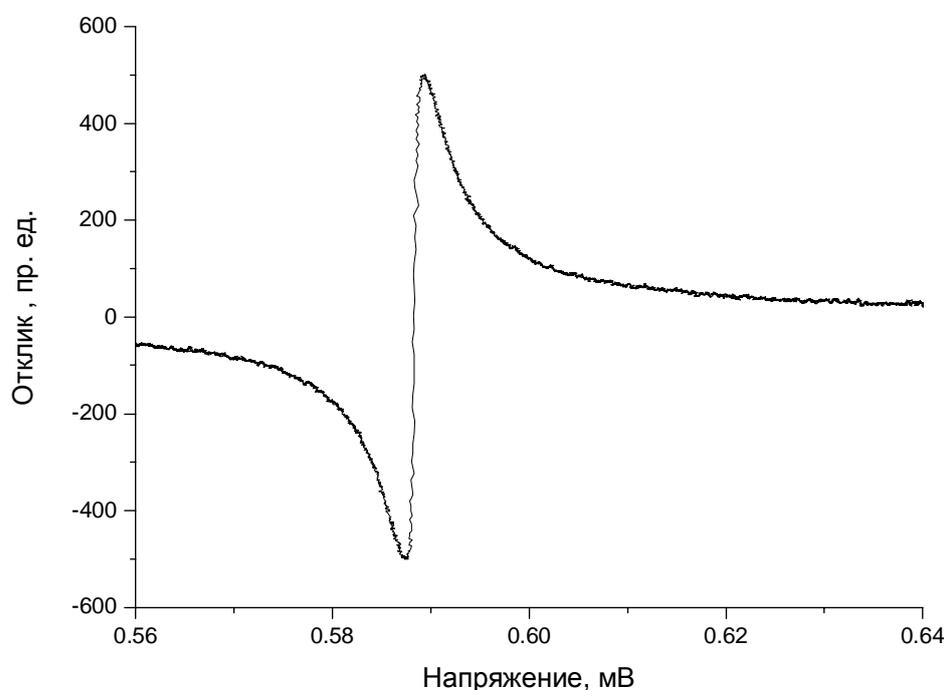


Рисунок 1.7 - Зависимость отклика тока через активный элемент макета джозефсоновского анализатора цепей от напряжения, построенная для измерения разрешения по частоте.

Разрешение по частоте Δf определяется по формуле: $\Delta f = 483.6(V_1 - V_2)$, где Δf - разрешение по частоте в ГГц, V_1 – напряжение, соответствующее максимуму отклика в мВ, V_2 – напряжение, соответствующее минимуму отклика в мВ. Значение разрешения составило 0.95 ГГц, что не превышает значение 7 ГГц приведенное в п. 4.6 Программы испытаний.

1.8 Проверка времени сканирования частотного диапазона

В программе управления процессом измерений и сбора данных были установлены

параметры измерений, приведённые на рисунке 1.8. После запуска процесса измерения кнопкой Start с помощью Секундомера ТУ 25-1894.003-90 было измерено время сканирования, которое составило 18.6 с. Полученный результат не превосходит значение 20 с, заданное в п. 4.7 Программы исследовательских испытаний.

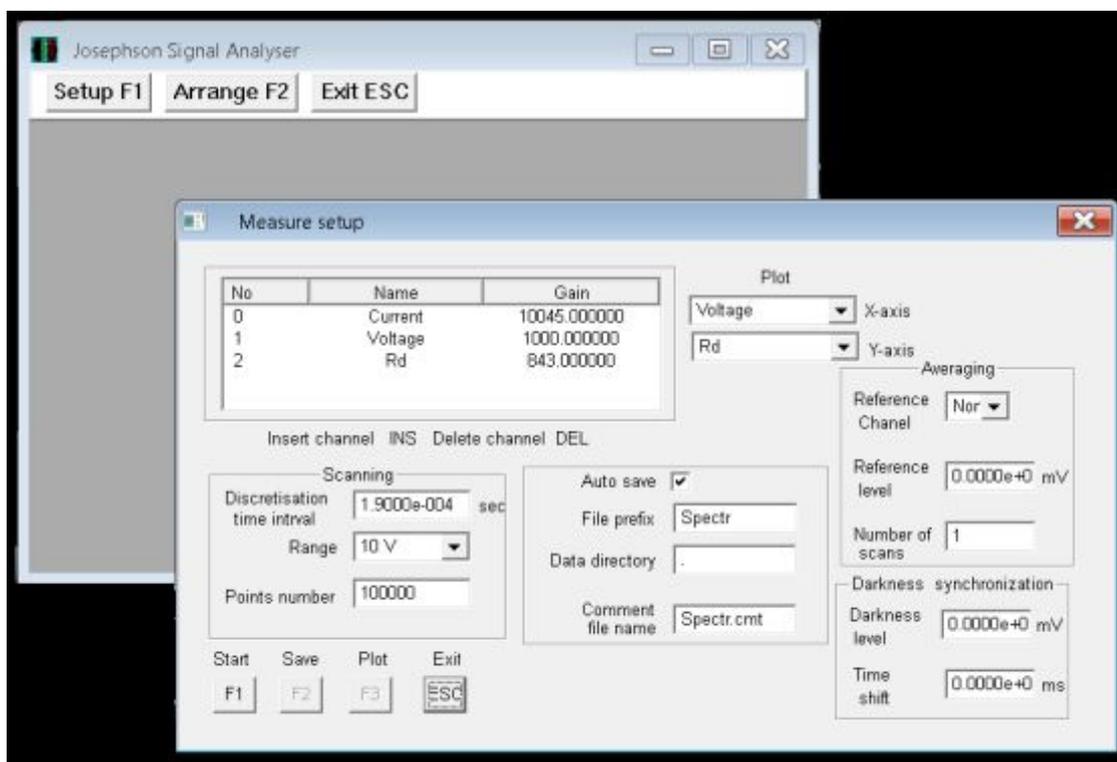


Рисунок 1.8-Параметры измерений в программе управления процессом измерений и сбора данных

Замечание. Для контроля полученного результата рекомендуется доработать программу управления процессом измерений и сбора данных таким образом, чтобы производить быструю оценку действительной и мнимой частей адмиттанса исследуемого объекта после сканирования.

1.9 Заключение.

Из представленных в таблице 1 результатов испытаний следует, что основные параметры макета джозефсоновского анализатора цепей удовлетворяет требованиям Технического задания.

Таблица 1 - Результаты испытаний

Наименование параметра	Ед. изм.	Номера пунктов		Требования к параметру		Измеренное значение		
		Программы испытаний	Методик испытаний	Нормальное значение	Предельное отклонение	Нормальные условия	Время воздействия	После воздействия
Проверка на соответствие комплектности и оценка качества КД.	-	4.1	1	-	-	-	-	-
Проверка соответствия макета джоуфсоновского анализатора цепей его спецификации и общей схеме	-	4.2	2	-	-	-	-	-
Минимального размер исследуемого объекта	мкм	4.3	3	500	+10	160	160	160
Проверка нижней рабочей частоты	ГГц	4.4	4	100	+10	64.6	64.6	64.6
Проверка верхней рабочей частоты	ГГц	4.5	5	700	-10	847	847	847
Проверка разрешения по частоте	ГГц	4.6	6	5	+1	0.95	0.95	0.95
Проверка времени сканирования частотного диапазона	сек	4.7	7	20	+3	18.6	18.6	18.6

При проведении испытаний были сделаны следующие замечания.

Рекомендуется доработать программное обеспечение в части задания параметров температурного контроллера LS331 с помощью интерфейса пользователя.

Рекомендуется определить значения следующих параметров образца джоуфсоновского перехода, используемого в качестве чувствительного элемента макета:

- характеристического напряжения при температуре 4.2 К;
- характеристического напряжения при температуре 78 К;
- сопротивления в нормальном состоянии при температуре 4.2 К.

Рекомендуется изменить конструкцию подводящих контактов к активному элементу в части обеспечения компенсации изменения размеров активного элемента при тепловом расширении.

Рекомендуется изменить конструкцию усилителя переменного сигнала в части понижения шумов до $1 \text{ нВ/Гц}^{0.5}$

Рекомендуется доработать программное обеспечение в части автоматического определения действительной и мнимой частей адмиттанса исследуемого объекта после сканирования.

2 Доработка макета терагерцового джозефсоновского анализатора цепей по результатам экспериментальных исследований

2.1 Доработка программного обеспечения в части задания параметров температурного контроллера LS331 с помощью интерфейса пользователя.

Дистанционное управление контроллером температуры LS331 должно осуществляться параллельно проведению измерений. Поэтому для задания параметров контроллера был разработан отдельный модуль, осуществляющий взаимодействие с контроллером через интерфейс RS232. Кроме управления контроллером, модуль также может осуществлять измерение зависимости сопротивления джозефсоновского перехода от температуры, которое необходимо для тестирования и подбора параметров активного элемента. Программа реализована на алгоритмическом языке C. Для создания исполняемого модуля использовался компилятор Microsoft Visual C++.

На рисунке 2.1 представлена главное окно графического интерфейса модуля управления контроллером температуры LS331. В этом окне также представлен доступ к управлению усилителем LIA7280, который необходим для измерения сопротивления джозефсоновского перехода от температуры, и с которым осуществляется связь через интерфейс GPIB.. Для доступа к параметрам контроллера LS331 необходимо выбрать в панели Devices это устройство и нажать кнопку Setup.

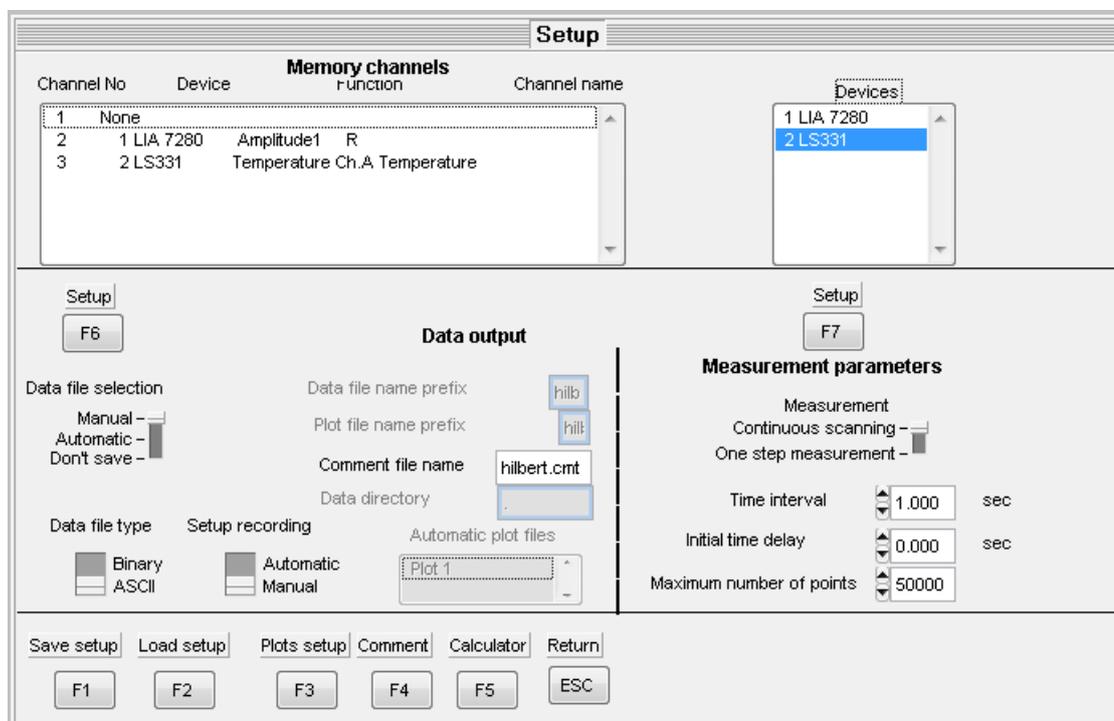


Рисунок 2.1 - Главное окно графического интерфейса модуля для управления контроллером LS331.

На рисунке 2.2 представлено окно управления устройством LS331. В этом окне задаются следующие параметры интерфейса RS232, необходимые для связи с устройством:

RS232 port – номер порта на компьютере;

Boud rate – скорость передачи данных;

Timeout – время ожидания ответа от устройства;

Time delay – минимальный интервал времени между подачей команды на устройство и запросом на приём данных.

Для управления устройством используются следующие кнопки:

Set temperature – переход в окно управления заданием температуры;

Send command to device – переход в окно подачи команды на устройство в ручном режиме;

Return – закрывает данное окно.



Рисунок 2.2 - Окно управления устройством LS331.

При нажатии кнопки **Set temperature** открывается окно задания точки стабилизации температуры (рисунок 2.3). Элемент управления **Current setting** показывает текущее значение точки стабилизации температуры. С помощью этого элемента можно также задавать значение точки стабилизации температуры, введя нужное значение и нажав **Enter**. Элемент управления **Initial setting** устанавливает значение точки стабилизации температуры при запуске программы.

Группа элементов **Scanning parameters** устанавливает параметры, используемые при сканировании температуры.

Элементы управления **Minimal temperature** и **Maximal temperature** устанавливают минимальную и максимальную температуры при сканировании.

Элемент управления **Temperature step** устанавливает шаг температуры при сканировании.

Элемент управления **Time delay** устанавливает время стабилизации температуры после установки точки стабилизации.

Элемент управления **At boundary** устанавливает поведение программы при достижении температуры минимального или максимального значения.

Значение **Stop** приводит к остановке сканирования,

Значение **Reverse step** приводит к продолжению сканирования в обратном направлении.

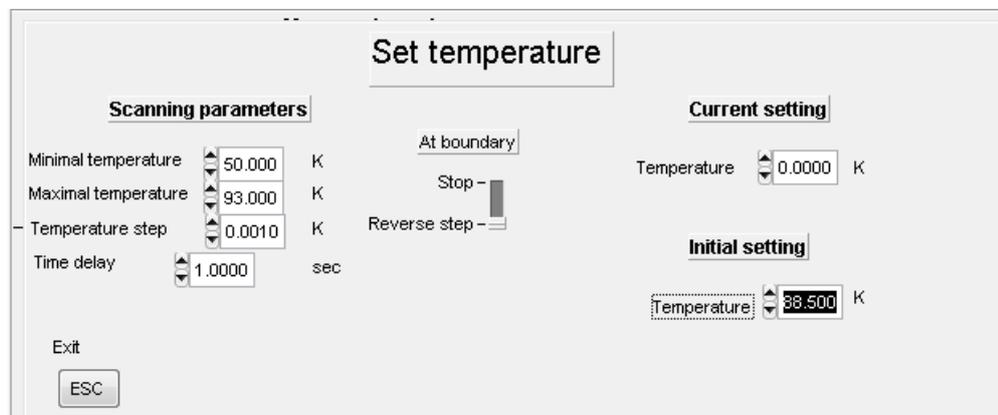


Рисунок 2.3 - Окно задания точки стабилизации температуры устройства LS331.

Разработанный программный модуль позволяет также производить измерение зависимости сопротивления джозефсоновского перехода от температуры $R(T)$. Такие измерения необходимы для тестирования джозефсоновских переходов и их отбора для работы в качестве активных элементов джозефсоновского анализатора цепей. Зависимость сопротивления от температуры показывает критическую температуру материала джозефсоновского перехода и степень его неоднородности. Пример измеренной с помощью разработанного программного модуля зависимости $R(T)$ приведён на рисунке 2.4.

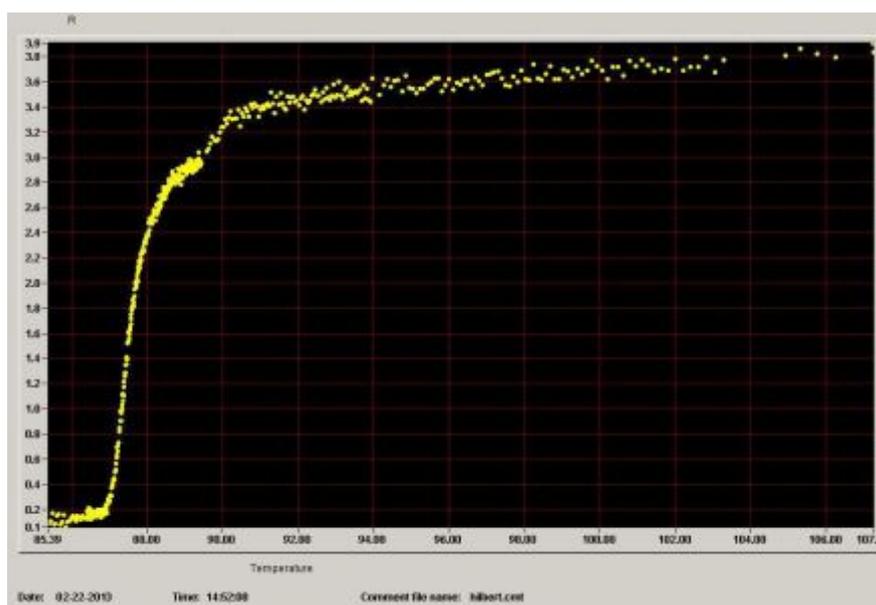


Рисунок 2.4 - Графическое окно с результатами измерения зависимости сопротивления джозефсоновского перехода от температуры.

2.2 Определение значений характеристического напряжения и сопротивления в нормальном состоянии джозефсоновских переходов.

Для определения параметров джозефсоновских переходов, используемых в макете в качестве чувствительных элементов были произведены измерения вольтамперных характеристик образцов. Результаты приведены на рисунке 2.5, 2.6.

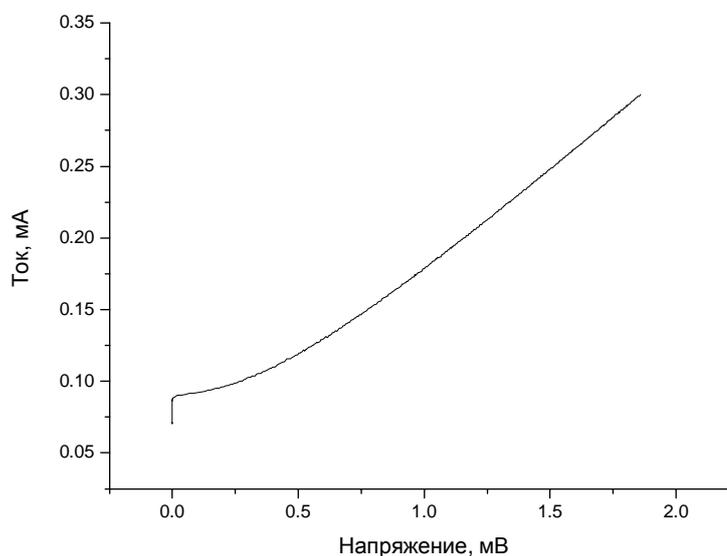


Рисунок 2.5 – Вольтамперная характеристика образца джозефсоновского перехода №1 при температуре 4.5 К.

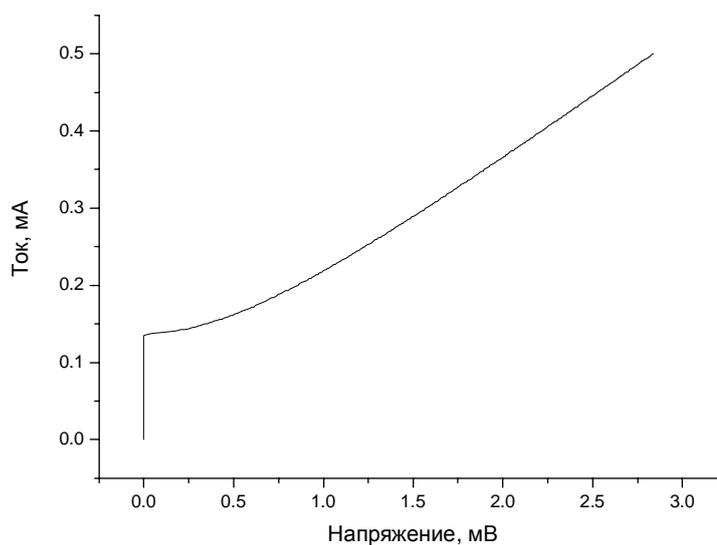


Рисунок 2.6 – Вольтамперная характеристика образца джозефсоновского перехода №2 при температуре 4.5 К.

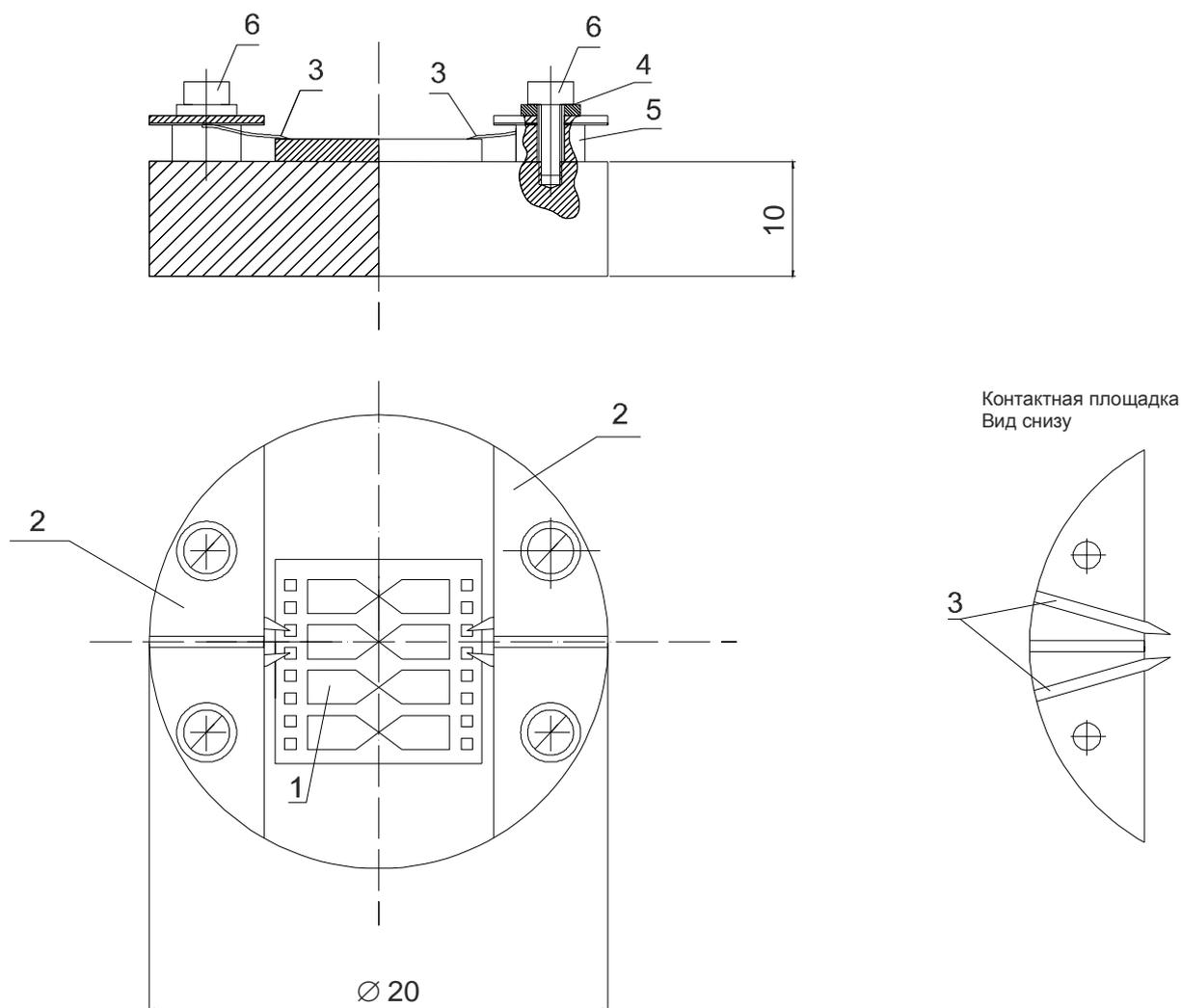
Из полученных зависимостей вычислялся критический ток I_c , сопротивление в нормальном состоянии R_n и характеристическое напряжение $V_c = I_c R_n$. Полученные данные приведены в таблице 2

Таблица 2-Параметры джозефсоновского перехода при температуре 4.5 К.

Номер образца	Критический ток при T=4.5°K (мкА)	Сопротивление в нормальном состоянии при T=4.5 °K (Ом)	Характеристическое напряжение (мкВ) при T=4.5 °K
1	91	5.9	536.9
2	138	6.1	841.8

2.3 Изменение конструкции подводящих контактов к активному элементу в части обеспечения компенсации изменения размеров активного элемента при тепловом расширении.

В соответствии с замечанием, сделанным в процессе исследовательских испытаний макета джозефсоновского анализатора цепей были внесены изменения в держатель образца. Материал NdGaO₃, из которого изготовлена подложка активного элемента, и фосфористая бронза, из которой изготовлены подводящие контакты, имеют существенно различающиеся по величине коэффициенты линейного расширения. В использовавшейся ранее конструкции подводящие контакты из-за недостатка места на держателе активного элемента жёстко прижимались к контактным площадкам активного элемента. Это приводило к нарушению контакта при охлаждении в случае слабого прижима, и существовала опасность разрушения активного элемента после нескольких термоциклирований в случае сильного прижима. Новая конструкция держателя активного элемента представлена на рисунке 2.7. Подводящие контакты (3) расположены снизу контактных площадок (2), которые изготовлены из фольгированного стеклотекстолита, и крепятся к ним пайкой. Такое расположение позволяет изогнуть подводящие контакты под малым углом таким образом, чтобы обеспечить достаточно мягкое пружинящее соединение с активным элементом (1) при прижиге их винтами (6). При достаточно сильном прижиге может произойти изгиб подводящих контактов в обратную сторону и нарушение электрического контакта. Для предотвращения этого Диэлектрические втулки (5) ограничивают силу прижиге. Диэлектрические шайбы обеспечивают электрическую изоляцию контактных площадок.



1 – активный элемент, 2 – контактные площадки, 3 – подводящие контакты, 4 – диэлектрические шайбы, 5 – диэлектрические втулки, 6 – прижимные винты.

Рисунок 2.7-Эскиз держателя активного элемента.

2.4 Изменение конструкции усилителя переменного сигнала в части понижения шумов до $1 \text{ нВ/Гц}^{0.5}$

В связи с тем, что одной из фундаментальных особенностей бикристаллических джозефсоновских переходов является наличие шума $1/f$ [45], необходимо уменьшить его влияние, повысив частоту измерений. В частности, это актуально для измерения слабо выраженных особенностей на зависимости дифференциального сопротивления ДП от напряжения. Таким образом, необходимо использовать высокочастотный мал шумящий усилитель. Кроме того, входное сопротивление усилителя должно быть достаточно высоким для того, чтобы можно было измерять характеристики ДП с сопротивлением в нормальном состоянии до 50 Ом. Ранее использовавшиеся схемы измерения, основанные на охлаждаемых транзисторных усилителях, работающих при температуре жидкого азота [46] имели входное

сопротивление менее 100 Ом. С применением резонансного трансформатора можно обеспечить достаточно большой входной импеданс на высоких частотах. Коэффициент усиления и число витков обмоток трансформатора были выбраны исходя из оптимизации шумового фактора (шумовой фактор был оптимизирован для входного сопротивления 10 Ом).

Для повышения резонансной частоты трансформатора возникла необходимость минимизировать емкость, которая определяется собственной емкостью вторичной обмотки, усилителя, подводящих проводов и т. д. В целях оптимизации емкости трансформатора использовалась секционная обмотка, проводилась минимизация емкости подводящих проводов. Для повышения добротности использовался тороидальный сердечник из высокочастотного феррита с малыми потерями. Трансформатор был помещен в магнитный и электростатический экраны. Схема усилителя приведена на рисунке 2.8.

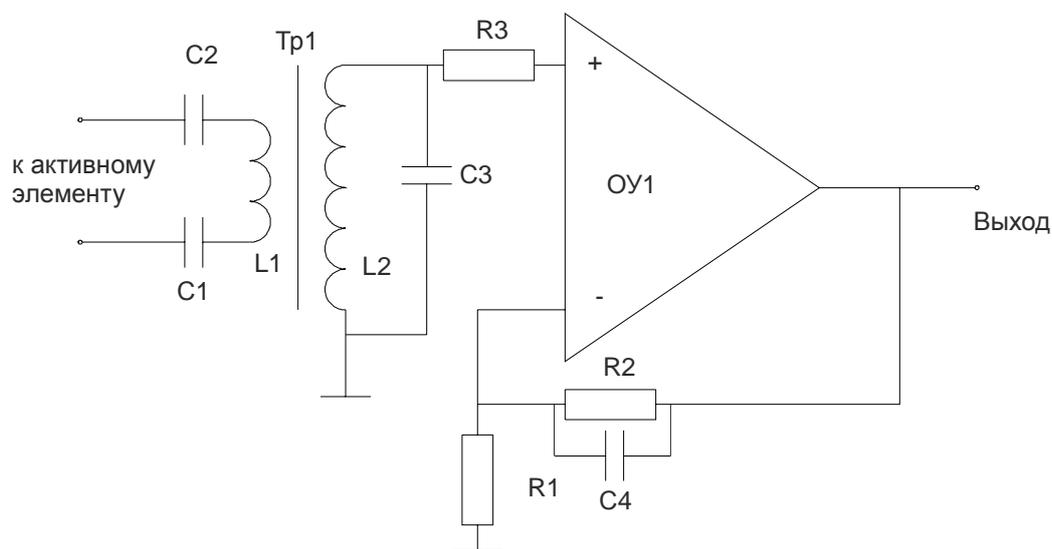


Рисунок 2.8 - Схема усилителя переменного сигнала.

В целях уменьшения емкости усилителя использовалась микросхема LM6624 с малой входной емкостью 0.9пФ (OU1), а монтаж проводился при помощи SMD (surface mount device- компонент для поверхностного монтажа) компонент. А схеме использовались электронные компоненты следующих номиналов:

C1, C2 – 1 мкФ, C3 – 27пФ, C4 -10 пФ, R1-3 Ом, R2 – 100 Ом, R3 – 1 Ом,

В связи с тем, что полоса пропускания операционного усилителя составляет 1.5 ГГц, а получившийся колебательный контур обладает достаточно высокой добротностью, была велика вероятность возбуждения схемы. Для обеспечения стабильности работы схемы и уменьшения паразитных токов ставились дополнительные конденсаторы и дополнительный резистор на выходе, а также был несколько уменьшен коэффициент усиления. Таким

образом, разработан усилитель с резонансным трансформатором для измерений слабовыраженных особенностей ВАХ бикристаллических джозефсоновских переходов из ВТСП материалов со следующими характеристиками: резонансная частота 282 кГц, коэффициент усиления 842, уровень шума 0.5 нВ/Герц^{1/2}, входной импеданс 551 Ом, полоса пропускания 18 кГц.

Разработанный усилитель предназначен для измерения дифференциального сопротивления. Сигнал с его выхода подаётся на усилитель с синхронным детектированием PAR 7280. Достигнутая величина входного сопротивления малозумящего измерительного усилителя позволяет измерять дифференциальное сопротивление в диапазоне 0.1-50 Ом, при этом относительная погрешность измерения составляет не более 5%

2.5 Доработка эскизной конструкторской документации

В связи с изменением конструкции усилителя переменного сигнала произведена доработка эскизной конструкторской документации. В частности, внесены изменения в схему электрическую функциональную 02699085.468162.001 Э2 в части изменения схемы усилителя переменного сигнала. Доработанная схема представлена на рисунке 2.9.

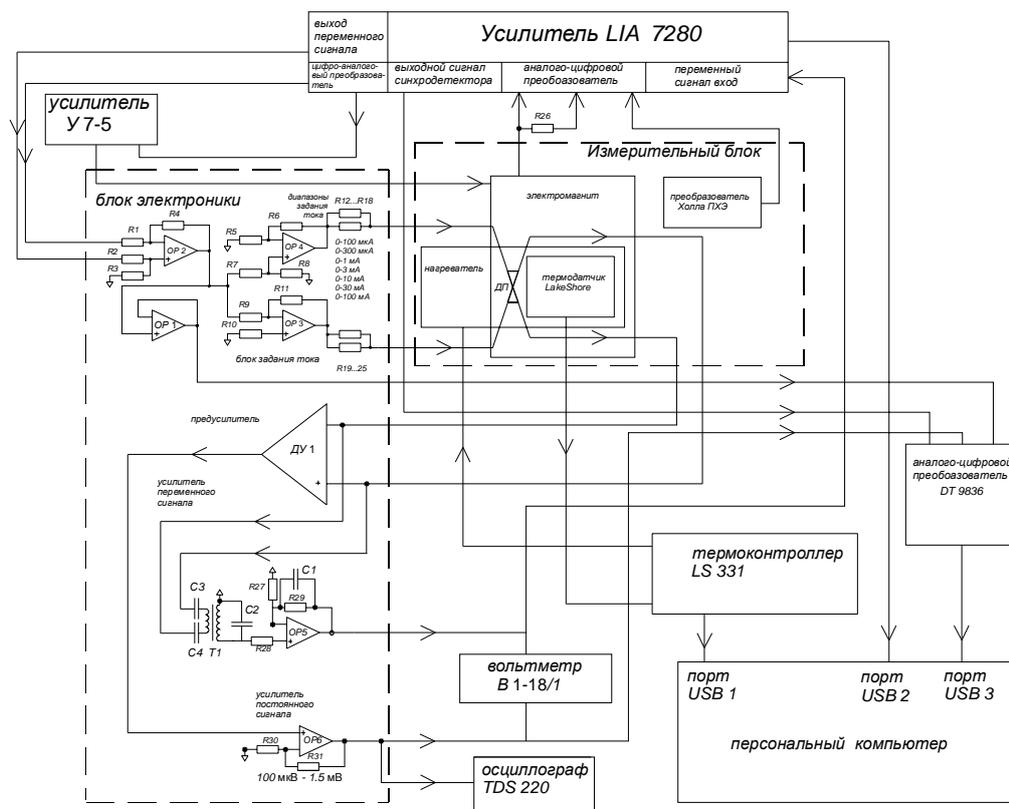


Рисунок 2.9-Схема электрическая функциональная макета джозефсоновского анализатора цепей.

Также внесены изменения в Перечень элементов 02699085.468162.001 ПЭ2:

—изменены номиналы резисторов R27, R28, R29 и конденсатора C1;

—добавлены конденсаторы C2, C3 и C4;

—добавлен трансформатор T1;

—изменён номинал операционного усилителя ОП5.

2.6 Доработка программного обеспечения в части автоматического определения действительной и мнимой частей адмиттанса исследуемого объекта после сканирования.

При измерении параметров электромагнитных структур с низкой добротностью, а также в режиме слабой связи активного элемента джозефсоновского анализатора цепей с исследуемой структурой анализ данных измерений может быть проведён с использованием простой аналитической формулы [32]:

$$\Delta \bar{V} = R_n^2 \left[(I - \sqrt{I^2 - I_c^2}) \operatorname{Re} Y(\omega_V) - IY(0) \right], \quad (1)$$

где $Y(\omega)$ – Фурье-компонента адмиттанса джозефсоновского перехода, зависящая от частоты

ω , $\omega_V = \frac{2e\bar{V}}{\hbar}$, I – ток через джозефсоновский переход, I_c – критический ток

джозефсоновского перехода, R_n – сопротивление в нормальном состоянии джозефсоновского перехода, \bar{V} – напряжение смещения на джозефсоновском переходе.

С помощью (1) можно получить действительную часть адмиттанса из данных измерений.

Мнимая часть адмиттанса связана с действительной преобразованием Гильберта:

$$\operatorname{Im} Y(\omega) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\operatorname{Re} Y(\omega')}{\omega - \omega'} d\omega' \quad (2)$$

Алгоритм восстановления комплексного частотно-зависимого адмиттанса исследуемой структуры по его действительной части включает в себя алгоритм предварительной сглаживающей аппроксимации исходного сигнала и алгоритм преобразования Гильберта.

Для обработки данных измерений джозефсоновского анализатора цепей был выбран метод, использующий аппроксимацию В-сплайнами. Предлагаемый алгоритм численного преобразования Гильберта использует аппроксимацию функции $\operatorname{Im} Y(V)$ набором специальных функций $\widehat{B}_{ik}(V)$:

$$\operatorname{Im} Y(V) = \sum_{i=1}^M C_i \widehat{B}_{ik}(V), \quad (3)$$

где функции $\widehat{B}_{ik}(V)$ являются Гильберт-преобразованными В-сплайнами $B_{ik}(\omega)$ порядка k :

$$\widehat{B}_{ik}(V) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_{ik}(\omega)}{\omega - V} d\omega, \quad (4)$$

$B_{ik}(\omega)$ - В-сплайн порядка k , M – размерность функционального базиса.

Коэффициенты C_i в разложении (3) находятся методом наименьших квадратов, как минимум функционала:

$$\Phi(C_1, \dots, C_M) = \sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^M C_j \widehat{B}_{jk}(V_i) - g(V_i) \right]^2 \quad (5)$$

Указанный алгоритм был реализован в программном модуле SDView, осуществляющем быструю обработку данных измерений для оценки действительной и мнимой частей измеренного импеданса и включенном в состав программы управления процессом измерений и сбора данных. При этом производится предварительная обработка данных, заключающаяся в сглаживании и экстракции действительной части адмиттанса. Затем производится преобразование Гильберта, и вычисление мнимой части адмиттанса. С помощью графического интерфейса пользователь может задавать параметры обработки данных, осуществлять визуальный контроль полученных результатов и сохранять данные в виде файла с данными и графических файлов. Интерфейс реализован под систему Win32 (Windows XP/7) с использованием библиотеки MFC и Windows API. Пример графических окон, представляющих данные измерений, приведён на рисунке 2.10.

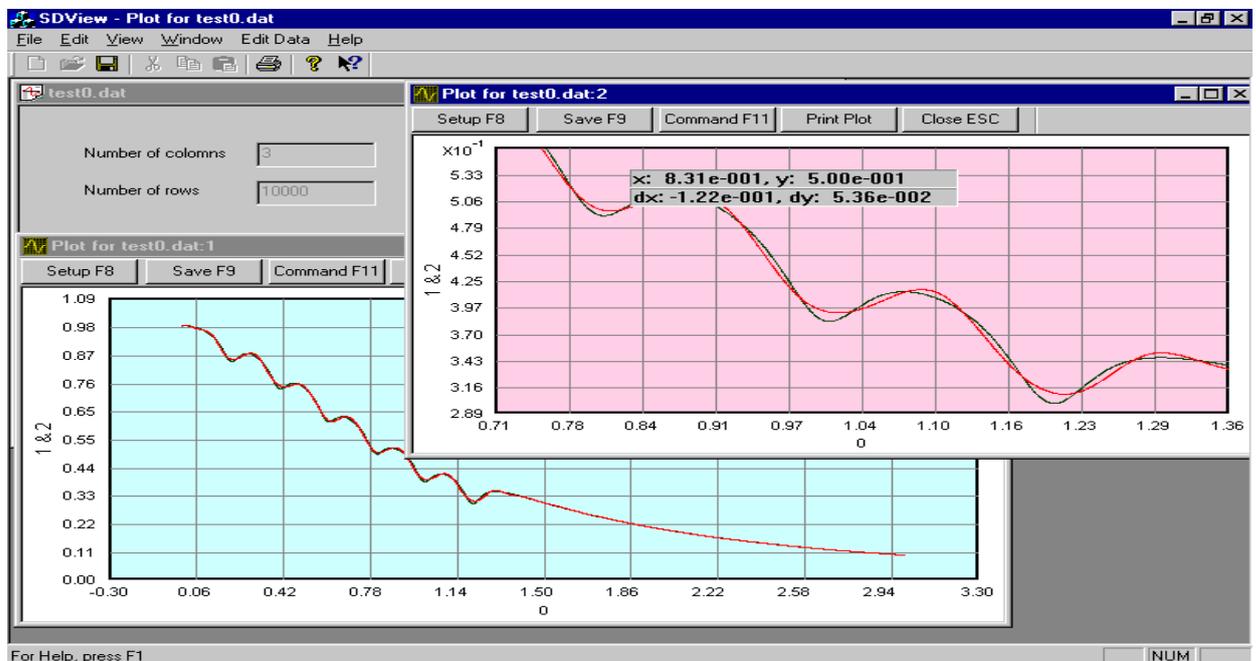


Рисунок 2.10 - Графический интерфейс программного модуля для быстрой оценки действительной и мнимой частей адмиттанса электромагнитных объектов с помощью преобразования Гильберта.

3 Обобщение и оценка результатов

3.1 Введение

В ходе разработки метода анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии были выполнены исследования по следующим основным направлениям:

- разработка теоретических основ метода;
- разработка технологии изготовления чувствительных элементов джозефсоновского анализатора цепей на основе бикристаллических джозефсоновских переходов из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.
- разработка, изготовление и испытания макета джозефсоновского анализатора цепей.

3.2 Разработка теоретических основ метода

3.2.1 Анализ текущего состояния проблемы и обоснование выбранных методов и средств

В ходе разработки теоретических основ метода были сделаны обзоры современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей рассматриваемую проблему. Была также проведена сравнительная оценка вариантов возможных решений исследуемой проблемы. В обзорах была проанализирована потребность в разработке новых методов анализа электромагнитных структур в терагерцовом диапазоне частот. В частности, были рассмотрены актуальные в настоящее время проблемы согласования широкополосных антенн терагерцового диапазона частот с детекторами, для которого требуется измерения частотно-зависимого импеданса. Похожие проблемы возникают при проектировании микросхем терагерцового диапазона частот. Важным фактором являются малые размеры электромагнитных элементов терагерцовой электроники (1-100 мкм), что затрудняет применение традиционных методов анализа. Были проанализированы основные физические принципы, которые лежат в основе существующих в настоящее время методов анализа цепей в терагерцовом диапазоне частот:

- генерация гармоник с помощью полупроводниковых умножителей;
- спектроскопия с разрешением по времени (time-domain spectroscopy);
- спектроскопия с непрерывной развёрткой по частоте (continuous-wave spectroscopy);
- генераторы на основе транзисторов субтерагерцовых частот и анализ цепей “на кристалле” (on-chip network analysis).
- спектроскопия на основе нестационарного эффекта Джозефсона.

На основе анализа были показаны основные преимущества метода джозефсоновской спектроскопии адмиттанса объекта, разработке которого в основном посвящён проект. Прежде всего, он обладает всеми достоинствами метода анализа “на кристалле”, т.е. все электромагнитные процессы при терагерцовых частотах имеют место только вблизи активной области чувствительного элемента размерами менее 1 мкм, а за пределами этой области на контактные площадки подаются и с них снимаются низкочастотные сигналы, содержащие информацию о высокочастотных характеристиках исследуемого объекта. Поэтому данный метод может применяться для анализа электромагнитных структур микронных размеров, какие по большей части и используются в терагерцовой электронике. Кроме того, метод не требует использования внешних источников излучения. По сравнению с существующими методами анализа “на кристалле” разрабатываемый метод имеет существенно большую полосу непрерывной перестройки по частоте.

Были проанализированы также возможности применения джозефсоновской спектроскопии для исследования объектов достаточно крупных размеров, такие, как волноводные структуры. Это можно осуществить, используя внешние источники излучения и сверхпроводящие широкополосные и частотно-селективные детекторы. Был сделан обзор известных механизмов детектирования, используемых в сверхпроводящих детекторах:

- наноболометры, работающие на краю сверхпроводящего перехода (Transition-edge sensors, TES);
- болометры на холодных электронах (cold-electron bolometers, CEB);
- детекторы на кинетической индуктивности (kinetic-inductance detectors, KID);
- детекторы на джозефсоновской гетероструктуре;
- детекторы на бикристаллических джозефсоновских переходах.

Также был сделан обзор технологических методов изменения параметров бикристаллических джозефсоновских переходов из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, которые предполагалось использовать в проекте.

На основании обзора и анализа текущего состояния проблемы было представлено обоснование выбранных методов и средств, направления исследований и способов решения поставленных задач.

Анализ характеристик электромагнитных структур предполагалось осуществлять с использованием бикристаллических джозефсоновских переходов из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

Для изготовления бикристаллических джозефсоновских переходов из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, используемых как активные элементы разрабатываемого устройства, предполагалось разработать технологические методы изготовления, обеспечивающие заданные параметры.

Разрабатываемые методы должны обеспечить как изготовление новых, так и изменение параметров изготовленных ранее образцов.

Для расширения частотного диапазона предполагалось исследовать возможности изменения параметров активного элемента устройства в процессе измерения изменением температуры и внешнего магнитного поля.

Для определения оптимальных параметров активного элемента предполагалась разработка новых математических методов и проведение математического моделирования.

Для сбора и обработки данных измерений предполагалась разработка соответствующих алгоритмов и программного обеспечения.

3.2.2 Выбор типа и определение оптимальных условий работы активного элемента

Для выбора типа и определения оптимальных условий работы активного элемента были разработаны математические методы для применения в моделировании сверхпроводящих структур. В частности, были разработаны аналитические и численные методы расчета зависимостей реактивного отклика распределенных и сосредоточенных сверхпроводящих структур от частоты и амплитуды принимаемого терагерцового электромагнитного излучения, модифицирующего как функцию распределения квазичастиц по энергии в сверхпроводящем абсорбере, так и когерентные характеристики сверхпроводящего абсорбера. В рамках этой задачи были получены следующие результаты:

—выведено кинетическое уравнение сверхпроводника, находящегося под воздействием электромагнитного излучения терагерцовых частот и на основе него получены спектральные функции для случая абсорбера в виде узкой и длинной плёнки, по которой протекает ток смещения, близкий по величине к току распаривания:

—выведена формула для кинетической индуктивности плёнки в случае произвольного вида спектральных функций;

—сформулирован метод расчёта поправок к спектральным функциям для случая «грязной» плёнки;

—выведено выражение, выражающее свободную энергию сверхпроводника через функции Грина теории Узаделя, необходимый для расчёта порогов свободной энергии для термодинамических и квантовых флуктуаций параметра порядка в сверхпроводниковых детекторах терагерцового излучения;

—в пределе больших магнитных полей выведено нелинейное уравнение Гинзбурга-Ландау, описывающее состояние одномерной «грязной» нанопроволоки. Получено выражение для порога свободной энергии для флуктуации проскальзывания фазы.

С использованием полученных результатов было проведено математическое моделирование различных типов сверхпроводящих структур, используемых для частотного анализа и получены следующие результаты:

—для абсорбера в виде «грязной» сверхпроводниковой плёнки показано, что при низкой температуре единственной причиной изменения спектральных функций является изменение параметра порядка;

—показано наличие конкретного специфического вклада в полный импеданс TES, который обусловлен существованием джозефсоновской генерации, и его резонансный характер может, при соответствующем выборе материалов и геометрии датчиков, обеспечить прием высокочастотных сигналов, в том числе и в терагерцовой области;

—рассчитана ампер-ваттная чувствительность и эквивалентная мощность шума SINIS детектора в реальной геометрии и показано, что значение эквивалентной мощности шума может достигать $NEP \approx 6 \cdot 10^{-20} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$;

—сделана оценка обусловленных проскальзыванием фазы шумов детектора на кинетической индуктивности и сверхпроводникового однофотонного детектора и показано, что в таких устройствах значение эквивалентной мощности шума может достигать $NEP \approx 10^{-16} \text{ Вт} / \text{Гц}^{1/2}$ при температуре жидкого гелия.

Было проведено теоретического исследования путей создания методики измерения частотно-зависимых параметров элементов терагерцовой электроники и телекоммуникационных устройств с использованием джозефсоновской спектроскопии. Аналитические формулы для изменения ВАХ джозефсоновского перехода под влиянием исследуемой электромагнитной структуры были получены в приближениях слабой связи джозефсоновского перехода с исследуемой электромагнитной структурой и большого тока смещения через джозефсоновский переход. Из результатов исследования следует, что измерение поправок к вольтамперной характеристике джозефсоновского перехода, вызванных влиянием присоединенных к нему электронных элементов с зависящим от частоты адмиттансом дает информацию о величине этого адмиттанса. В поправки входят Фурье-компоненты адмиттанса при частотах, связанных с напряжением на джозефсоновском переходе соотношением Джозефсона. Таким образом, измеряя поправки к вольтамперной характеристике джозефсоновского перехода в зависимость от напряжения, можно получить информацию о частотной зависимости адмиттанса. В случае слабой связи, когда адмиттанс внешнего элемента мал, поправка к току через джозефсоновский переход при заданном напряжении пропорциональна действительной части адмиттанса внешнего элемента при соответствующей частоте. Зная зависимость действительной части адмиттанса от частоты,

можно, используя соотношение Крамерса-Кронига восстановить зависимость мнимой части адмиттанса от частоты.

3.2.3 Компьютерная программа для моделирования джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения и восстановления схемных параметров электромагнитного окружения

Для моделирования джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения и восстановления схемных параметров электромагнитного окружения была разработана компьютерная программа [47]. Программа позволяет вычислять вольтамперную характеристику и дифференциальное сопротивление джозефсоновского перехода с подключенными к нему внешними электромагнитными элементами. Для вычисления используется представление джозефсоновского перехода в виде эквивалентной схемы в рамках резистивной модели [33]. Внешние электромагнитные элементы представлены в виде эквивалентной схемы, состоящей из произвольного числа резонансных RLC контуров. При этом учитываются тепловые флуктуации тока нормальных квазичастиц в виде источников δ -коррелированного флуктуационного тока, подключенных параллельно всем элементам схемы с активным импедансом. В этом случае вычисления сводятся к решению системы стохастических дифференциальных уравнений. Программа позволяет производить восстановление эквивалентной схемы электромагнитного окружения джозефсоновского перехода путем подгонки вычисленных характеристик джозефсоновского перехода (в частности, вольтамперной характеристики) к измеренным. Из эквивалентной схемы в дальнейшем вычисляются частотные характеристики электромагнитного окружения [48].

3.2.4 Проведение математического моделирования характеристик джозефсоновского перехода с подключенной к нему электромагнитной структурой.

С использованием разработанного программного обеспечения было проведено математическое моделирование характеристик джозефсоновского перехода с подключенной к нему электромагнитной структурой. Электромагнитная структура была представлена в виде эквивалентной схемы, состоящей из набора последовательных колебательных контуров. Моделирование проводилось с учётом тепловых флуктуаций токов нормальных квазичастиц и при произвольной связи исследуемой системы с джозефсоновским переходом. По результатам моделирования установлено следующее:

—тепловые флуктуации тока нормальных квазичастиц приводят к появлению максимума на зависимости дифференциального сопротивления от напряжения $R_d(V)$ в области низких напряжений, ширина которого увеличивается с увеличением сопротивления в нормальном состоянии R_n ;

- напряжение , соответствующее этому максимуму определяет низкочастотную границу частотной полосы, в которой можно наблюдать резонансы электромагнитного окружения джозефсоновского перехода;
- увеличение сопротивления в нормальном состоянии при малых значениях приводит к возрастанию амплитуды особенности на кривой $R_d(V)$, связанной с резонансом, а при больших значениях – к уширению и уменьшению амплитуды;
- с ростом R_n увеличивается чувствительность метода, но ухудшается частотное разрешение, которое для $R_n=3$ Ом составляет 2 ГГц, а для $R_n=5$ Ом составляет 5 ГГц, следовательно, подбором R_n и подстройкой критического тока I_c можно добиться оптимальных значений чувствительности и разрешающей способности при частоте 40 ГГц, которая лежит в рабочей частоте традиционных коммерческих анализаторов цепей;
- переход от режима сильной к режиму слабой связи происходит при $R_e=R_n/3$, где R_e – сопротивление связи джозефсоновского перехода с исследуемой структурой;
- в режиме сильной связи в отсутствие флуктуаций тока нормальных квазичастиц скачек напряжения существует при любом значении добротности, но его величина возрастает с увеличением добротности, что соответствует увеличению частотной области параметрического резонанса;
- при достаточно высокой интенсивности флуктуаций параметрический резонанс при сильной связи отсутствует, и это позволяет при подборе соответствующей температуры проводить анализ сильно связанных систем.

3.2.5 Основные параметры и характеристики джозефсоновского анализатора цепей.

На основе теоретического анализа были определены основные параметры и характеристики джозефсоновского анализатора цепей:

Для джозефсоновских переходов, используемых в качестве активных элементов анализатора цепей, были выбраны следующие характеристики:

- в качестве материала джозефсоновского перехода был выбран $YBa_2Cu_3O_{7-x}$;
- в качестве материала подложки был выбран $NdGaO_3$;
- геометрия образцов джозефсоновских переходов была выбрана исходя из требований, предъявляемых измеряемыми структурами, конструктивными особенностями макета анализатора цепей и особенностями технологии изготовления бикристаллических переходов, при этом максимальные размеры образца составляют не более 15 мм, и один образец содержит 4 перехода;
- критическая температура тонкопленочных образцов из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ не должна быть ниже 85 К;

- сопротивление джозефсоновского перехода в нормальном состоянии определяется диапазоном перестройки по частоте и должно быть не менее 0.1 Ом и не более 50 Ом;
- отклонение вольтамперной характеристики джозефсоновского перехода от вольтамперной характеристики, описываемой резистивной моделью не должно превышать 5 % при температуре 78 К;

Параметры джозефсоновского анализатора цепей, использующий активные элементы с указанными характеристиками, должны удовлетворять следующим условиям:

- нижняя граница диапазона перестройки по частоте должна быть не более 100 ГГц, а верхняя граница – не менее 700 ГГц;
- минимальный размер элементов исследуемых электромагнитных структур должен быть не более 500 мкм;
- разрешение по частоте должно быть не хуже 5 ГГц;
- время сканирования в пределах диапазона перестройки по частоте должно быть не более 20 с;
- напряжение смещения на активном элементе должно быть в пределах 100 мкВ – 3 мВ по абсолютной величине;
- ток смещения в активном элементе должен быть в пределах 1 мкА – 100 мА по абсолютной величине;
- абсолютная погрешность измерения частоты не должна превосходить 300 МГц;
- относительная погрешность измерения дифференциального сопротивления активного элемента должна составлять не более 7%;
- флуктуации температуры активного элемента должны быть не более 1%;
- точность измерения температуры должна быть не хуже 0.1 К.

3.3 Разработка технологии изготовления чувствительных элементов джозефсоновского анализатора цепей на основе бикристаллических джозефсоновских переходов из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

Технология изготовления чувствительных элементов джозефсоновского анализатора цепей на основе бикристаллических джозефсоновских переходов из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ включала в себя изготовление бикристаллических подложек, выращивание гетероэпитаксиальных пленок (001) из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, контроль качества плёнок и изготовление переходов.

3.3.1 Изготовление бикристаллических подложек

В качестве материала подложки был выбран монокристалл неодима галлата.

Монокристаллы NdGaO_3 выращивались методом Чохральского достаточно большой диаметра (>50 мм) с высокой степенью кристаллического совершенства (полуширина кривой качания $\Delta\theta=0.005^\circ$)

Для осаждения гетероэпитаксиальных пленок (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ использовались подложки (110) NdGaO_3 .

В качестве опорной плоскости, от которой ведется отсчет равных по величине, но противоположных по знаку углов, составляющих бикристаллический угол, была выбрана плоскость (001) NdGaO_3 . Для получения бикристаллической границы подложки наименьшей ширины дискретные значения величин бикристаллических углов (углов разориентации) выбирались соответствующими возникновению так называемых границ частичного сопряжения, у которых вдоль границы совпадает каждый n атом ($n = 2\dots 5$). Изготовление бикристаллических подложек включало следующие технологические операции:

- ориентировку монокристалла NdGaO_3 методом рентгеновской дифрактометрии;
- ориентированную резку кристаллов NdGaO_3 на блоки заданной ориентации с точностью не хуже $10''$;
- шлифование сторон блока и последующую оптическую полировку его свариваемой поверхности (эта полировка должна обеспечить: плоскостность поверхности не более 0.25 кольца Ньютона, высоту ее шероховатости <10 нм и плоскопараллельность с противоположной стороной блока не хуже $10''$);
- финишную химико-механическую полировку в сепараторе свариваемой поверхности блока NdGaO_3 , (эта технологическая операция позволяет удалить остающийся после оптической (механической) полировки деформированный приповерхностный слой толщиной в несколько микрон, содержащий микротрещины, включения частиц абразива, следы пластического течения без ухудшения плоскостности и плоскопараллельности поверхности, а также значительно уменьшить (до $1\dots 2$ нм) ее шероховатость);
- химическую очистку свариваемой поверхности блока от органических и неорганических загрязнений;
- химическую обработку свариваемой поверхности для придания ей "гидрофильных" свойств;
- соединение блоков по свариваемым поверхностям за счет формирования вандерваальсовских сил притяжения, возникающих между гидрофильными поверхностями, когда расстояние между ними составляет несколько нанометров (эта операция производится в специально сконструированном устройстве, которое исключает возможность попадания каких-либо твердых частиц между соединяемыми поверхностями);

- термодиффузионную сварку уже соединенных блоков NdGaO_3 при $T=1400^\circ\text{C}$ и строго одноосном давлении 2000 н/см-;
- ориентированную резку "сваренных" блоков NdGaO_3 на бикристаллические подложки;
- шлифование и химико-механическую полировку бикристаллических подложек;
- финишную отмывку бикристаллических подложек от органических и неорганических загрязнений.

Изготовленные подложки были исследованы с помощью лазерной сканирующей микроскопии, микроскопии атомных сил и просвечивающей электронной микроскопии.

Важным фактором качества приготавливаемых бикристаллических подложек является плотность и размеры различного рода включений и пор в области бикристаллической границы, так как они приводят к формированию локальных кристаллических дефектов в ВТСП-пленке, которые существенно сказываются на качестве переходов. Удалось достигнуть плотностей субмикронных включений <1 на 100 мкм длины бикристаллической границы для подложек с углом разориентации $2 \times 14^\circ$.

3.3.2 Выращивание и исследование свойств гетероэпитаксиальных пленок (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Осаждение ВТСП-пленок на подложки из (110) NdGaO_3 осуществляли методом вакуумного катодного распыления мишени $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ стехиометрического состава на постоянном токе в кислороде. Определены оптимальные значения основных технологических параметров того процесса осаждения: температура подложки $780..,820^\circ\text{C}$, давление кислорода 300.. .400 Па, скорость осаждения 30.. .60 нм/ч. В указанных условиях осаждались гетероэпитаксиальные пленки (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на подложке (110) NdGaO_3 с толщинами 100...400 нм, высокой степенью кристаллического совершенства (полуширина кривой качания дифракционного пика (006) не более 0.12°), с критической температурой 91...92 К, плотностью критического тока $(1...3) \times 10^6 \text{ А/см}^2$

3.3.3 Изготовление переходов

Джозефсоновские переходы из пленок (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ изготавливали методом фотолитографии с использованием фоторезиста марки РМАО и химического травителя из 0.1% раствора брома в этаноле. Формировались мостики шириной 1...20 мкм, пересекающие бикристаллическую границу подложки под прямым углом.

3.3.4 Контроль качества плёнок и переходов

Интегральные измерения кристаллографического совершенства получаемых пленок контролировались с помощью рентгеновской дифракции. Однако, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ пленки, необходимые для приготовления качественных бикристаллических переходов, должны

обладать высокой локальной степенью кристаллографической однородности, которую дифракционные методы могут и не показать. Например, в случае с-ориентированных $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ пленок с малым содержанием а-ориентированных доменов того же материала, рентгеновский спектр (20 скан) практически не отличается от совершенной с-ориентированной пленки. Наличие же а-ориентированных доменов в области барьера перехода может существенно повлиять на транспортные свойства переходов. Поэтому, после интегральных рентгеновских исследований пленок на первых этапах отработки технологии их приготовления, большое внимание уделялось локальным методам исследованиям.

Детальные исследования наноструктуры изготовленных $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ пленок и переходов проводилось с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL 4000 EX

Морфология поверхности NdGaO_3 подложек, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ пленок и переходов изучалась соискателем с помощью микроскопа атомных сил PicoSPM (Molecular Imaging). В $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ пленках с-ориентированные и а-ориентированные зерна имеют различающуюся форму и легко отслеживаются с помощью этого микроскопа. Разрешение в вертикальном направлении позволяло визуализировать ступеньки роста высотой в единичный размер ячейки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ в с-направлении (1,167 нм). Разрешение в горизонтальном направлении определялось размерами острия и могло составлять порядка десятка нанометров.

Неоднородность электрических свойств полученных переходов исследовалась с помощью методики, основанной на лазерной сканирующей микроскопии с субмикронным разрешением.

3.3.5 Метод обратимого изменения параметров уже изготовленных джозефсоновских переходов, предназначенных для использования в качестве активных элементов в составе макета джозефсоновского анализатора цепей.

Низкотемпературный отжиг джозефсоновских переходов в вакууме и озон-кислородной смеси позволяет производить обратимое изменение параметров изготовленных джозефсоновских переходов для обеспечения оптимальной чувствительности и частотного разрешения джозефсоновского анализатора цепей, а также заданного диапазона перестройки по частоте. Для реализации этого метода была разработана и создана установка по низкотемпературному отжигу и проведены следующие исследования:

- влияния отжига на бикристаллические джозефсоновские переходы различных типов и с различными углами разориентации осей;
- влияния длительности отжига на изменение параметров джозефсоновских переходов;
- влияния температуры отжига на изменение параметров джозефсоновских переходов;

- влияния отжига на особенности вольтамперной характеристики джозефсоновского перехода, связанные с резонансами в присоединённой к нему электромагнитной структуре;
- эволюции зависимости дифференциального сопротивления джозефсоновского перехода от напряжения при отжиге;
- обратимости в изменении характеристик джозефсоновского перехода при последовательном отжиге в атмосфере озон – кислородной смеси и в вакууме.

В результате исследований были получены следующие результаты:

- отжиг в атмосфере озон-кислородной смеси при температуре T до 145°C не приводит к изменению критической температуры плёнок из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, изменяются только параметры слабой связи на границе зерен сверхпроводящего материала;
- малые времена отжига (до 10 мин) приводят к изменению критического тока и сопротивления в нормальном состоянии джозефсоновского перехода (до 70%) при постоянном значении характеристического напряжения;
- отжиг в атмосфере озон-кислородной смеси приводит к изменению свойств джозефсоновских переходов таким образом, что улучшается их соответствие резистивной модели;
- отжиг в течение 100 мин. При $T=100^{\circ}\text{C}$ приводит к уменьшению электромагнитных потерь в сверхпроводящих электродах джозефсоновского перехода на 60%;
- последовательный отжиг в атмосфере озон-кислородной смеси и в вакууме в течение до 30 мин обратимым образом изменяет сопротивление в нормальном состоянии (уменьшает и увеличивает, соответственно) и критический ток (увеличивает и уменьшает, соответственно);
- скорость изменения параметров бикристаллического джозефсоновского перехода увеличивается при увеличении угла разориентации кристаллографических осей в области бикристаллического шва;

Разработанная методика продемонстрировала возможность обратимого изменения параметров бикристаллических джозефсоновских переходов при отжиге в вакууме и озон-кислородной смеси с температурой до 140°C .

3.4 Разработка, изготовление и испытания макета джозефсоновского анализатора цепей

3.4.1 Лабораторные образцы бикристаллических джозефсоновских переходов, предназначенных для использования в качестве активных элементов в составе макета джозефсоновского анализатора цепей

Были изготовлены бикристаллические переходы из (001) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$,-плёнок на подложках (110) NdGaO_3 , с углами разориентации от $2 \times 10^{\circ}$ до $2 \times 18^{\circ}$. Наибольшая плотность

критического тока (до 2×10^4 А/см² при 77 К) была реализована у переходов с разориентацией $2 \times 14^\circ$. Переходы с такой разориентацией преимущественно использовались при создании чувствительного элемента джозефсоновского анализатора цепей..

У изготовленных бикристаллических переходов с шириной в диапазоне от 2 до 20 мкм значения проводимости R_n^{-1} и критического тока I_c обычно скалировались с шириной. Отклонения от линейного закона и повышенный разброс параметров наблюдались у переходов с шириной меньше нескольких единиц микрометров, что согласуется с данными по характеристической длине l_c для наших переходов. Переходы с шириной $w > l_c$, как правило, имели ВАХ, заметно отличающиеся от ВАХ резистивной модели, с избыточным током при больших смещениях и коленообразными особенностями при средних напряжениях порядка $I_c R_n$. Только переходы с шириной $w \approx l_c$ имели ВАХ, близкие к аналогичным характеристикам резистивной модели.

В результате выполнения всех технологических операций были отобраны два образца, каждый из которых содержит 4 джозефсоновских перехода.

Параметры изготовленных образцов приведены в таблице 3

Таблица 3-Параметры бразцов джозефсоновских переходов, используемых в качестве чувствительного элемента джозефсоновского анализатора цепей.

Номер образца	Критический ток (мкА)		Сопротивление в нормальном состоянии (Ом)		Характеристическое напряжение (мкВ)		Критическая температура (°К)
	T=4.5 К	T=78 °К	T=4.5 К	T=78 °К	T=4.5 К	T=78 °К	
1	91	13	5.9	6.1	536.9	78	89.5
2	138	20	6.1	6.3	841.8	126	91.5

Образцы успешно прошли исследовательские испытания и были признаны удовлетворяющими всем условиям, необходимым для использования образцов в качестве чувствительных элементов джозефсоновского анализатора цепей.

3.4.2 Разработка и изготовление макета джозефсоновского анализатора цепей.

Макет джозефсоновского анализатора цепей состоит из следующих частей:

- активного элемента на основе бикристаллического джозефсоновского перехода, в котором, осуществляется генерация и преобразования сигнала терагерцовой частоты;
- криогенного устройства, которое обеспечивает охлаждение активного элемента и магнитной системы до рабочей температуры;
- устройства поддержания заданной температуры;

- устройства управления полосой перестройки по частоте магнитным полем;
- устройства задания тока через активный элемент;
- устройства аналоговой обработки выходного сигнала;
- устройства управления и цифровой обработки выходного сигнала;
- компьютерной программы управления и обработки данных.

Первичная обработка данных измерений и визуализация результатов должны производиться с использованием программного обеспечения с открытым кодом GrAce.

Были проведены исследовательские испытания макета джозефсоновского анализатора цепей, в которых были определены значения его основных параметров.

- минимальный размер исследуемого объекта 160 мкм;
- нижняя рабочая частота 64.6 ГГц;
- верхняя рабочая частота 847 ГГц;
- разрешение по частоте 0.95 ГГц;
- время сканирования в пределах полосы перестройки частоты 18.6 сек.

3.5 Применение джозефсоновского анализатора цепей для анализа электромагнитных структур

3.5.1 Характеристика широкополосной логопериодической антенны.

Была измерена зависимость действительной части адмиттанса широкополосной логопериодической антенны от частоты (рисунок 3.1). Антенна имеет параметры $R_{n+1}/R_n=1.25$. На рисунке обозначено

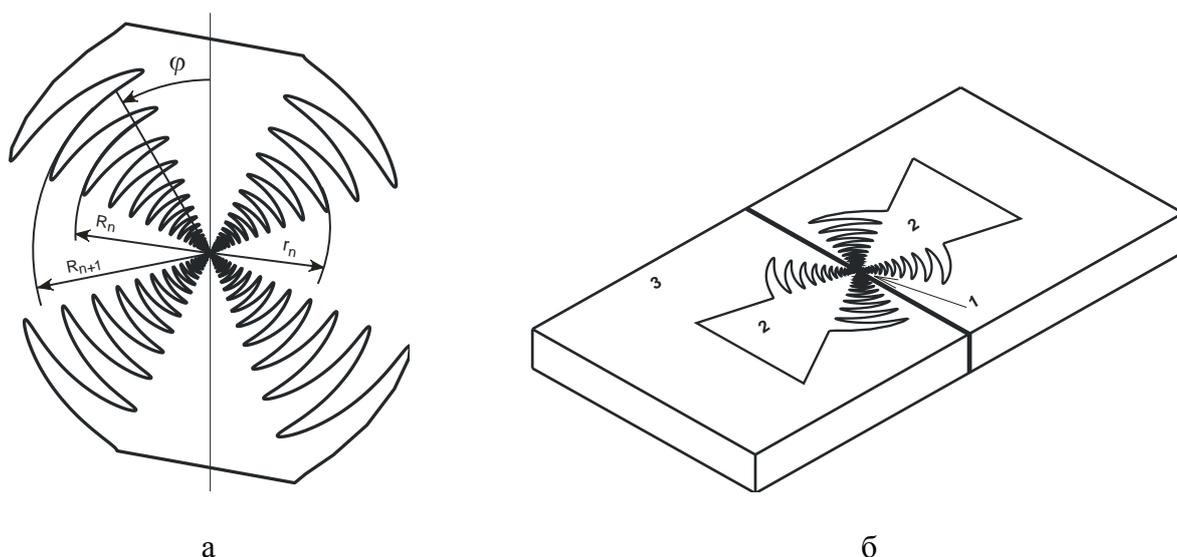
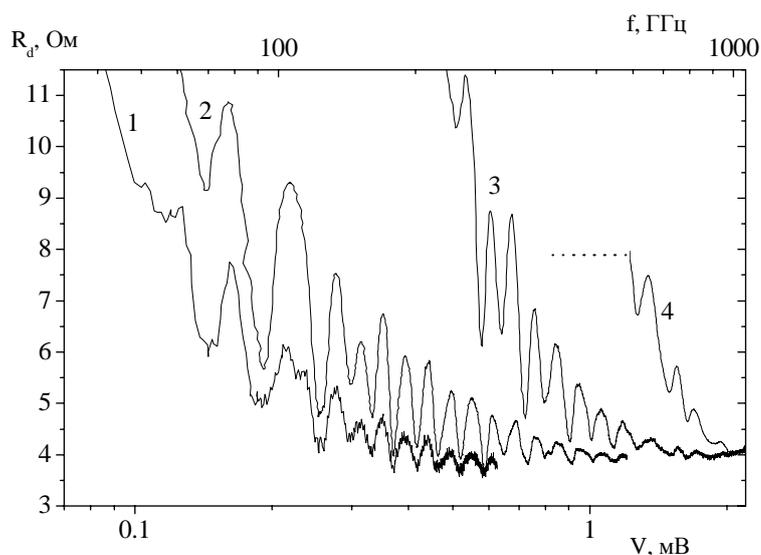


Схема антенны (а) и схема расположения антенны на подложке (б). 1 – бикристаллический шов, 2 – антенна, 3 – подложка из NdGaO₃.

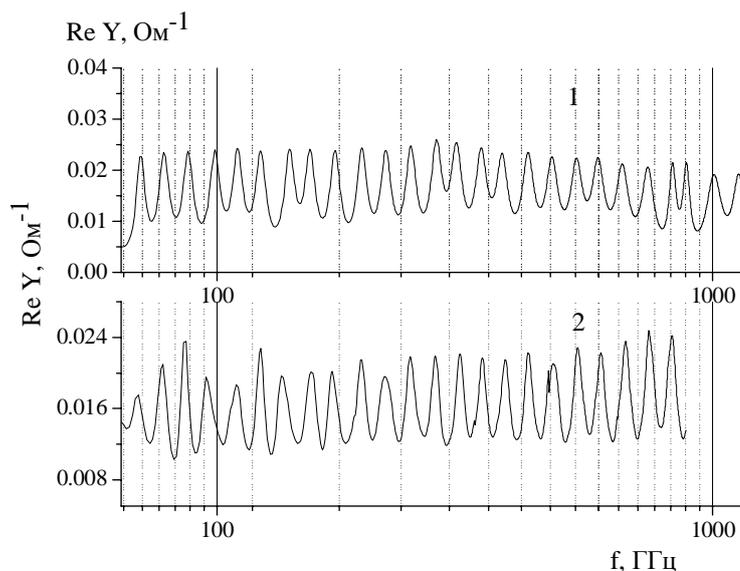
Рисунок 3.1 - Широкополосная планарная логопериодическая антенна терагерцового диапазона на подложке из NdGaO₃.

Ток задавался в диапазонах 0-100 мкА, 0-300 мкА, 0-1 мА, 0-3 мА, 0-10 мА, 0-30 мА, 0-100 мА. Относительная погрешность задания тока в каждом из диапазонов не превосходила 1%. Используя серию измеренных зависимостей $R_d(V)$ при различных значениях величины магнитного поля (рисунок 3.2), были определены спектральные характеристики антенны в широком частотном диапазоне: от 64 ГГц до 1130 ГГц. На рисунок 3.3 представлена измеренная действительная часть адмиттанса антенны в зависимости от частоты $\text{Re}Y(f)$ (кривая 1). Для получения характеристик использовалась компьютерная программа для математического моделирования джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения и восстановления схемных параметров электромагнитного окружения, разработанная в ходе выполнения данного проекта. На рисунке 3.3 (кривая 2) представлены результаты численного моделирования частотной зависимости действительной части адмиттанса $\text{Re}Y$ той же антенны, полученные с использованием Agilent Momentum и NEC (программа с открытым кодом). Абсолютная погрешность частоты при этом определялась точностью измерения напряжения, которая составляла 0.5 мкВ, что соответствует точности измерения частоты .250 МГц



Значения критического тока: 95 мкА (1), 120 мкА (2), 346 мкА (3), 467 мкА (4). $T = 5$ К.

Рисунок 3.2 - Зависимости дифференциального сопротивления от напряжения $R_d(V)$ джозефсоновского перехода из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, интегрированного с логопериодической антенной, при различных значениях критического тока, модифицированного внешним магнитным полем:



Экспериментальные данные. (1); данные компьютерного моделирования (2).

Рисунок 3.3 - Действительная часть адмиттанса логопериодической антенны $\text{Re}Y(f)$ в зависимости от частоты f

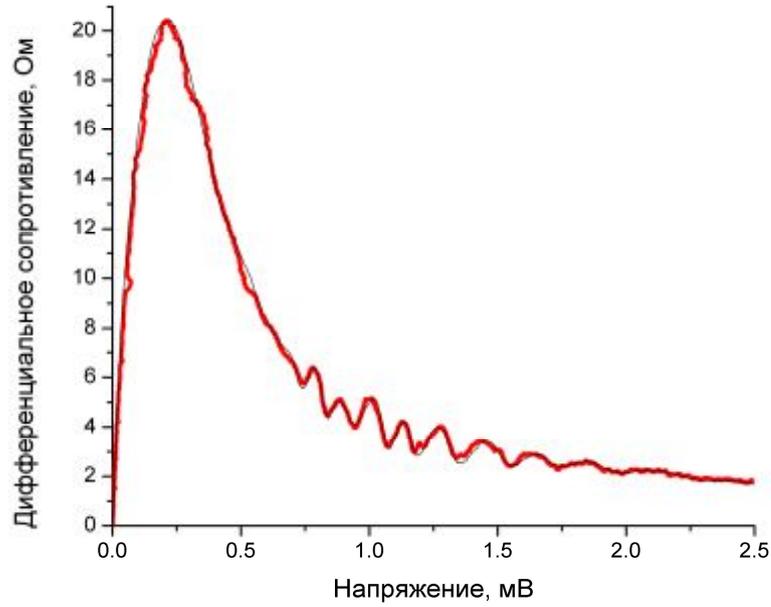
3.5.2 Эквивалентная схема широкополосной логопериодической антенны.

Была получены параметры эквивалентной схемы широкополосной антенны терагерцового диапазона частот. Антенна представляла собой логопериодическую структуру, представленную на рисунке 3.4. С каждой стороны крыла антенны расположены 25 элементов. Максимальный размер элемента составляет 500 мкм.



Рисунок 3.4 - Широкополосная антенна терагерцового диапазона частот.

На рисунке 3.5 представлены результаты измерения дифференциального сопротивления активного элемента джозефсоновского анализатора цепей от напряжения (красная кривая).



Результат измерений (красная кривая) и результат подгонки с использованием эквивалентной схемы (чёрная кривая).

Рисунок 3.5 - Зависимость дифференциального сопротивления активного элемента джоозефсоновского анализатора цепей от напряжения:

Антенну можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из набора последовательных колебательных контуров, каждый из которых представляет отдельный элемент антенны (рисунок 3.6).

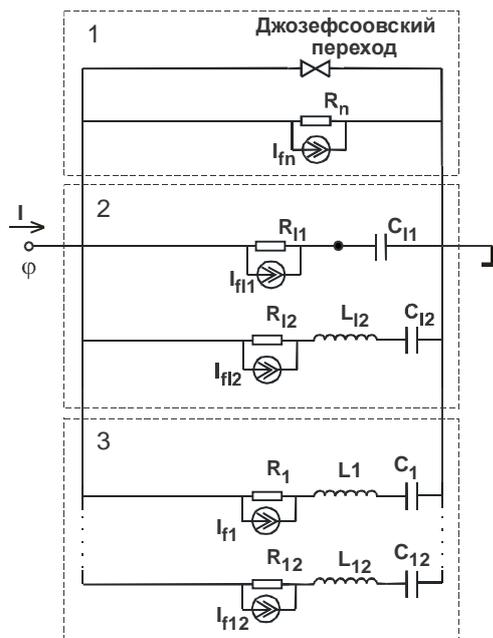


Рисунок 3.6 - Эквивалентная схема джоозефсоновского перехода с присоединённой к нему широкополосной логопериодической антенной.

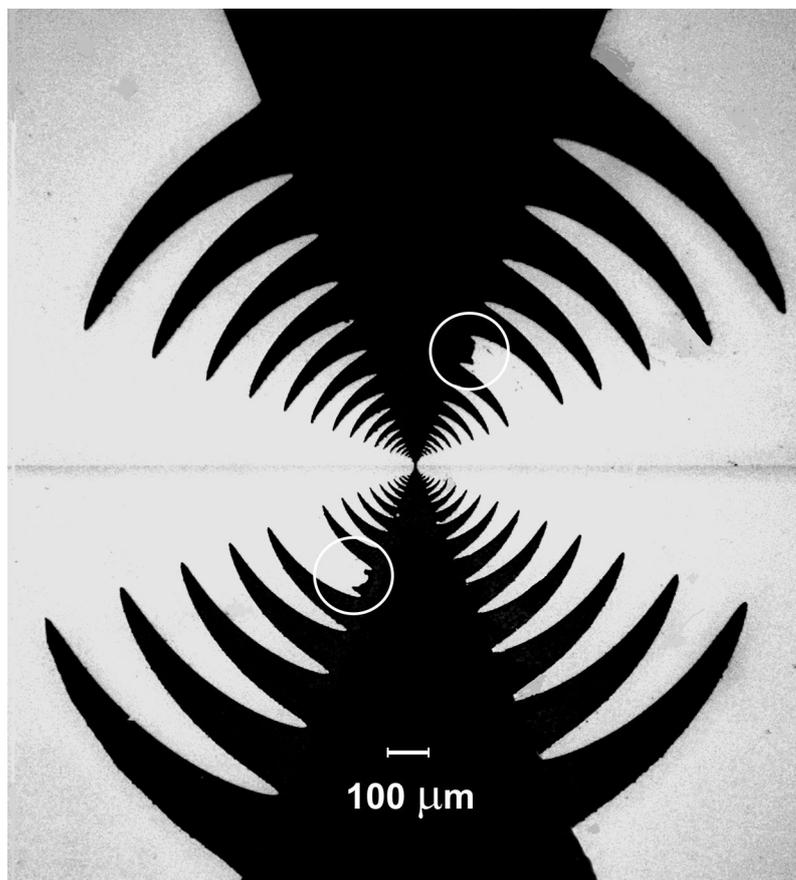
С использованием колебательного контура вычислялась аналогичная зависимость и подгонялась к измеренной зависимости. В качестве подгоночных параметров использовались параметры эквивалентной схемы. Для подгонки использовалась компьютерная программа для математического моделирования джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения и восстановления схемных параметров электромагнитного окружения, разработанная в ходе выполнения данного проекта. Результаты подгонки вычисленной зависимости к измеренной представлены на рисунке 3.2 чёрной кривой. Полученные при этом параметры эквивалентной схемы приведены в таблице 4. Эквивалентная схема может быть использована в полосе частот от 275 до 1070 ГГц.

Таблица 4-Параметры эквивалентной схемы логопериодической антенны

№ контура	Резонансная частота f_0 , ГГц	Добротность Q	Сопротивление R , Ом
1	275	20	70
2	312	20	70
3	350	25	47
4	397	33.3	40
5	443	8.33	75
6	509	14.3	50
7	563	14.3	57
8	637	10	45
9	732	8.7	42
10	823	8.33	46
11	927	5.9	28
12	1070	5	18

3.5.3 Характеристика логопериодической антенны с дефектом.

Был поведён анализ резонансной электромагнитной структуры, которая получается из широкополосной логопериодической антенны удалением одного элемента. В качестве основы использовалась антенна, аналогичная предыдущей, с удалёнными симметричным образом элементами. Удаление элемента в соответствии с принципом Бабинне-Буккеера должно приводить к появлению дополнительного резонанса в антенне. Структура изображена на рисунке 3.7.



Белыми кругами указаны удалённые элементы.

Рисунок 3.7 - Электромагнитная резонансная структура на основе широкополосной логопериодической антенны, использованная для демонстрации работы макета джозефсоновского анализатора цепей.

Результаты измерения зависимости дифференциального сопротивления активного элемента от напряжения при различных температурах приведены на рисунке 3.8. Пунктирным прямоугольником выделена область, в которой имеется особенность, связанная с дополнительным резонансом. Выбором оптимальной температуры 40К достигается максимальная чувствительность устройства.

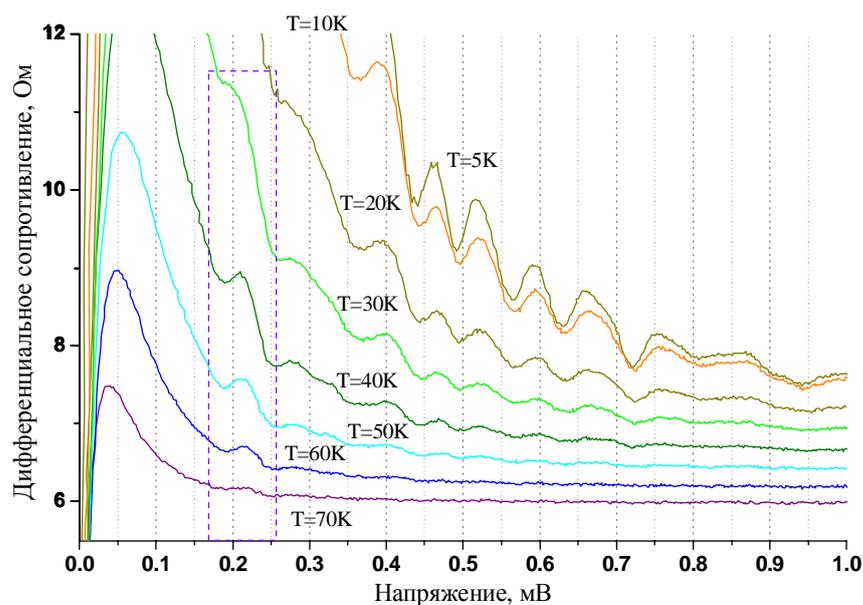
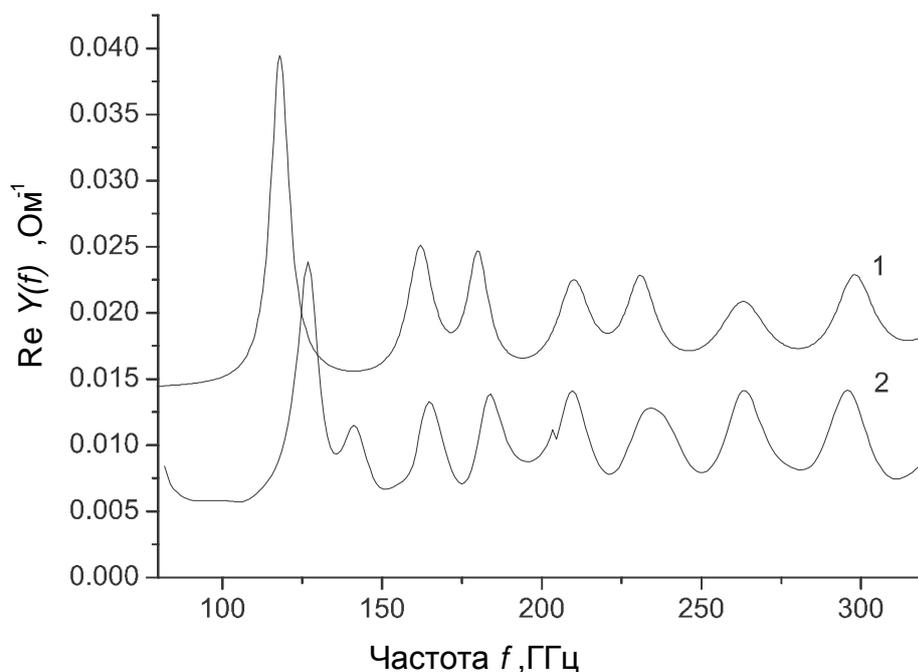


Рисунок 3.8 - Зависимость дифференциального сопротивления активного элемента джозефсоновского анализатора цепей от напряжения при различных температурах.

Из данных измерений был восстановлен адмиттанс структуры. Полученная характеристика приведена на рисунке 3.9. Для сравнения там же приведена характеристика, полученная для той же структуры моделированием с помощью программ Agilent Momentum и NEC (программа с открытым кодом). Различие в величине характеристического импеданса (40 Ом и данных измерений и 90 Ом из данных моделирования) объясняется тем, что при моделировании учитывалась только активная часть антенны. Остальная часть электромагнитного окружения, а также поглощение в материале и подложке дают существенный, медленно меняющийся с частотой вклад в действительную часть адмиттанса.



1 – результаты измерения, 2 – результаты моделирования.

Рисунок 3.9 - Зависимость действительной части адмиттанса резонансной структуры от частоты.

3.6 Преимущества разработанного метода по сравнению с уже существующими

По сравнению с существующими методиками предлагаемый обладает рядом преимуществ.

Разработанный метод продемонстрировал возможность непрерывного сканирование в диапазоне частот от 140 ГГц до 1070 ГГц, без использования ручной перенастройки волноводных трактов. Перестройка частотной полосы осуществляется магнитным полем в реальном времени. В то же время устройства, предлагаемые фирмой Agilent - PNA Millimeter-Wave Network Analyzer N5247A PNA-X, E8361C PNA имеют частотную полосу от 10 МГц до 110 ГГц и от 60 МГц до 110 ГГц соответственно. Верхнюю частотную границу в 110 ГГц имеет также предлагаемый фирмой Rohde & Schwarz векторный анализатор цепей R&S@ZVA, а фирма Anritsu EMEA предлагает устройство VectorStar Broadband VNA ME7838A с частотной полосой от 40 kHz до 125 GHz. Указанными приборами исчерпывается современный рынок широкополосных анализаторов цепей с рабочей частотой свыше 100 ГГц. Использование модулей производства Virginia diodes позволило увеличить верхнюю частотную границу устройства N5247A PNA-X до 1.1.ТГц. Однако это техническое решение имеет ряд серьезных недостатков. Частотная полоса модулей представляет собой набор узких частотных зон шириной 100-200 ГГц. Переход от одной зоны к другой сопряжён с перенастройкой высокочастотного тракта, а в некоторых случаях, и с заменой модуля. Так

у анализаторов цепей фирмы Agilent с устройствами расширения фирмы Virginia Diodes измерения осуществляются в 6 частотных диапазонах шириной 15% от центральной частоты диапазона, а переключение между диапазонами требует перенастройки генератора и волноводных трактов.

Отсутствие необходимости переключения диапазонов обеспечивает более высокую скорость измерений, сканирование всего частотного диапазона за время не более 20 сек, тогда как у анализаторов цепей фирмы Agilent на это требуется более 10 мин с учетом переключения диапазонов;

По сравнению с более низкими частотами миллиметрового диапазона, для которых возможно использование коаксиальных кабелей при тестировании объектов микроэлектроники, и оборудование достаточно дешёвое и простое в использовании, при более высоких частотах имеются определённые трудности в обеспечении согласования исследуемых объектов с внешним анализатором цепей, для чего используются многочисленные волноводные секции и специальные высокочастотные микрощупы. В этом случае возникают также сложности с интерпретацией полученных результатов, т.е., с экстракцией параметров исследуемых объектов из данных измерений. Фактически для реализации измерения таких объектов для существующих на рынке анализаторов цепей требуется дорогостоящее дополнительное оборудование и специальные методы экстракции данных. Предлагаемый метод реализует измерения “на кристалле”, когда вся высокочастотная часть измерений реализована в чувствительном элементе, а между чувствительным элементом и тестовым оборудованием необходим только низкочастотный интерфейс.

Стоимость существующих анализаторов цепей фирмы Agilent с дополнительным оборудованием для измерения в частотном диапазоне до 1ТГц превышает 30000000 руб. При мелкосерийном производстве устройств, основанных на разработанном методе, стоимость одного устройства можно оценить следующим образом:

- криогенный охладитель замкнутого типа – 500000 руб,
- усилитель с синхронным детектированием – 1000000 руб,
- чувствительный элемент – 500000 руб,
- контроллер температуры – 600000 руб,
- криогенная часть анализатора – 100000 руб,
- электронная часть анализатора – 60000 руб,
- система сбора данных – 50000 руб,
- компьютер – 30000 руб,

Общая сумма составляет 2840000 руб, что существенно ниже цены предлагаемых аналогов.

Таким образом, использование разработанного метода при конструировании и производстве перспективных быстродействующих устройств обработки информации и телекоммуникаций должно существенно повысить их конкурентоспособность на рынке.

3.7 Заключение

В результате выполнения проекта был разработан новый метод спектрального анализа электромагнитных структур в терагерцовой области частот. На основе этого метода был разработан и создан джозефсоновский анализатор цепей. С использованием изготовленного макета были измерены характеристики различных электромагнитных структур при частотах от 140 до 1070 ГГц. Исследовательские испытания макета показали, что его параметры соответствуют требованиям технического задания. Как показал анализ используемых в настоящее время методов для проведения аналогичных измерений, результаты НИР соответствуют, а по ряду параметров и превышают мировой уровень работ в исследуемой области

4 Выработка предложений и рекомендаций по внедрению разработанного метода для оптимизации быстродействующих микроэлектронных и волноводных устройств терагерцового диапазона частот.

Для внедрения разработанного метода необходимо решить ряд задач.

В связи с тем, что бикристаллические подложки из NdGaO_3 достаточно сложны и дороги в изготовлении, необходимо исследовать возможности использования бикристаллических джозефсоновских переходов на подложках из MgO . Эти подложки используются в других областях электроники и налажен их массовый выпуск. Кроме того, также необходимо исследовать возможность использования переходов ступенчатого типа.

Необходимо усовершенствование технологии изготовления бикристаллических джозефсоновских переходов. В настоящее время доступно изготовление переходов шириной 2 мкм, что во многих случаях приводит к неоднородности перехода и уменьшает выход образцов нужного качества. Необходимо разработать технологию изготовления переходов с субмикронной шириной.

В настоящее время наиболее полно возможно исследовать интегрированные системы "на кристалле". В случае исследования объектов на внешних пластинах возникает достаточно большая неопределённость в согласовании исследуемого объекта с чувствительным элементом. Фактически для каждого измерения необходимо проводить отдельную калибровку, чтобы учитывать параметры согласования при экстракции характеристик исследуемого объекта из данных измерений. В связи с этим необходимо провести исследование и разработать стандартные методы оптимального согласования активного элемента с исследуемыми планарными структурами на отдельных пластинах, в частности, с использованием специальной технологии точечных контактов или бесконтактной индуктивной связи.

В изготовленном макете исследуемый объект находится при температуре активного элемента, что приемлемо для металлических электромагнитных структур, но не может быть использовано для полупроводниковых пассивных и активных элементов. В связи с этим необходимо провести исследование и разработать методы согласования чувствительного элемента с исследуемыми объектами, находящимися при комнатной температуре на основе диэлектрических волноводов..

В изготовленном устройстве не предусмотрена возможность характеристики активных элементов терагерцовой электроники. Необходимо разработать конструкцию устройства таким образом, чтобы обеспечить возможность подачи напряжений и токов смещения, а также низкочастотных сигналов на исследуемую структуру.

В представленном варианте макета джозефсоновского анализатора цепей предусмотрены измерения сигналов только с одного порта исследуемого устройства. Необходимо разработать систему многопортового анализа “на пластине” , для чего использовать несколько джозефсоновских переходов на одной подложке.

В рассматриваемом устройстве предусмотрена возможность характеристики объектов размером до 10 мм. Необходимо разработать систему для характеристики длинных проводящих линий с использованием двух и более активных элементов на разных подложках.

Для калибровки устройства необходимо разработать и изготовить набор стандартных калибровочных структур.

Для корректной и быстрой экстракции характеристик исследуемого устройства из данных измерений необходимо разработать библиотеку эквивалентных схем для описания различных типов компонентов исследуемых структур

Для корректного учёта электромагнитных потерь в материалах подложки и исследуемого объекта необходимо разработать систему характеристики проводящих и диэлектрических материалов в терагерцовой области частот создать базу данных параметров материалов в области терагерцовых частот для использования при восстановлении характеристик исследуемых объектов.

Для того чтобы сделать систему компактной и простой в использовании необходимо исследовать возможность применения охладителя МКС на основе цикла Стирлинга для охлаждения активного элемента устройства без использования криогенных жидкостей.

После решения всех вышеуказанных задач будет возможно создание полнофункционального опытного образца устройства.

5 Составление проекта Технического задания на проведение ОКР

В соответствии с техническим заданием был составлен проект технического задания на проведение опытно-конструкторской работы (ОКР) «Разработка терагерцового джозефсоновского анализатора цепей». Цель выполнения ОКР - Разработка терагерцового джозефсоновского анализатора цепей с целью ускорить цикл разработки новых и процесс отладки производимых устройств терагерцовой электроники, систем широкополосной связи и обработки информации. Разрабатываемый терагерцовый джозефсоновский анализатор цепей (далее – Изделие) предназначен для измерения частотных характеристик пассивных элементов микроэлектроники в диапазоне частот от 60 ГГц до 1100 ГГц. Изделие предназначено для использования при проектировании, отладке и производстве компонентов терагерцовой микроэлектроники, элементов систем широкополосной связи и обработки информации. В состав разрабатываемого изделия должно входить следующее:

- чувствительный элемент на основе бикристаллического джозефсоновского перехода, предназначенный для преобразования высокочастотного сигнала;
- криогенная система замкнутого цикла, предназначенная для охлаждения чувствительного элемента;
- устройство поддержания заданной температуры, предназначенное для поддержания температуры чувствительного элемента на заданном значении;
- устройство управления частотой перестройки, предназначенное для управления амплитудно-частотной характеристикой чувствительного элемента;
- устройство задания тока, предназначенное для задания тока смещения через чувствительный элемент;
- устройство аналоговой обработки выходного сигнала, предназначенное для разделения выходного сигнала на низкочастотную и высокочастотную части, фильтрации и усиления;
- устройство управления и цифровой обработки выходного сигнала, предназначенное для преобразования выходного сигнала в цифровую форму и ввода в компьютер;
- программное обеспечение, предназначенное для управления процессом измерения, сбора и обработки данных;
- эксплуатационная документация;

Изделие должно выполнять следующие функции:

- определение параметров компактной модели активного или пассивного элемента терагерцовой микроэлектроники;
- измерение зависимости Z-параметров активного или пассивного элемента терагерцовой микроэлектроники в зависимости от частоты.

Изделие должно обладать следующими характеристиками:

- полоса перестройки частоты от 60 ГГц до 1100 ГГц.
- приведенная относительная погрешность измерений не должна превышать 1%.
- время сканирования по частоте в полосе перестройки частоты за время не более 1 сек.
- минимальный размер измеряемых электромагнитных элементов не более 50 мкм.
- разрешение по частоте в полосе перестройки частоты не хуже 0.5 ГГц.
- максимальный размер изделия не более 500 мм
- вес изделия не более 10 кг.
- рабочая частота терагерцового джозефсоновского анализатора цепей в диапазоне 60 -1100 ГГц, должна измеряться посредством измерения напряжения на джозефсоновском переходе, абсолютная погрешность измерения должна быть не более 300 МГц;
- напряжение смещения на джозефсоновском переходе в диапазоне 100 мкВ – 1.5 мВ должно измеряться с использованием измерительного усилителя, причём абсолютная погрешность измерения должна быть не более 0.6 мкВ.
- ток смещения на джозефсоновском переходе в диапазоне 1 мкА – 100 мА должен задаваться в диапазонах 0-100 мкА, 0-300 мкА, 0-1 мА, 0-3 мА, 0-10 мА, 0-30 мА, 0-100 мА, причём. относительная погрешность задания тока в каждом из диапазонов должна быть не более 1%.
- дифференциальное сопротивление должно измеряться в диапазоне 0.1-50 Ом, причём относительная погрешность измерения должна быть не более 7%.
- величина магнитного поля должна задаваться в пределах 0-200 Гс и измеряться с абсолютной погрешностью не более 0.2 мГс.
- температура должна регулироваться в пределах 5-90 К и измеряться с погрешностью не более 0.1 К.
- флуктуации температуры не должны превышать 0.1%

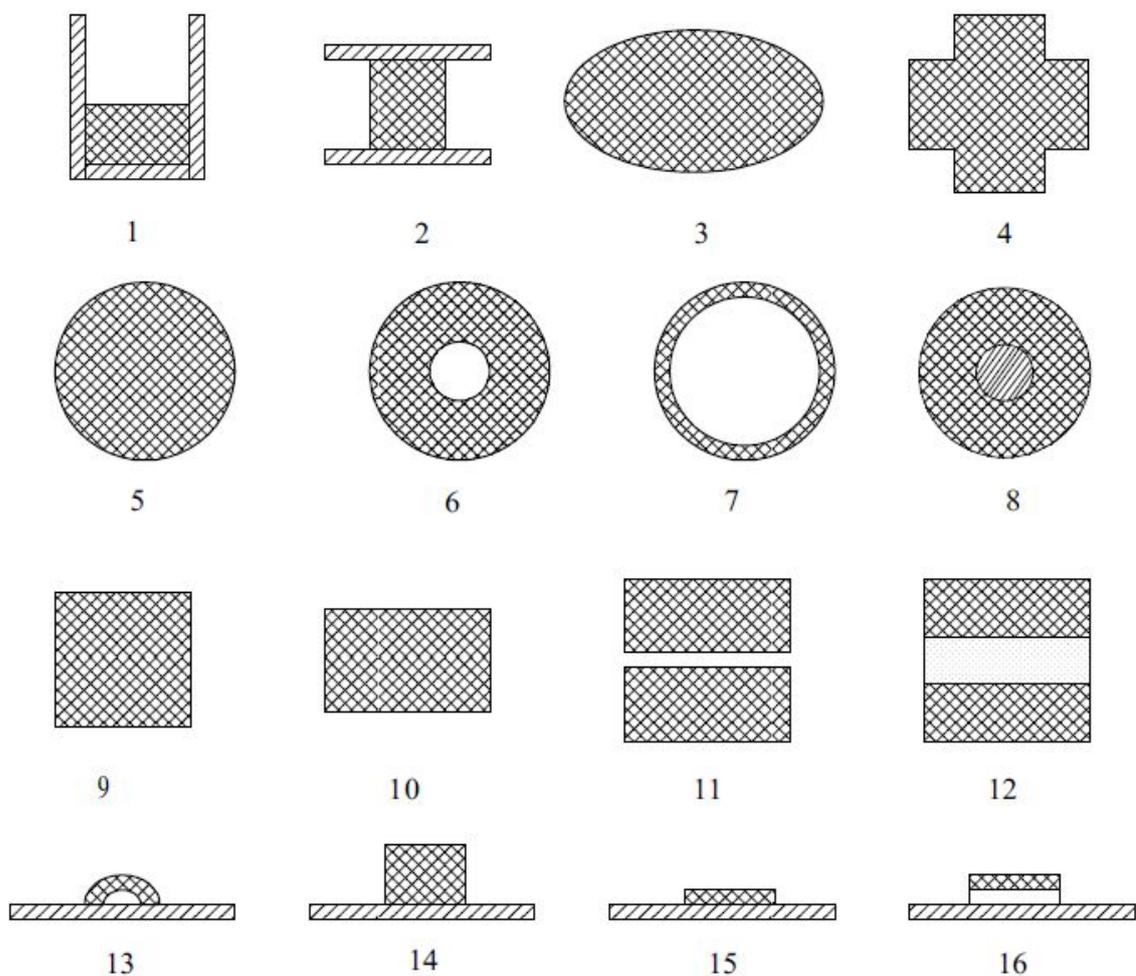
6 Проведение экспериментов по использованию джозефсоновской спектроскопии для исследования параметров волноводов терагерцового диапазона частот .

Работа выполнена зарубежным партнёром.

Среди различных способов передачи излучения миллиметрового диапазона частот наибольшее распространение получили линии передачи на основе коаксиальных кабелей, металлических волноводов и микрополосковых линий. Однако при дальнейшем повышении частоты в область субмиллиметровых частот эффективность этих способов передачи излучения падает, а стоимость их изготовления сильно возрастает.

Одним из перспективных методов передачи излучения высокой частоты является использование диэлектрических волноводов различных конструкций. Примеры конструкций таких волноводов приведены на рисунке 6.1 [49]. Интересной особенностью диэлектрических волноводов является условное отсутствие нижней частоты, что позволяет конструировать на их основе очень широкополосные линии передач. В качестве диэлектрика с малыми потерями в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне частот в таких волноводах могут применяться полимерные материалы, такие как полиэтилен высокого давления и фторопласты [50]. Данные полимеры широко распространены, просты в обработке и имеют низкую цену, что значительно снижает себестоимость изготовления диэлектрических волноводов.

Для исследования параметров диэлектрических волноводов нами использовался волноводный измеритель мощности HP E4418B с измерительной головкой W8486A (75-110 ГГц, 1 мкВ-100 мВт) и детектор на основе джозефсоновского перехода из высокотемпературного сверхпроводника. Джозефсоновский детектор имеет очень широкую частотную полосу от сотен мегагерц до 5 ТГц и обладает большим динамическим диапазоном по мощности до 60 дБ [51]. Джозефсоновский детектор был изготовлен на основе $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ бикристаллического перехода на подложке из MgO. Джозефсоновский переход, используемый в детекторе, имел сопротивление 0.3 Ом, что соответствует частотному разрешению 1 ГГц. При понижении температуры перехода от 80 К до 4 К характерная частота варьировалась от 50 ГГц до 1.5 ТГц, соответственно. При фиксированной температуре джозефсоновский переход в частотно-селективном режиме детектирования имеет наилучшую чувствительность к внешнему излучению с частотой близкой к значению характерной частоты перехода [52].



1 – желобковый; 2 – Н-образный; 3 – эллиптический; 4 – крестообразный; 5, 6, 7, 8 – круглые: стержневой, трубчатый, O – образный, слоистый; 9 и 10 – квадратный и прямоугольный; 11 – двойная пластина; 12 – прямоугольный слоистый; 13, 14, 15 и 16 – зеркальные полукруглый, прямоугольный, планарный (пленочный), слоистый.

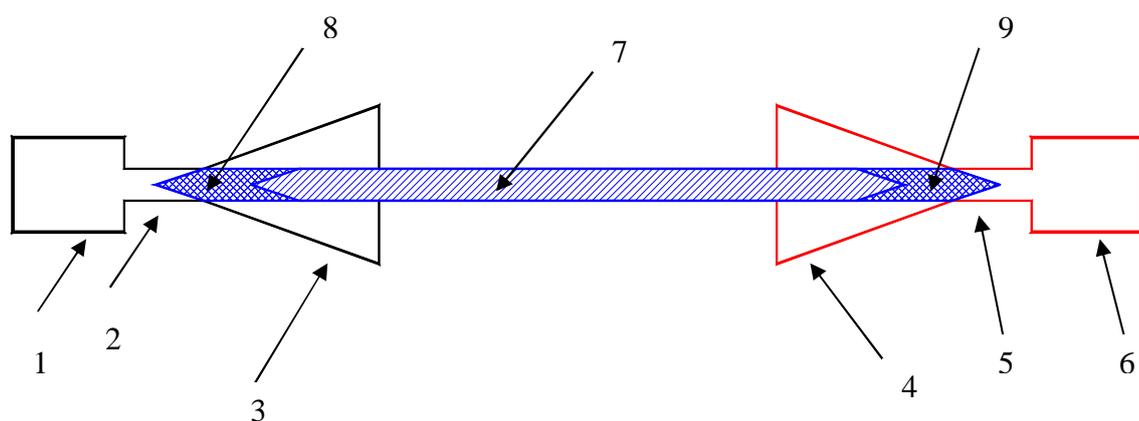
Рисунок 6.1 - Поперечные сечения основных типов диэлектрических волноводов:

В данном эксперименте температура перехода поддерживалась на уровне 77 К, что соответствовало характерной частоте 150 ГГц.

Нами исследовались характеристики прямоугольного слоистого волновода выполненного из полиэтилена высокого давления (рисунок 6.1 12). Сечение волновода имело размеры 2×4 мм². Данный тип волновода был выбран из-за легкости изготовления, а также простоты его согласования как с выходом умножителя частоты, выполненного в виде прямоугольного металлического рупора, так и с джозефсоновским детектором.

Традиционным методом согласования прямоугольного металлического волновода со слоистым прямоугольным диэлектрическим волноводом является вставление диэлектрического волновода, конец которого срезан в виде клина, в металлический

волновод. При этом из-за плавного перехода воздух-диэлектрик уменьшаются потери, вызванные разностью диэлектрических констант воздуха и диэлектрического волновода. Однако такой способ хорошо работает только для основной моды волновода. В нашем случае умножители частоты работали не только на номинальном коэффициенте умножения, но и на более высоких коэффициентах умножения. При генерации излучения с коэффициентами умножения превышающими номинальный выходной волновод становился сверхразмерным, и применение клиновидного согласования приводило к большим потерям на высоких частотах. Для улучшения согласования конец диэлектрического волновода был выполнен не в виде клина, а в виде пирамиды. Также для уменьшения потерь сопряжения прямоугольного металлического волновода с диэлектрическим волноводом использовались металлические прямоугольные рупорные антенны. Схема экспериментальной установки для исследования согласования металлических и диэлектрических волноводов терагерцового диапазона частот при помощи волноводного измерителя мощности HP E4418B с измерительной головкой W8486A показана на рисунке 6.2. Данные меры обеспечили потери на согласование прямоугольного металлического волновода

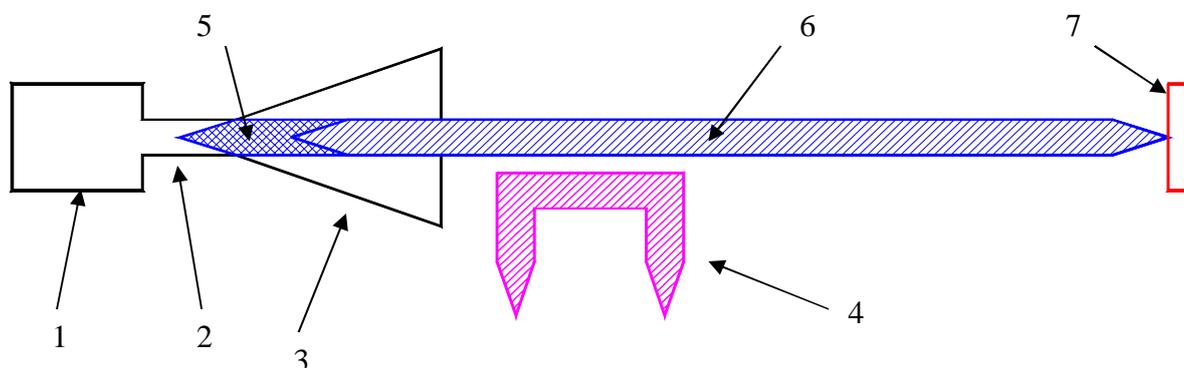


1 – умножитель частоты, 2 - выходной волновод умножителя частоты, 3,4- металлические прямоугольные рупорные антенны, 5- входной измерителя мощности, 6 – измеритель мощности HP E4418B с измерительной головкой W8486A, 7 – металлизация диэлектрического волновода, 8,9 – диэлектрическая часть слоистого прямоугольного диэлектрического волновода

Рисунок 6.2 - Схема экспериментальной установки для измерения потерь при согласовании прямоугольного металлического волновода со слоистым прямоугольным диэлектрическим волноводом.

После исследования согласования прямоугольного металлического волновода со слоистым диэлектрическим волноводом характеристики слоистого диэлектрического

волновода исследовались в более широкой области частот при помощи джозефсоновского детектора. Схема установки для исследования диэлектрических волноводов при помощи джозефсоновского детектора приведена на рисунке 6.3.



1 – умножитель частоты, 2 - выходной волновод умножителя частоты, 3- металлические прямоугольные рупорные антенны, 4 – микрополосковая линия, 5 – диэлектрическая часть слоистого прямоугольного диэлектрического волновода, 6 – металлизация диэлектрического волновода, 7 – джозефсоновский детектор со слоистым диэлектрическим волноводом на уровне -1 дБ в диапазоне частот 100-300 ГГц. Потери в самом диэлектрическом волноводе длиной 30 см были много меньше потерь на согласование волноводов.

Рисунок 6.3 - Схема экспериментальной установки для исследования характеристик слоистого прямоугольного диэлектрического волновода в области частот 1-500 ГГц.

В данной установке в качестве источника излучения высоких частот (75 – 500 ГГц) использовались умножители частоты, помеченные на рисунке 6.3 номером 1. В качестве источника излучения низких частот (1 – 20 ГГц) использовался синтезатор частоты, выходной сигнал которого согласовывался с диэлектрическим волноводом при помощи микрополосковой линии, как это показано на рисунке 6.3. Для уменьшения коэффициента стоячих волн микрополосковая линия была терминирована резистором с сопротивлением 50 Ом.

Для исследования характеристик диэлектрического волновода на низких частотах выходная частота синтезатора частоты сканировалась в интервале частот 800 МГц – 20 ГГц с шагом 1 МГц. В эксперименте использовался широкополосный режим джозефсоновского детектора. Высокочастотный сигнал на одном из концов волновода измерялся при помощи джозефсоновского детектора, как это показано на рисунке 6.3. Результаты измерений представлены на рисунке 6.4.

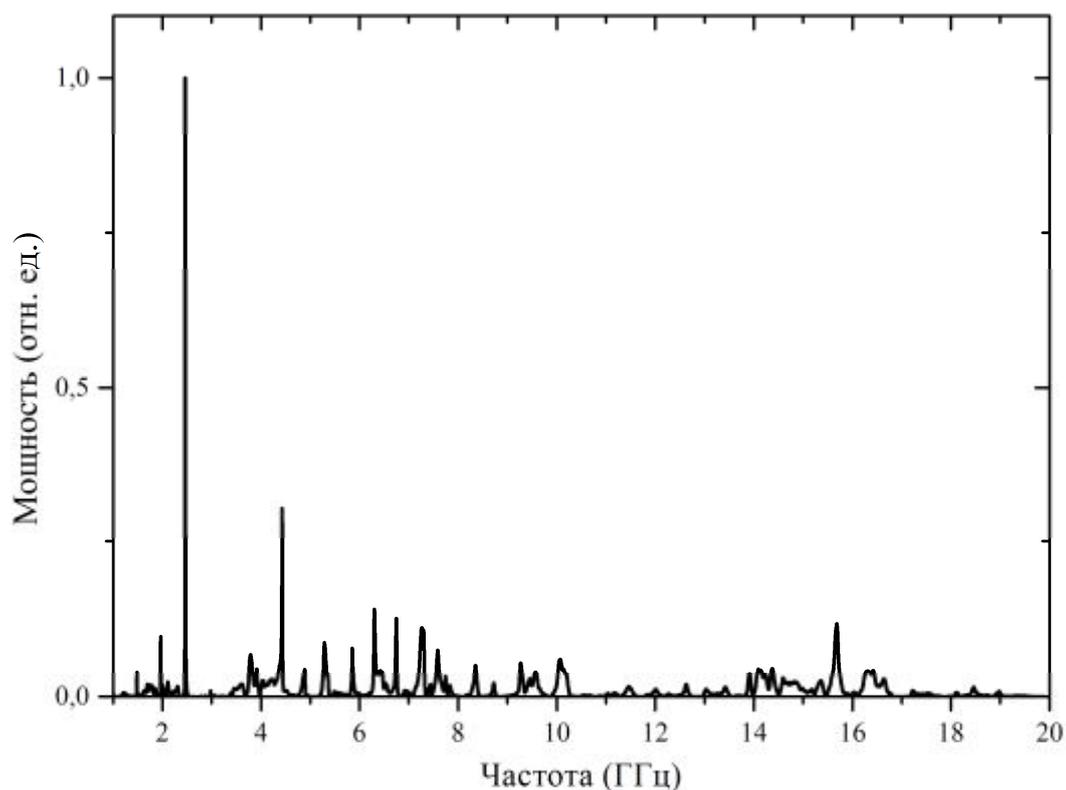


Рисунок 6.4 - Амплитудно-частотная характеристика волновода в диапазоне частот 0.8-20 ГГц

Видно, что на низких частотах, когда длина волны излучения много больше характерных размеров волновода, амплитудно-частотная характеристика волновода содержит большое количество пиков, которые соответствуют резонансам в волноводе на частотах кратных $c/\epsilon l$, где c - скорость света в вакууме, ϵ - эффективная диэлектрическая постоянная волновода, l – длина волновода. Форма резонансов хорошо аппроксимировалась функцией Лоренца, как это показано на рисунке 6.5. При этом добротность резонансов была около 300.

Таким образом, на низкой частоте слоистый диэлектрический волновод можно рассматривать как резонатор с набором резонансных частот. Ввиду того, что электромагнитное поле такого волновода выходит за пределы его физических размеров, его можно использовать в качестве измерителя диэлектрической функции веществ, внесенных в поле волновода со стороны грани непокрытой металлом, так как в этом случае будут меняться частоты резонансов волновода и их добротности.

На высоких частотах характеристики волновода исследовались в рабочих диапазонах

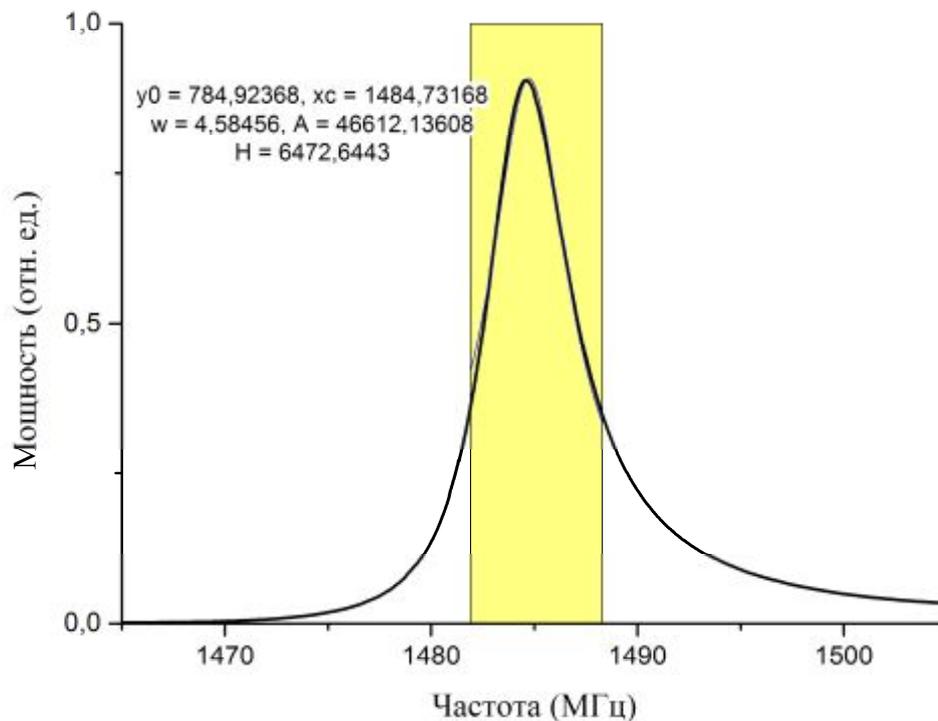


Рисунок 6.5 - Результаты подгонки резонансного пика на частоте 1485 МГц при помощи функции Лоренца.

умножителей частоты: 75 – 110 ГГц, 150 – 220 ГГц и на частотах 282 ГГц, 376 ГГц и 470 ГГц. Для согласования волновода с джозефсоновским детектором, снабженным интегрированной широкополосной планарной логопериодической антенной, были исследованы несколько конструкций согласующих устройств в виде простого отрезка слоистого волновода с планарными структурами на конце и без них, в виде прямоугольной усеченной пирамиды с большим основанием $2 \times 4 \text{ мм}^2$ и вершиной $0.5 \times 1 \text{ мм}^2$ с металлическими планарными структурами на вершине и без них, клина с закруглённым концом. В качестве планарных структур использовались «bow-tie» антенны с углом раскрытия до 120° . Планарные структуры наносились при помощи УФ литографии. Согласование слоистого диэлектрического волновода с джозефсоновским детектором измерялось на частотах 75, 150 и 282 ГГц. В эксперименте использовался джозефсоновский детектор в частотно-селективном режиме. Пример отклика частотно-селективного джозефсоновского детектора на излучение с частотами 75, 150 и 282 ГГц показан на рисунке 6.6. Положения резонансов на отклике соответствуют частотам гармоник полихроматического излучения, амплитуды – мощностям гармоник. Наилучшее согласование слоистого диэлектрического волновода получилось при применении согласующего устройства в виде усечённой пирамиды с планарной структурой. При использовании согласующего устройства в виде усечённой пирамиды без планарной структурой согласование ухудшалось в 2 раза.

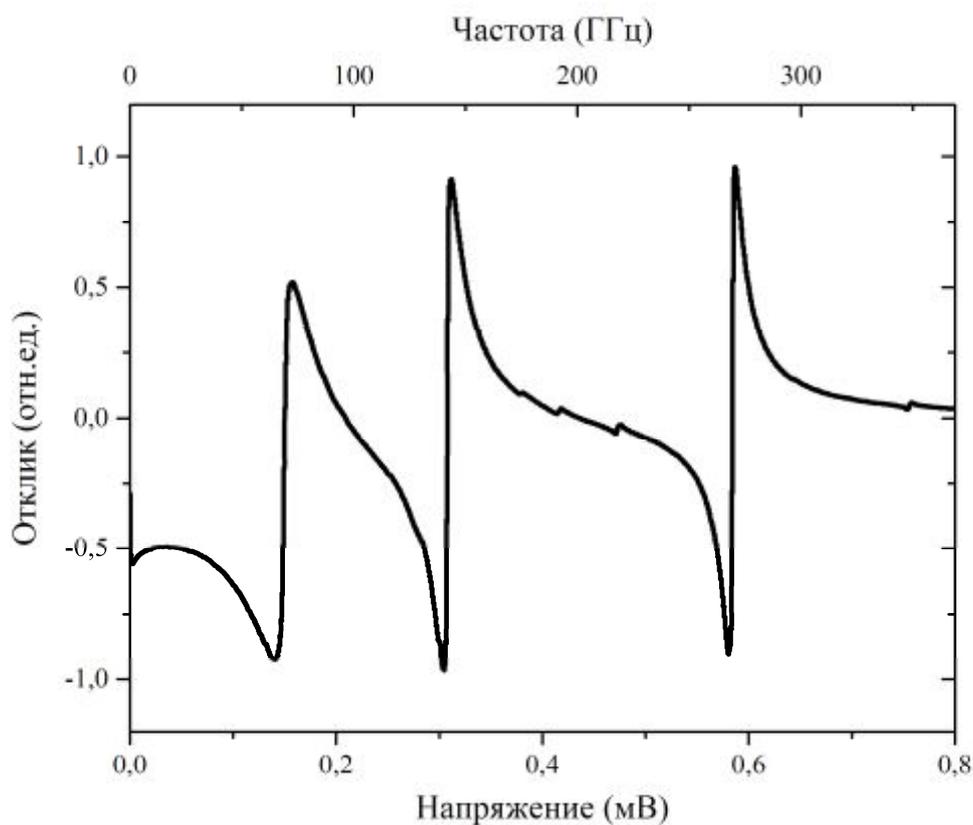


Рисунок 6.6 - Отклик частотно-селективного джозефсоновского детектора на полихроматическое излучение с частотами 75, 150 и 282 ГГц, поданное на детектор при помощи слоистого диэлектрического волновода.

Применение других согласующих устройств ухудшало согласование в 10 и более раз. Наилучшее согласование джозефсоновского детектора с диэлектрическим волноводом при помощи усечённой пирамиды с планарной структурой имело место на частоте 100 ГГц, что примерно соответствует частоте геометрического резонанса планарной структуры на вершине пирамиды. Таким образом, для улучшения согласования слоистого диэлектрического волновода с джозефсоновским детектором необходимо уменьшать геометрические размеры планарных структур на вершине согласующего устройства.

Таким образом, при помощи джозефсоновского детектора нами был исследован слоистый диэлектрический волновод из полиэтилена высокого давления, найдены наилучшие условия для его согласования с прямоугольным металлическим волноводом и джозефсоновским детектором. Показано, что на частотах порядка нескольких сотен гигагерц потери в таком волноводе пренебрежимо малы по сравнению с потерями на согласование волновода с детектором и источником.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований четвертого этапа соответствуют Техническому заданию и Календарному плану государственного контракта № 11.519.11.4005 от " 18 " августа 2011 г. на выполнение научно-исследовательских работ между Министерством образования и науки Российской Федерации и Учреждением Российской академии наук Институтом радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН (ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН) в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» по лоту «Работы по проведению проблемно-ориентированных поисковых исследований и созданию научно-технического задела по приоритетным направлениям исследований и разработок по тематике информационно-коммуникационные технологии с участием научных и исследовательских организаций стран Европейского Союза» шифр «2011-1.9-519-00» по теме: «Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии» (шифр заявки «2011-1.9-519-005-083»).

Перечислим основные результаты работы.

- были проведены исследовательские испытания макета джозефсоновского анализатора цепей;
- в соответствии со сделанными в ходе испытаний замечаниями произведена доработка макета джозефсоновского анализатора цепей, которая включала в себя следующее:
- доработку программного обеспечения в части задания параметров температурного контроллера LS331 с помощью интерфейса пользователя;
- изменение конструкции подводящих контактов к активному элементу в части обеспечения компенсации изменения размеров активного элемента при тепловом расширении;
- изменение конструкции усилителя переменного сигнала в части понижения шумов до $1 \text{ нВ/Гц}^{0.5}$;
- доработку программного обеспечения в части автоматического определения действительной и мнимой частей адмиттанса исследуемого объекта после сканирования;
- сделано обобщение и проведена оценка результатов НИР;
- выработаны предложения и рекомендации по внедрению разработанного метода для оптимизации быстродействующих микроэлектронных и волноводных устройств терагерцового диапазона частот;
- составлен проекта Технического задания на проведение ОКР «Разработка терагерцового джозефсоновского анализатора цепей»;

—проведены эксперименты по использованию джозефсоновской спектроскопии для исследования параметров волноводов терагерцового диапазона частот (работа сделана с участием зарубежного партнёра).

Основные задачи исследований четвертого этапа выполнены полностью.

Результаты НИР могут быть использованы как основа для выполнения ОКР «Разработка терагерцового джозефсоновского анализатора цепей».

Экономическая эффективность результатов НИР может быть достигнута при серийном выпуске устройств на основе разработанной методики. Проведённые оценки показали, что стоимость таких устройств может быть в 10 раз ниже, чем стоимость предлагаемых в настоящее время на рынке аналогов. Кроме того, использование разработанной методики при разработке микросхем, работающих в диапазоне частот свыше 100 ГГц, позволит сократить цикл разработки по крайней мере на одну итерацию.

Для оценки научно-технического уровня выполненной НИР в сравнении с лучшими достижениями в данной области, приведём характеристики аналогов разработанной методики, используемых в устройствах, производимых фирмами Agilent, Rhode&Schwartz, Anritsu EMEA, OML, Inc, AV Millimetre. Все эти устройства работают в диапазоне частот до 125 ГГц, а с использованием устройств расширения – до 1100 ГГц. Разработанная методика по диапазону перестройки по частоте от 64 ГГц до 1130 ГГц соответствует мировому уровню. Разработанная методика обеспечивает непрерывное сканирование частоте во всём диапазоне перестройки по частоте с использованием только электронного управления. Кроме того, разработанная методика не нуждается в специальных дорогостоящих согласующих устройствах и сложных математических процедурах экстракции параметров анализируемых объектов и данных измерений. Кроме того, разработанный метод применим для исследования объектов при низких температурах, что является актуальным при разработке охлаждаемых приёмников электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот, используемых, в частности, в системах пассивной регистрации изображений в дальнем инфракрасном диапазоне. По всем этим характеристикам разработанная методика превосходит мировой уровень.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 R. Lai, X.B.MeI, W.R.eal et al. Sub 50 nm InPHEMT device with FMAXgreater then 1 THz. Proc. IEEE Int. Electron Device Meeting, 2007, pp. 609-611.
- 2 D.-H. Kim, J.A.del Alamo, P.Chen, et al. 50-nm E-mode In_{0.7}Ga_{0.3}As PHEMTs on 100-mm InP substrate with $f_{\max}>1$ THz. Proc. IEEE Int. Electron Device Meeting, 2010, pp. 30.6.1-30.6.4.
- 3 E.Laskin, K.W.Tang, K.H.K. Yau, et al. 170 GHz transceiver with on-chip antennas in SiGe technology. Proc. Radio Frequency Integrated Circuits Symp., 2008, pp. 637-640.
- 4 M.Seo, B. Jagannathan, C.Carta, et al. A 1.1 V 150 GHz amplifier with 8 dB gain and +6 dBm saturated output power in standard digital 65 nm CMOS using dummy-prefilled microstrip lines. Proc. IEEE Int Solid-State Circuits Conf., 2009, pp. 484-485.
- 5 P. Scott. The am Atmospheric model, submillimeter array. Techn. Memo #152. <https://www.cfa.harvard.edu/~spaine/am/>
- 6 H.-J. Song, T.Nagatsuma. Pesent and future of terahertz communications. IEEE Trans. On Terahertz Sci. Tech., v.1, No.1, 2011, pp. 256-263.
- 7 V.Radisic, D.Sawdai, D.Scott, et al. Demonstration of a 311 GHz fundamental oscillator using InP HBT technology. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., v.55, no. 11, pp. 2329-2335, 2007.
- 8 I.Kallfas, H.Massler, A.Leuther, et al. A 210 GHz dual-gate FET mixer MMIC with >2 dB conversion gain , high LO-to-RF isolation, and low LO-drive requirements. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., v. 18, no. 8, pp. 557-559,2008.
- 9 W.R.Deal, X.B. Mei, V.Raisic, et al. Demonstraion of a 0.48 THz amplifier module using InP HEMT transistors. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., v. 20, no. 5, pp. 289-291,2010.
- 10 S.E. Gunnarson, N. Wadefalk, J. Svedin, et al. A 220 GHz single-chip receiver MMIC with integrated antenna. IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., v. 18, no. 4, pp. 284-286,2008.
- 11 M.Abbasi, S.E. Gunnarson, N. Wadefalk, et al. Single-chip 220 GHz active heterodyne receiver and transmitter MMIC with on-chip integrated antenna. IEEE Trans Microw. Theory Tech., v. 59, no. 2, pp. 466-478, 2011.
- 12 V.Radisic, K.M. Leong, X.MeI, et al. A 50 mW 220 GHz power amplifier module. Int. Microw. Symp. Dig., 2010.
- 13 V.Radisic, W.R.Deal, K.M. Leong, et al. A 10 mW submillimeter –wave solid-state power-amplifier module. EEE Trans Microw. Theory Tech., v. 58, no. 7, pp. 1903-1909, 2010.
- 14 H. Daquan, T.R. LaRossa, M.C.F. Chang, et al. Terahertz CMOS frequency generator using linear superposition technique. IEEE J. Solid-State Circuits, v. 43, no. 12, pp. 2730-2738,

2008.

15 E.Seok, C.Cao, D.Shim, et al. A 410 GHz CMOS push-push oscillator with an on-chip patch antenna. Proc. Int. Solid-State Circuits Conf, 2008, pp. 472-473.

16 U.R. Pfeiffer, E.Ojeors, Z. Yan. A siGe quadrature transmitter and receiver chipset for emerging high-frequency applications at 160 GHz. Proc. Int. Solid-State Circuits Conf, 2010, pp. 416-417.

17 M. Asada, S. Suzuki, N.Kishimoto. Resonant tunneling diodes for sub-terahertz and terahertz oscillators. Jpn. J. Appl. Phys., v. 47, pp. 4375-4384, 2008.

18 S. Suzuki, M. Asada, A.Teranishi, et al. Fundamental oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature. Appl.Phys.Lett., v.97, pp. 242102-3, 2010.

19 T.W.Crowe. GaAs Schottkey barrier mixer diodes for the frequency range 1-10 THz. Int. J. Infrared Millim., v. 10, pp. 765-777, 1989.

20 T.W.Crowe, .Mattauch, H.Roser, et al. GaAs Schottkey diodes for THz mixing applications. Proc. IEEE, v. 80, no.11, pp. 1827-1841, 2002.

21 A. Wakatsuki, T. Furuta, Y. Muramoto, et al. High-power and broadband sub-terahertz wave generation using a J-band photomixer module with rectangular-waveguide output port. Proc Int. Conf. Infrared, Millim.Terahertz Waves, 2008.

22 J. Takeuchi, AHirata, H.Takahashi, et al. 10-Gbit/s bi-irectional and 20-Gbit/s uni-directional data transmission over a 120-GHz-Band wireless link using a finline ortho-mode transducer. Proc. Asia-Pacific Microw. Conf., 2010.

23 H.J.Song, K.Ajito, A.Hirata, et al. 8 Gbit/s wireless data transmission at 250 GHz. Electron Lett., v.45, pp. 1121-1132, 2009.

24 T.Nagatsuma, H.J.Song, Y.Fujimoto, et al. Giga-bit wireless link using 300~400 GHz bands. Proc. Topical Meeting Microw. Photon., 2009.

25 K.H.K. Yau, E. Dacquay, I.Sarkas, S.P.Voinigescu. Device and IC characterization above 100 GHz. IEEE Microwave Mag., v.13, No 1, 2012, pp. 30-54.

26 B. I.aemmler, K. Schmalz, C. Scheytt, D. Kissinger, R Weigel. A 122-GHz multiprobe reflectometer for dielectric sensor readout in SiGe BiCMOS technology in IEEE CSICS Dig., Oct. 2011, pp. 255-258.

27 J.Edstrom, HK.Olsson. Josephson broadband spectroscopy to 1 THz. Appl.Phys.Lett. 1994;v.64: pp.2733-2735.

28 О.Ю.Волков, В.Н.Губанков, И.И.Гундарева, Ю.Я.Дивин, В.В.Павловский. Джозефсоновская адмиттансная спектроскопия характеристик логопериодической антенны в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Радиотехника и электроника. 2009, т.54, стр.1381-1386.

- 29 Puma M., Deaver B. S., Jr. Temperature Dependence of Structure on the I-V Curves of Superconducting Point Contacts. *Appl. Phys. Lett.*, v.19, No.12, p.539, 1971.
- 30 Silver A. H., Zimmerman J. E. Multiple Quantum Resonance Spectroscopy Through Weakly Connected Superconductors. *Appl. Phys. Lett.*, v. 10, No. 5, p. 142, 1967.
- 31 Ulrich B. T., Kluth E. O. Josephson Junction Millimeter Microwave Source and Homodyne Detector. *Proc. IEEE*, v. 61, No.1, p. 51, 1973.
- 32 А.Ф.Волков. Влияние импеданса внешней цепи на вольт-амперную характеристику джозефсоновского перехода. *Радиотехника и электроника*, 1972, т.17, стр.2581-2583.
- 33 К.К.Лихарев. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М., Наука, 1985.
- 34 Ю.Я.Дивин, И.М.Котелянский, В.Н.Губанков. Бикристаллические джозефсоновские переходы из с-ориентированных $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ пленок для терагерцовой Гильберт-спектроскопии. *Радиотехника и электроника*, 2003, т.48, стр.1238-1249
- 35 Ю.Я.Дивин, У. Поппе, И.М.Котелянский, В.Н.Губанков, К. Урбан. *Радиотехника и электроника*, 2008, т.53, стр.1205-1222.
- 36 M. Lyatti, Y. Divin, U. Poppe, K. Urban, *Supercond. Sci. Technol.* 22, 114005 (2009)
- 37 И.И.Гундарева, В.Н.Губанков, Ю.Я.Дивин и др. Частотный диапазон импедансной джозефсоновской спектроскопии резонансных систем. *Радиотехника и электроника*, т. 58, № 5, 2013, принята в печать.
- 38 K.H.K. Yau, E. Dacquay, I.Sarkas, S.P.Voinigescu. Device and IC characterization above 100 GHz. *IEEE Microwave Mag.*, v.13, No 1, 2012, pp. 30-54.
- 39 O. Y. Volkov, Y. Y. Divin, V. N. Gubankov, I. I. Gundareva, V. V. Pavlovskiy. Terahertz characterization of external resonant systems by high-Tc Josephson junctions *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, issue 3, pp. 306-310, 2011
- 40 Yoshida K. Effect of capacitance on noise-rounded current-voltage curves of a Josephson tunnel junction. // *J. Appl. Phys.*, 1982, V.53, N.11, P. 7471-7478
- 41 Kurkijarvi J., Ambegaokar V. Numerical calculation of thermal noise-voltage in a Josephson junction of finite capacitance // *Phys. Lett.* , 1970, V. 31A, N. 6, P. 314-315
- 42 Busse F., Nebel F.L., Herzog P. Effect of noise and capacitance on the dynamical characteristics of high-T, Josephson junctions. // *Appl. Phys. Lett.*, 1993, V. 63, N. 12, P. 1687-1868
- 43 ГОСТ 21342.9-76 Варисторы. Метод измерения напряжения и тока. М., 1976, 8 стр.
- 44 ГОСТ 21342.20-78 Стабилитроны полупроводниковые. Методы измерения дифференциального сопротивления/ М., 1978, 9 стр.
- 45 H. Hilgenkamp, J. Mannhart Grain boundaries in high-Tc superconductors. *Rev. Mod*

Phys., V. 74, 2002, pp. 485-549

46 Лятти М.В. Детекторные характеристики YBaCuO бикристаллических джозефсоновских переходов с взаимонаклоненными осями [001] в терагерцовой области частот. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

47 В.В. Павловский Моделирование электромагнитной резонансной системы с джозефсоновским переходом. Журнал радиоэлектроники, 2013, № 3, 13 стр.

48 О. Ю. Волков, В. Н. Губанков, И. И. Гундарева и др. Эквивалентная схема джозефсоновского перехода с интегрированной антенной в терагерцовой области частот. Журнал радиоэлектроники, 2013, № 3, 13 стр.

49 В. Ф. Михайлов, Т. Н. Нарытник, И. В. Брагин, В. Н. Мошкин, Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах, Санкт-Петербург (2003).

50 Yun-Sik Jin, Geun-Ju Kim and Seok-Gy Jeon, Terahertz Dielectric Properties of Polymers, Journal of the Korean Physical Society, v. 49, no. 2, 2006, pp. 513-517

51 Y. Divin, O. Volkov, V. Pavlovskii, et al. . Terahertz Hilbert spectroscopy by high- T_c Josephson junctions. In: Advances in Solid State Physics, vol. 41, ed. B. Kramer (Springer, Berlin, 2001) pp. 301-313.

52 К.К. Лихарев, Б.Т. Ульрих. Системы с джозефсоновскими контактами. М.б. Изд-во МГУ (1978).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Отчёт о патентных исследованиях

Российская Академия Наук
Отделение Физических Наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и
электроники им.В.А.Котельникова Российской академии наук
(ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН)

УДК: 537.312.62; 621.385.6

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
зав. отделом ИРЭ
им.В.А.Котельникова РАН,
д.ф.-м.н.

В.Н. Губанков
5 февраля 2013г.

ОТЧЕТ О ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ по теме

Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации
и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии

Государственный контракт от 18 августа 2011 г.
№ 11.519.11.4005
Шифр 2011-1.9-519-005-083

Руководитель подразделения-исполнителя работы
Зав. лаб. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

подпись, дата

В.И. Покалякин

Руководитель работы
к.т.н, с.н.с.

подпись, дата

В.А. Шахунов

Москва 2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ДАННЫЕ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЙ	83
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	84
1 Введение	84
2 Патентное исследование метода анализа электронных элементов на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии	84
3 Патентное исследование программы для ЭВМ “Программа моделирования джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения”	86
4 Оценка патентной чистоты	88
5 Список использованных источников	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	90
ПРИЛОЖЕНИЕ А Задание на проведение патентных исследований	91
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Форма регламента поиска	92
ПРИЛОЖЕНИЕ В Отчет о поиске	94

ОБЩИЕ ДАННЫЕ ОБ ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования является метод анализа электронных элементов на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии, разработанный в рамках выполнения государственного контракта №11.519.11.4005 от 18 августа 2011 г., шифр 2011-1.9-519-005-083 «Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии» в период с 18 августа 2011 г по 8 мая 2012 г. Разработанный метод позволяет проводить анализ частотных характеристик электромагнитных микроэлектронных структур в диапазоне частот от 65 ГГц до 1100 ГГц. Назначение данного метода – быстродействующие телекоммуникационные системы и информационные технологии. Области их возможного применения: медицина, обеспечение безопасности, охрана окружающей среды, химическая, перерабатывающая, фармацевтическая промышленности, радиоастрономия, электроника, телекоммуникации, научные исследования в химии, физики, биологии.. Отдельное исследование проведено для программы для ЭВМ “Программа моделирования джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения”, которая подлежит регистрации как объект интеллектуальной деятельности” Программа является составной частью разработанного метода и служит для восстановления частотных характеристик анализируемого объекта из данных измерений.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

A1 Введение

В строгом соответствии с пунктом 6 технического задания Государственного контракта №11.519.11.4005 от 18 августа 2011 г., шифр 2011-1.9-519-005-083 «Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии», который регламентирует требования к патентной чистоте и патентоспособности научно-исследовательских работ, были проведены патентные исследования по основным направлениям производимых работ. А именно, патентные исследования были проведены в оследующих областях:

- методы анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии;
- неразрушающая диагностика электрических цепей, адмиттансная спектроскопия;
- адмиттансные методы, измерение адмиттанса;
- технология изготовления сверхпроводящих тонкоплёночных образцов;
- программное моделирование джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения.

Ниже приводятся результаты исследований.

A2 Патентное исследование метода анализа электронных элементов на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии

Были проведены патентные исследования, касающиеся областей физических принципов и разработки методов анализа элементов (цепей) быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе джозефсоновской спектроскопии. При этом использовалась база данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам "Роспатент" (www.fips.ru). Поиск проводился по ключевым фразам:

- неразрушающая диагностика, адмиттансная спектроскопия, адмиттансные методы, измерение адмиттанса;
- джозефсоновская спектроскопия, джозефсоновский анализатор цепей, джозефсоновские наноструктуры, бикристаллический джозефсоновский переход, джозефсоновские СИС-структуры, программное моделирование джозефсоновского перехода;

—дифференциальное сопротивление цепей, измерение частотных параметров электромагнитных цепей, R,L,C- измерители, импеданс СВЧ планарных цепей (логопериодических антенн).

В логическом и словарном режимах поиска были найдены и изучены патенты с датой регистрации в выше указанной базе от 1994 года по настоящее время. Номера найденных патентов приведены в таблице 1.

Таблица А.1- Номера найденных патентов, касающихся областей физических принципов и разработки методов анализа элементов

Страна поиска	№ патента	Классификационная рубрика по МПК	Год выдачи патента
США(US)	6156706	B32B 18/00	1998
США(US)	6541789 B1	B82B 1/00	2003
США(US)	6156706	B32B 18/00	1998
США(US)	6541789 B1	B82B 1/00	2003
США(US)	20030141937 A1	G05B 11/06	2003
США(US)	5926271 A	G01N 21/31	1999
США(US)	6366096 A	G01N 22/00	2002
США(US)	5562345 A	G01N 25/18	1996
США(US)	6183552 B1	H01L 39/24	2001
США(US)	6083266	G06F 17/10	2000
США(US)	7877244	G06F 17/50	2011
США (US)	6760266	G11C 7/02	2004
Евросоюз (EP)	0868753	D32C 29/10	1996
Евросоюз (FR)	2809183 A	G01R 29/10	2001
Евросоюз (EP)	0558972 B1	G01R 27/26	1998
Россия (RU)	2239814 C2	G01N 13/12	2002

Продолжение таблицы А.1

Россия (RU)	2300825 C1	H01L 31/101	2005
Россия (RU)	2373610 C1	H01L 39/22	2006
Россия (RU)	2319300 C1	H03L 7/06	2006
Россия (RU)	2325003 C1	H01L 39/18	2006
Россия (RU)	2431216 C1	H01L 21/66	2006
Россия (RU)	2400733 C2	G01N 21/31	2006
Россия (RU)	2416111 C1	G01T 1/36	2009
Россия (RU)	2273839 C2	G01N 15/00	2003
Россия (RU)	2390787 C1	G01R 27/02	2009
Россия (RU)	2402749 C1	G01J 3/45	2009
Япония (JP)	2003282933 A	H01L 39/02	2003
Япония(JP)	9321358 A	H01L 39/24	1997
Япония (JP)	4087385 A	H01L 39/24	1994
Япония(JP)	6553340	G06F 17/50	2003

Все приведенные выше аналоги используют ряд различных методик, в том числе и с возможностью программного моделирования, анализа электромагнитных цепей, связанных с использованием внешних источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот или ультракоротких импульсов оптического излучения. Использование же эффекта Джозефсона для характеристики электромагнитных цепей сводится лишь к определению их резонансных частот, а не восстановлению спектральных зависимостей. В настоящем проекте НИР джозефсоновский переход является одновременно источником, приемником и анализатором спектра излучения и расположен в непосредственной близости от исследуемой электромагнитной цепи или присоединен к ней, что позволяет по измерениям вольт-амперной характеристики джозефсоновского перехода, модифицированной электромагнитной цепью, провести ее спектральный анализ.

А3 Патентное исследование программы для ЭВМ “Программа моделирования джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения”

Были проведены патентные исследования, касающиеся областей математического моделирования электронных приборов, содержащих сверхпроводящие элементы. и

программного моделирования джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения. При этом использовалась база данных Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам "Роспатент" (www.fips.ru), а также по публикациям в научно-технической литературе Поиск проводился по ключевым фразам:

- метод моделирования электронных приборов;
- алгоритм моделирования электронных приборов;
- алгоритм моделирования электронных цепей, содержащих сверхпроводящие элементы;
- моделирование джозефсоновских переходов;
- резистивная модель;
- electronic computer aided design^
- Josephson junction simulation^
- electronic circuit simulation\$

В логическом и словарном режимах поиска были найдены и изучены патенты и научно-технические материалы с датой регистрации от 1973 года по настоящее время. В частности были найдены патенты, номера которых приведены в таблице 2.

Таблица А.2-Номера найденных патентов, касающихся областей математического моделирования электронных приборов, содержащих сверхпроводящие элементы

Страна поиска	№ патента	Классификационная рубрика по МПК	Год выдачи патента
США(US)	6083266	G06F 17/10	2000
США(US)	7877244	G06F 17/50	2011
Япония(JP)	6553340	G06F 17/50	2003

Кроме того, для изучения был отобран ряд работ в научно-технических источниках [А.1]-[А.9].

Все приведенные выше аналоги используют различные методы и алгоритмы моделирования электрических цепей, содержащих джозефсоновские переходы. Наиболее близки по функциональности к исследуемой программы, представленные в [А.1] и [А.2]. Принципиальное отличие исследуемой программы состоит в методе моделирования тепловых флуктуаций тока нормальных квазичастиц. В [А.1] флуктуации учитываются в виде аналитической модели, которая справедлива только в пределах слабых флуктуаций. В [А.2] флуктуации не учитываются. В исследуемой программе флуктуации вводятся их первых

принципов в виде стохастических членов уравнений, что позволяет адекватно описывать характеристики джозефсоновского перехода при произвольной интенсивности флуктуаций и в области малых напряжений смещения, где даже слабые флуктуации значительно модифицируют вольтамперную характеристику. Таким образом исследуемая программа не является полным аналогом программ, защищённых патентами или опубликованных в научно-технической литературе.

A4 Оценка патентной чистоты

Таким образом, анализ патентного материала, показывает, что в части настоящего проекта, посвященной разработке метода анализа электронных элементов быстродействующих систем теле-коммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии и программы моделирования джозефсоновского перехода в условиях внешнего электродинамического окружения, не ущемляет прав интеллектуальной собственности изобретателей и/или собственников патентов, зарегистрированных в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации ("Роспатент"). Также не существует полных аналогов, опубликованных в научно-технической литературе. На данный момент не существует охранных и иных документов, которые будут препятствовать применению результатов проводимых научно-исследовательских работ в Российской Федерации. Тем самым обеспечена патентная чистота производимых научно-исследовательских работ.

A5 Список использованных источников

A.1 Jspice3 Circuit Simulator // электронный ресурс] URL: <http://www.wrcad.com/jspice3.html> (дата обращения 11.03.2013)

A.2 E. S. Fang and T. Van Duzer. A Josephson integrated circuit simulator (JSIM) for superconductive electronics application // Extended Abstracts of Int. Superconductivity Electronics Conf., P.407 -410 1989

A.3 S. Whitely. Josephson Junction in SPICE3 // IEEE Trans. Magnetics, V. 27, P.2902 -2905, 1991

A.4 G. Rollins. Simulator for superconducting circuits // IEEE Trans. Computer-Aided Design, V. 10, P.245 -251, 1991

A.5 W. T. Tsang, T. Van Duzer. DC analysis of parallel arrays of two and three Josephson junctions // J. Appl. Phys., V. 46, P.4573 -4580, 1975

A.6 R. L. Peterson, C. A. Hamilton. Analysis of threshold curves for superconducting interferometers // J. Appl. Phys., V. 50, P. 8135 -8142, 1979

A.7 B. Landman. Calculation of threshold curves for Josephson quantum interference

devices // IEEE Trans. Magnetics. V. 13, P.871 -874, 1977

A.8 L. Chua, P. Lin. Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits: Algorithm & Computational Techniques. // 1975 :Prentice-Hal, New York

A.9 Qassemzadeh, T. R. Scott. Algorithms for ASTAPIA network analysis program // IEEE Trans. Circuit Theory, vol. CT-20, P.628 -634 1973

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ патентного материала, найденного с использованием базы данных Федеральной служ-бы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам "Роспатент" (www.fips.ru) по-казывает, что работа, проведенная в рамках Государственного контракта №11.519.11.4005 от 18 августа 2011 г. по теме: «Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем теле-коммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии» между Министерством образования и науки РФ и ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и направленная на отработку научных основ разработки метода анализа электронных цепей на основе джозефсоновской спектроскопии не ущемляет прав интеллектуальной собственности изобретателей и/или собственников патентов, зарегистрированных в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации ("Роспатент").

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Задание на проведение патентных исследований

УТВЕРЖДАЮ
Зав отделом ИРЭ
им. В.А. Котельникова РАН
проф., д.ф.-м.н.

В. Н.Губанков
14 января 2013г.

ЗАДАНИЕ № 2
на проведение патентных исследований

Наименование работы (темы) «Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии». Государственный контракт № 11.519.11.4005 шифр работы (темы): 2011-1.9-519-005-083.

Этап работы: № 4 (Исследовательские испытания, обобщение и оценка результатов исследований).

сроки его выполнения: 1 января-8 мая 2013 г.

Задачи патентных исследований: обеспечение патентной чистоты результата интеллектуальной деятельности на территории Российской Федерации.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Виды патентных исследований	Подразделения исполнителя	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения начало – окончание	Отчетные документы
Патентный поиск.	Лаборатория № 172 ИРЭ им.В.А. Котельникова РАН	с.н.с, к.т.н. В.А.Шахунов с.н.с. Н.М. Марголин	16.01-04.02 2013 г.	Отчет о ПИ

Начальник патентного отдела
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

_____ М.Е. Чугунова

Руководитель подразделения-исполнителя работы,
зав. лаб № 172 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
к.ф.-м.н

_____ В.И. Покалякин

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Форма регламента поиска
Регламент поиска № 2

15 января 2013 г.

Наименование работы (темы): «Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии», Государственный контракт №11.519.11.4005, шифр работы (темы): 2011-1.9-519-005-083

Номер и дата утверждения задания: № 2, 14.01. 2013 г. Этап работы: № 4 (Исследовательские испытания, обобщение и оценка результатов исследований).

Цель поиска информации: обеспечение патентной чистоты результатов интеллектуальной деятельности на территории Российской Федерации.

Обоснование регламента поиска: При проведении патентных исследований должны быть отобраны документы СССР, РФ, Великобритании, США, Франции, Германии, Японии, РСТ, ЕПВ и ЕАПВ, как наиболее информативные и определяющие основные тенденции развития в данной области. Так как целью поиска является определение направлений и уровня развития техники в данной области, то регламент допускает использование не официальных бюллетеней патентных ведомств, а реферативной информации. Предполагается использовать открытые автоматизированные базы данных Федерального института промышленной собственности (ФИПС), Европейского патентного ведомства (ЕПВ) и Патентного ведомства США, как наиболее доступные и полные базы патентных документов. Глубина поиска принята 1994-2013 гг, что вполне достаточно для анализа современного состояния дел в данной области техники.

Начало поиска 16.01.2013 г., окончание поиска 04.02.2013 г.

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна поиска	Источники информации, по которым будет проводиться поиск				Ретроспективность поиска	Наименование информационной базы (фонда)
		патентные		научно-техническая информация			
		Наименование	Классификационные рубрики: (МКИ, МПК)	Наименование	Рубрики УДК		
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии. Неразрушающая диагностика электрических цепей, адмиттансная спектроскопия, адмиттансные методы, измерение адмиттанса. Программное моделирование анализа электромагнитных цепей	РФ, США, Великобритания, РСТ, ЕПВ, ЕА	<p>Полнотекстовая база данных Роспатента по изобретениям и полезным моделям RUPAT, RUPAT_OLD, RUABU1A в сети Интернет</p> <p>Полнотекстовая БД ЕПВ Espacenet</p> <p>Полнотекстовая БД Патентного ведомства США</p> <p>Реферативная БД РСТ</p>	<p>B32B 18/00, B82B 1/00 D32C 29/10, G01N 13/12, 21/31, 15/00, 22/00, 25/18, G01R 27/02, 29/10, 27/26, G01J 3/45 H01L 31/101, 39/02, 39/22, 39/18, 39/24, 21/66, 39/24, H03L 7/07, G05B 11/06, G01T 1/36, G06F 17/50 G06F 17/10 G11C 7/02</p>	<p>Журнал «Физика и техника полупроводников» IEEE Transaction on Electron Devices</p>	<p>621.3 15.59 2 0018-9383</p>	<p>1994-2012 гг.</p>	<p>Полнотекстовая БД Роспатента открыта по изобретениям (RUPAT, RUPAT_OLD), БД полезных моделей (RUABU1A), http://www.fips.</p> <p>БД ЕПВ Espacenet, http://ru.espacenet</p> <p>БД США http://www.uspto</p> <p>БД РСТ http://idpl.wipo.int</p>

Начальник патентного отдела

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

М.Е. Чугунова

Руководитель подразделения-исполнителя работы,
зав. лаб ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
к.ф.-м.н

В.И. Покалякин

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Отчет о поиске

В.1 Поиск проведен в соответствии с заданием зав. отделом ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, профессора, д.ф.-м.н Губанкова В.Н. № 2 от 14 января 2013 г. и Регламентом поиска № 2 от 15 января 2013 г.

В.2 Этап работы: № 4 (Исследовательские испытания, обобщение и оценка результатов исследований).

В.3 Начало поиска 16 января 2013 г., окончание поиска 04 февраля 2013 г.

В.4 Сведения о выполнении регламента поиска: Регламент поиска выполнен полностью.

В.5 Предложения по дальнейшему проведению поиска и патентных исследований.

При проведении опытно-конструкторских работ рекомендуется не реже 1 раза в год проводить патентные исследования.

В.6 Материалы, отобранные для последующего анализа

Таблица В.6.1-Патентная документация

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи охранного документа	Заявитель(патентообладатель), страна, номер заявки, дата приоритета, конвенционный приоритет	Название изобретения (полной модели, образца)	Сведения о действии охранного документа или причина его аннулирования
1	2	3	4	5
Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии.	США	Nec Corporation International Superconductivity Technology Center, 6541789 B1, 01.09.1998	High temperature superconductor Josephson junction element and manufacturing method for the same	Действителен до 01.09.2018
Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии.	Россия	Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобелевца Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, 2343591С1, 26.06.2007	Сверхпроводящий прибор с джозефсоновским переходом	Аннулирован в связи с истечением срока действия

Продолжение таблицы В.6.1

Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии.	Россия	Иститут радиотехники и электроники Российской Академии Наук, 2319300С1, 21.11.2006	Широкополосная система фазовой автоподстройки частоты для криогенного генератора	аннулирован в связи с истечением срока действия
Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии.	Россия	ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2231079С1, 17.12.2002	Устройство для измерения параметров антенн в проводящей среде	аннулирован в связи с истечением срока действия
Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии.	Россия	Закрытое акционерное общество "сверхпроводниковые нанотехнологии", 2300825С1, 21.12.2005	Быстродействующий сверхпроводниковый однофотонный детектор	до 21.12.2015
Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии.	Россия	Байер хелткэр ллк, 2400733С2, 12.12.2005, 3.12.2004 US 60/635,666	Система для спектроскопии пропускания для использования при определении анализируемых веществ в жидкости организма	до 12.12.2015
Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии.	Россия	Интер-юниверсити рисерч Инститьют корпорейшн нэшнл Инститьютс оф нэчерал Сайенсиз, 2273839С3, 12.03.2009, 13.03.2008 JP 2008-064313	Способ спектроскопии электромагнитной волны/пучка частиц и Прибор для спектроскопии электромагнитной волны/пучка частиц	до 12.03.2014

Продолжение таблицы В.6.1

Метод анализа электронных элементов быстродействующих систем телекоммуникации и обработки информации на основе терагерцовой джозефсоновской спектроскопии.	Россия	Учреждение Российской академии наук Институт физики твердого тела РАН(ИФТТ РАН), 2402749С1, 19.05.2009	Гетеродинный спектрометр электромагнитного излучения	до 19.05.2014
Неразрушающая диагностика электрических цепей, адмиттансная спектроскопия	США	Zeta Technology Picometrics, 5926271 A, 01.12.1997	Laser-induced fluorescence detector having a capillary detection cell and method for identifying trace compounds implemented by the same device	Действителен до 01.12.2017
Неразрушающая диагностика электрических цепей, адмиттансная спектроскопия	США	University Of Maryland, College Park , 6366096B1, 06.08.1999	Apparatus and method for measuring of absolute values of penetration depth and surface resistance of metals and superconductors	до 6.08.2019
Неразрушающая диагностика электрических цепей, адмиттансная спектроскопия	США	The United States Of America As Represented By The Administrator Of The National Aeronautics And Space Administration , 5562345 A, 05.05.1992	Method and apparatus for thermographically and quantitatively analyzing a structure for disbonds and/or inclusions	до 05.05.2022
Неразрушающая диагностика электрических цепей, адмиттансная спектроскопия	США	Motorola, Inc., 6760266B2, 28.06.2002	Sense amplifier and method for performing a read operation in a MRAM	до 28.06.2017
Неразрушающая диагностика электрических цепей, адмиттансная спектроскопия	Россия	Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Рязанский государственный радиотехнический университет, 2431216С1, 15.06.2010	Способ определения энергии ионизации глубоких уровней в полупроводниковых барьерных структурах и устройство для его осуществления	до 15.06.2015

Продолжение таблицы В.6.1

Неразрушающая диагностика электрических цепей, адмиттансная спектроскопия		Омский государственный университет, 2239814С2, 17.07.2002	Пособ определения областей с нарушенной кристаллической структурой в материалах с металлической проводимостью	аннулирован в связи с истечением срока действия
Неразрушающая диагностика электрических цепей, адмиттансная спектроскопия		Тамбовский военный авиационный инженерный институт, 2273839С2, 15.09.2003	Свч-способ измерения электромагнитных параметров диэлектрических и магнитодиэлектрических покрытий на металле и устройство для его реализации	аннулирован в связи с истечением срока действия
Адмиттансные методы, измерение адмиттанса.	Япония	NIHON Micro Coating Co., Ltd 0376864A3, 11.12.1989	Coating composition for forming conductive films	до 11.12.2019
Адмиттансные методы, измерение адмиттанса	США	NIHON Micro Coating Co., Ltd., 8148301, 24.08.2007	Method for polishing tape-shaped substrate for oxide superconductor, oxide superconductor, and base material for oxide superconductor	до 24.08.2017
Адмиттансные методы, измерение адмиттанса	США	Agency Industrial Science & Technology, Ministry Of International Trade & Industry, 6183552B1, 27.03.1998	Crystal growth method for thin films of BiSrCaCuO oxides	до 27.03.2018
Адмиттансные методы, измерение адмиттанса		Государственное образовательное учреждение Высшего профессионального образования Курский государственный технический университет, 2390787С1, 04.05.2009	Измеритель параметров многоэлементных пассивных Двухполюсников	до 04.05.2014
Адмиттансные методы, измерение адмиттанса	Россия	Тамбовский военный авиационный инженерный институт, 2295732С1 23.06.2005	Способ определения диэлектрических характеристик полимеров	до 23.06.2015

Продолжение таблицы В.6.1

Технология изготовления сверхпроводящих тонкоплёночных образцов	Австралия	EDGECRAFT CORPORATION, 2003282933A, 25.03.2004	Improved sharpening device	до 25.03.2014
Технология изготовления сверхпроводящих тонкоплёночных образцов	Россия	Московский государственный институт электронной техники, 2298260С1, 09.11.2005	Способ изготовления сверхпроводникового прибора	аннулирован в связи с истечением срока действия
Технология изготовления сверхпроводящих тонкоплёночных образцов	США	The Dow Chemical Company, 4087385A, 23.03.1977	Process for making a silver catalyst for oxidizing ethylene to ethylene oxide	до 23.03.1917
Технология изготовления сверхпроводящих тонкоплёночных образцов	Япония	orschungszentrum Jülich GmbH, 0868753A2, 22.12.1995	Layer sequence with at least one epitaxial, non-c-axis oriented htsc thin film or with a layer of a structure crystallographically comparable to htsc	до 22.12.2015
Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих сверхпроводящие джозефсоновские переходы	США	Fujitsu Limited , 6083266A, 26.06.1997	Simulation apparatus and simulation method using moment method	до 26.06.2017
Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих сверхпроводящие джозефсоновские переходы	США	Industrial Technology Research Institute , 7877244B2, 29.06.2007	Simulation circuit of toggle magnetic tunnel junction (MTJ) element	до 29.06.2017
Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих сверхпроводящие джозефсоновские переходы	США	Nec Electronics Corporation, 6553340B1, 07.07.1997	Computer simulation method for semiconductor device	До 07.07.2017

Таблица В.6.2-Научно-техническая, конъюнктурная, нормативная документация и материалы государственной регистрации (отчёты о научно-исследовательских работах)

Предмет поиска	Наименование источника информации с указанием страницы источника	Автор, фирма (держатель) технической документации	Год, место и орган издания (утверждения, депонирования) источника
1	2	3	4
Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих сверхпроводящие джозефсоновские переходы	Jspice3 Circuit Simulator // электронный ресурс] URL: http://www.wrcad.com/jspice3.html (дата обращения 11.03.2013)	Whiteley Research Incorporated	2008 Sunnyvale, CA, USA, Whiteley Research Incorporated
Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих свнрхпроводящие джозефсоновские переходы	E. S. Fang and T. Van Duzer "A Josephson integrated circuit simulator (JSIM) for superconductive electronics application", Extended Abstracts of Int. Superconductivity Electronics Conf., pp.407 -410 1989	ГПНТБ	1989, Kikaishinko-Kaikan, 3-5-8 Shiba-Koen, Minato-Ku, Tokyo, Japan
Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих свнрхпроводящие джозефсоновские переходы	S. Whitely "Josephson Junction in SPICE3", IEEE Trans. Magnetics, vol. 27, pp.2902 -2905 1991	ГПНТБ	1991, IEEE, New York, USA
Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих свнрхпроводящие джозефсоновские переходы	.G. Rollins "Simulator for superconducting circuits", IEEE Trans. Computer-Aided Design, vol. 10, pp.245 -251 1991	ГПНТБ	1991, IEEE, New York, USA
Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих сверхпроводящие джозефсоновские переходы	W. T. Tsang and T. Van Duzer "DC analysis of parallel arrays of two and three Josephson junctions", J. Appl. Phys., vol. 46, pp.4573 -4580 1975	ГПНТБ	1975, American Institute of Physics
Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих сверхпроводящие джозефсоновские переходы	R. L. Peterson and C. A. Hamilton "Analysis of threshold curves for superconducting interferometers", J. Appl. Phys., vol. 50, pp.8135 -8142 1979	ГПНТБ	1979, American Institute of Physics
Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих сверхпроводящие джозефсоновские переходы	B. Landman "Calculation of threshold curves for Josephson quantum interference devices", IEEE Trans. Magnetics, vol. 13, pp.871 -874 1977	ГПНТБ	1977, IEEE, New York, USA

Продолжение таблицы В.6.2

<p>Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих сверхпроводящие джозефсоновские переходы</p>	<p>L. Chua and P. Lin Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits: Algorithm & Computational Techniques, 1975 :Prentice-Hall</p>	<p>ГПНТБ</p>	<p>1975, Prentice-Hall New York, USA</p>
<p>Программное моделирование анализа электромагнитных цепей, содержащих сверхпроводящие джозефсоновские переходы</p>	<p>Qassemzadeh and T. R. Scott "Algorithms for ASTAPIA network analysis program", IEEE Trans. Circuit Theory, vol. CT-20, pp.628 -634 1973</p>	<p>ГПНТБ</p>	<p>1973, IEEE, New York, USA</p>