

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский педагогический государственный
университет»

На правах рукописи



Шураков Александр Сергеевич

**Спектр выходного сигнала терагерцового
приемника на основе гетеродинного и прямого
НЕВ-детектора**

01.04.03 – Радиофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д. ф.-м. н., проф.

Гольцман Григорий Наумович

Москва – 2018

Содержание

Введение	5
Глава 1. Терагерцовые приемники на основе НЕВ-технологии	26
1.1. Эффект электронного разогрева в пленке сверхпроводника . . .	26
1.2. Волноводная и квазиоптическая схемы реализации НЕВ-детек- тора	30
1.3. Фононный и диффузионный механизмы релаксации энергии в НЕВ-устройстве	32
1.4. НЕВ-приемник прямого детектирования	38
1.4.1. Модель горячего пятна	38
1.4.2. Метастабильная область ВАХ	39
1.5. Гетеродинный НЕВ-приемник	42
1.5.1. Эффект прямого детектирования	42
1.5.2. Стабильность выходного сигнала	42
1.6. Базовая технология изготовления	45
1.7. Выбор объекта исследования и постановка задач	47
Глава 2. Спектр выходных шумов гетеродинного приемника на основе НЕВ-смесителя	50
2.1. Технология изготовления экспериментальных образцов	50
2.2. Методики измерения основных технических характеристик НЕВ- смесителя	52
2.2.1. Измерение шумовой температуры и эффективности пре- образования	52
2.2.2. Измерение временной стабильности	56

2.3.	Методика реализации отрицательной обратной связи по току смещения НЕВ-смесителя	57
2.3.1.	Измерение корреляции тока смещения и выходной мощности НЕВ-смесителя	59
2.3.2.	Повышение временной стабильности выходной мощности НЕВ-смесителя	59
2.4.	Вклад структурных узлов гетеродинного НЕВ-приемника в системную стабильность	60
2.4.1.	Основные источники нестабильностей	60
2.4.2.	Стабильность выходного сигнала НЕВ-смесителя в зависимости от формы чувствительного элемента	65
2.4.3.	Система стабилизации выходной мощности НЕВ-приемника на ПЧ	68
2.4.4.	Флуктуационная чувствительность гетеродинного приемника на основе НЕВ-смесителя в машине замкнутого цикла	73
2.5.	Выводы к главе	89

Глава 3.	Чувствительность и спектр выходной мощности прямого НЕВ-детектора под действием слабого СВЧ сигнала	91
3.1.	Методика регистрации выходного сигнала прямого НЕВ-детектора при помощи СВЧ рефлектометра	91
3.1.1.	Методика измерения эквивалентной мощности шума	94
3.1.2.	Методика измерения импеданса и эффективности электронного разогрева	95
3.2.	Технические характеристики НЕВ-приемника прямого детектирования со схемой регистрации отклика на базе СВЧ рефлектометра	98

3.2.1.	Чувствительность и динамический диапазон	98
3.2.2.	Цифровой режим детектирования	103
3.2.3.	Зондирование импеданса прямого НЕВ-детектора сверх- слабым СВЧ сигналом	104
3.2.4.	Прямой НЕВ-детектор с нулевым смещением по посто- янному току	108
3.3.	Выводы к главе	110
Заключение		112
Список публикаций		114
Литература		116

Введение

Открытие эффекта электронного разогрева в тонких сверхпроводниковых пленках в конце прошлого столетия породило большое число экспериментальных работ, направленных на изучение данного феномена в контексте последующей реализации практических систем детектирования электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. В отличие от основных конкурирующих технологий, таких как туннельный переход сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) и диод с барьером Шоттки (ДБШ), болометр на основе эффекта электронного разогрева в пленках сверхпроводника в резистивном состоянии (НЕВ) не имел частотного ограничения механизма формирования отклика. Данное обстоятельство в сочетании с отличными техническими характеристиками способствовало тому, что НЕВ-смеситель стал наиболее явным кандидатом для осуществления гетеродинных наблюдений на частотах выше 1 ТГц. Успешное использование целого ряда практических инструментов (Heinrich Hertz Submillimeter Telescope (SMT), Receiver Lab Telescope (RLT), Atacama Pathfinder Experiment (APEX), German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies (GREAT), Heterodyne Instrument for the Far Infrared (HIFI)) и существующий спрос на терагерцовые гетеродинные матричные приемники (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA), Stratospheric Terahertz Observatory II (STO-2), Galactic/extragalactic Ultra long duration balloon Spectroscopic Stratospheric Terahertz Observatory (GUSTO), Dome A 5m Terahertz Explorer (DATE5), а также потенциально Origins Space Telescope (OST)) с привлечением НЕВ-технологии подтверждает ее важность, несмотря на отсутствие основательной теоретической базы, позволяющей исчерпывающе описать физику НЕВ-устройства.

В настоящее время в мире существует несколько ведущих научных групп (базирующихся в Голландии, Швеции, Германии, Китае, США и России), осу-

ществляющих разработки в области НЕВ-технологий. Почти 40 лет прошло с момента открытия эффекта электронного разогрева в сверхпроводящих пленках в резистивном состоянии – современные работы в данной области носят как теоретический, так и прикладной характер и могут быть отнесены к одному из следующих направлений:

1. Численное моделирование физических процессов, лежащих в основе функционирования НЕВ-смесителя.

Исторически первыми были созданы НЕВ-смесители миллиметрового волнового диапазона, не оснащенные антенной для ввода электромагнитного излучения, в которых согласование чувствительно элемента с входным сигналом и гетеродином осуществлялось напрямую, что приводило к макроскопическому размеру НЕВ-устройства (порядка длины волны излучения). Для данного класса НЕВ-смесителей была разработана теоретическая база, позволяющая исчерпывающе описать физические основы механизма формирования отклика и хорошо согласующаяся с экспериментальными результатами. Однако, с целью уменьшения оптимальной мощности гетеродина в рамках решения практических задач приборостроения с использованием НЕВ-технологии, размер чувствительно элемента смесителя был значительно уменьшен. Практическое НЕВ-устройство представлено микроскопическим сверхпроводящим мостиком субволнового размера, расположенным между двумя металлическими выводными контактами, образующими фидерную линию планарной антенны. Несмотря на кажущуюся простоту архитектуры, теоретическое описание физики эффекта электронного разогрева в подобной структуре является довольно сложной задачей в связи с наличием сверхпроводимости в контактах, которые изначально должны выполнять роль нормальных резервуаров. На сегодняшний день существу-

ет ряд численных моделей, которые можно использовать для оценки ожидаемых технических характеристик НЕВ-смесителя [1, 2], а структурные особенности чувствительного элемента смесителя сделали его объектом интереса в рамках изучения сверхпроводимости в целом [3].

2. Поиск решений в области технологии и материалов для изготовления НЕВ-детекторов нового поколения.

С точки зрения практического применения НЕВ-детектор должен обладать более высоким быстродействием в области вольт-амперной характеристики (ВАХ), соответствующей оптимальной чувствительности. Несмотря на большое количество выполненных в данном направлении работ, заметный прогресс в области улучшения быстродействия детектора все еще кажется возможным. Последнее может быть достигнуто как для классических низкотемпературных (за счет оптимизации морфологических параметров пленок сверхпроводника и использования альтернативных согласующих подслоев) [4], так и для более инновационных высокотемпературных сверхпроводящих материалов [5]. Анализ изготавливаемых сверхпроводниковых наноструктур методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения позволяет произвести кросс-корреляцию и определить структурные параметры системы «пленка-подслой-подложка» [6], обеспечивающей оптимальные технические характеристики создаваемого на ее базе НЕВ-детектора.

3. Разработка и создание гетеродинных НЕВ-приемников для действующих инструментов радиоастрономии.

Частотная независимость механизма формирования отклика сделала гетеродинный НЕВ-приемник наиболее привлекательным кандидатом для астрономических наблюдений в терагерцовом диапазоне частот, где

он превосходит своих основных конкурентов, таких как смесители на основе структур СИС и ДБШ. На сегодняшний день НЕВ-технология была успешно применена в рамках космической миссии [7, 8], а также целом ряде наблюдений при помощи телескопов наземного [9–11] и самолетного базирования [12, 13]. При этом разработки в области практических инструментов для радиоастрономии на базе НЕВ-устройств продолжают [14–17].

4. Разработка и создание НЕВ-приемников прямого детектирования для нужд импульсной техники.

Тенденции развития терагерцовой техники сопряжены с упрочнением позиций импульсных источников излучения, в которых терагерцовый сигнал получается в результате оптической накачки полупроводникового кристалла [18]. Таким образом, существует потребность в импульсных детекторах с высоким энергетическим разрешением для измерения основных параметров импульсных источников (частота повторения, мощность в импульсе, диаграмма направленности и т.п.) в процессе разработки и создания. Сочетая высокую чувствительность и небольшое время отклика, прямой НЕВ-детектор является лидером по части энергетического разрешения при регистрации коротких терагерцовых импульсов. Так, НЕВ-приемники прямого детектирования были успешно использованы для изучения выходного излучения нелинейных кристаллов под действием инфракрасной накачки [19], исследования свойств терагерцовой частотной гребенки (*англ.* frequency comb) на основе двух квантово-каскадных лазеров [20].

Несмотря на большое число научно-технических работ, появившихся на протяжении последних нескольких десятилетий, НЕВ-технология все еще находит новые применения. Так например, НЕВ-смеситель был использован

в качестве ключевого элемента в рамках реализации схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для стабилизации квантово-каскадного лазера [21–23].

Актуальность исследования. В свете востребованности систем регистрации сверхслабого терагерцового излучения на базе НЕВ-устройств существует необходимость дальнейшей оптимизации их основных технических характеристик и, в частности, достижения предельных значений эффективного времени накопления сигнала с целью увеличения чувствительности при использовании в рамках приемных систем как прямого детектирования, так и предназначенных для гетеродинных наблюдений. Достижение предельных значений стабильности выходной мощности НЕВ-детектора связано с выяснением фундаментальных ограничений, а также преодолением ряда технических сложностей.

Эксплуатация приемной системы на базе низкотемпературного сверхпроводникового НЕВ-детектора сопряжена с использованием криогенного оборудования, необходимого для достижения рабочих температур детектора $\sim 4-6$ К. С учетом истощения природных запасов гелия и высокого уровня развития современных технологий, зачастую, наиболее оптимальным является вариант применения машин замкнутого цикла, не требующих использования жидкого хладагента и имеющих довольно продолжительную среднюю наработку на отказ. Рабочая температура сверхпроводникового детектора в такой машине непостоянна, а вибрации охладительного механизма машины вызывают дополнительные сложности при реализации тракта оптического согласования чувствительного элемента детектора с источниками сигнала и гетеродина. Температурные флуктуации в сочетании с нестабильностью коэффициента согласования мощности накачки могут приводить к заметным осцилляциям рабочей точки смещения детектора по постоянному току. Последнее, в свою очередь, приводит к нестабильности выходного сигнала детектора в силу на-

личия корреляции между рабочим током смещения и выходной мощностью [24].

Исследования, описанные в настоящей диссертационной работе, проводилась в рамках коллаборации Учебно-Научного Радиофизического Центра Московского Педагогического Государственного Университета (УНРЦ МПГУ) и Лаборатории приемных систем Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики (RL CFA), занимающегося обслуживанием и модернизацией гетеродинных приемных модулей на основе СИС-смесителей для радиоинтерферометра Submillimeter Array (SMA). Научно-технический коллектив RL CFA был также задействован в разработке и создании прототипа гетеродинной приемной системы на основе НЕВ-смесителя в рамках реализации канала с центральной частотой 1,44 ТГц для Greenland Telescope (GLT) [15]. На первом этапе реализации приемная система должна была содержать одно НЕВ-устройство, затем предполагался переход к матричному варианту приемника. По итогам анализа структурных особенностей GLT были сформулированы минимальные требования к стабильности выходной мощности НЕВ-смесителя на промежуточной частоте (ПЧ), необходимые для реализации процедур калибровки приемной системы, – значение интегрального времени Аллана должно было попасть в диапазон 5-10 с при шумовой полосе выходного сигнала смесителя ~ 15 МГц.

Влияние нестабильностей физических параметров структурных элементов приемной системы на основе НЕВ-смесителя на стабильность ее выходного сигнала частично исследовано [25]. На сегодняшний день, было предложено несколько способов устранения негативного вклада флуктуаций мощности гетеродина в системную стабильность приемника [26–28]. Существующие методы и технические решения позволяют получить максимальное значение интегрального времени Аллана не более 2,5 с, и при этом природа формирования дрейфовых шумов в выходном спектре НЕВ-смесителя изучена слабо.

Таким образом, актуальность настоящего диссертационного исследования обусловлена несколькими основными моментами: а) необходимостью выявления фундаментальных ограничений стабильности выходной мощности НЕВ-смесителя на ПЧ; б) необходимостью оптимизации существующих методов и средств компенсации паразитных коррелированных шумов в выходном сигнале НЕВ-смесителя; в) необходимостью разработки и апробирования новых физических подходов эксплуатации матричного НЕВ-приемника, направленных на достижение его предельных технических характеристик.

Целью данного диссертационного исследования является изучение природы нестабильностей в выходном сигнале НЕВ-детектора, работающего как в режиме прямого детектирования, так и в гетеродинном режиме, и разработка методов оптимизации воздействия наведенной и собственной нестабильности НЕВ-устройства на его технические характеристики в рамках создания детектирующей системы для регистрации сверхслабого электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот.

Для реализации этой цели были решены следующие подготовительные технические **задачи**:

1. Спроектированы и изготовлены НЕВ-смесители с различной геометрией чувствительного элемента для учета влияния распределения тока в сверхпроводящих мостиках на стабильность смесителя.
2. Создан стенд для изучения спектра выходного сигнала НЕВ-смесителя, оснащенный усилительной широкополосной цепочкой с системой активной стабилизации температуры и собственным интегральным временем Аллана ~ 20 с при шумовой полосе выходного сигнала 15 МГц.
3. Реализована элементная база для стабилизации выходной мощности НЕВ-смесителя с привлечением сверхвысокочастотного (СВЧ) подогре-

ва. В частности, разработаны и созданы компактный цифровой и аналоговый пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы для автоподстройки амплитуды стабилизирующего СВЧ излучения, а также полосковый направленный ответвитель для подачи излучения на смеситель.

4. Осуществлена оптимизация характеристик машины замкнутого цикла для последующей установки НЕВ-смесителя. В частности, изготовлен набор терагерцовых окон, размах колебаний температуры холодной платы машины уменьшен до 1 мК.
5. Разработана методика СВЧ рефлектометрии для регистрации отклика прямого НЕВ-детектора на терагерцовое излучение.
6. Создан стенд для реализации гомодинной схемы СВЧ рефлектометра.

В качестве **объектов исследования** были выбраны волноводный и квазиоптический НЕВ-детекторы из тонких разупорядоченных пленок нитрида ниобия на подложках из монокристаллического кварца и высокоомного кремния соответственно.

Предметом исследования являлись нестабильности в выходном сигнале НЕВ-детектора, работающего как в режиме прямого детектирования, так и в гетеродинном режиме; их влияние на основные технические характеристики приемных систем на базе НЕВ-детекторов, такие как стабильность, чувствительность, быстродействие.

Методы исследования. В рамках проводимых исследований оценка чувствительности приемной системы на базе НЕВ-детектора осуществлялось путем измерения шумовой температуры с использованием метода Y-фактора для гетеродинного приемника или измерения эквивалентной мощности шума (ЭМШ) для приемника прямого детектирования. Стабильность оценивалась

на основе анализа кривой дисперсии Аллана, построенной для выходного сигнала приемника. Оценка быстродействия выполнялась путем измерения полосы преобразования в случае гетеродинного приемника или, в случае приемника прямого детектирования, анализа преобразований Фурье выходной мощности приемника при наличии на его оптическом входе нагрузки в виде черного тела комнатной температуры или амплитудно-модулированного терагерцового сигнала. Измерения технических характеристик приемных систем проводились при рабочих температурах НЕВ-устройства вблизи температуры жидкого гелия.

Практическая значимость. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, были использованы при разработке и создании прототипа приемной системы на основе НЕВ-смесителя в рамках реализации канала с центральной частотой 1,44 ТГц для GLT (в числе потенциальных кандидатов DATE5 и GUSTO). Кроме того, полученные наработки были успешно применены для создания инновационных коммерчески доступных одно- и многоэлементных приемников на базе прямого НЕВ-детектора с нулевым смещением по постоянному току компанией ЗАО «Сконтел», созданной представителями Учебно-научного радиофизического центра МПГУ для коммерциализации результатов научно-технических разработок.

Научная новизна данной диссертационной работы заключается в исследовании физических основ формирования дрейфовых шумов в выходном сигнале НЕВ-смесителя, а также комплексном изучении влияния СВЧ излучения на функционирование НЕВ-устройства, используемого в рамках гетеродинной приемной системы и приемника прямого детектирования, и разработке методов и схем на его основе, направленных на достижение предельных значений стабильности и чувствительности приемников. В работе представлены как предложенные ранее и существенно оптимизированные, так и совершенно оригинальные научно-технические решения.

В ходе работы были получены следующие **научные результаты**:

1. Установлена точная количественная корреляция между стабильностью выходной мощности НЕВ-смесителя и рабочим током смещения. На основе этого разработана и реализована автономная система СВЧ подогрева электронной подсистемы НЕВ-смесителя с отрицательной обратной связью по току смещения для стабилизации рабочей точки смесителя по постоянному току.
2. Исследована стабильность гетеродинного приемника на основе НЕВ-смесителя, выявлены доминантные источники коррелированного шума в выходном сигнале приемника. На основе этого создан прототип приемной гетеродинной системы на основе НЕВ-смесителя в машине замкнутого цикла. Частота источника гетеродина – 1310 ГГц, флуктуационная чувствительность – 0,5 К, время Аллана – 5 с (флуктуации температуры и вибрации, вызываемые машиной, скомпенсированы).
3. Исследованы шумовые характеристики и спектр выходного сигнала прямого НЕВ-детектора, работающего в рамках схемы регистрации отклика на базе СВЧ рефлектометра: определена оптимальная мощность зондирующего СВЧ сигнала и параметры смещения по постоянному току. На основе этого сформулированы принципы для создания матричного приемника терагерцового излучения на базе прямого НЕВ-детектора с нулевым смещением по постоянному току.
4. Подтверждена стабильность прямого НЕВ-детектора, смещенного в гистерезисную область ВАХ при развертке напряжения смещения в сторону понижения, путем измерений в лабораторных условиях спектральных линий N_2O .
5. Изучены особенности частотно-импульсной модуляции релаксационных

колебаний в выходном спектре прямого НЕВ-детектора, работающего в рамках схемы СВЧ рефлектометрии: получена зависимость частоты колебаний от рабочей температуры детектора и мощности входного терагерцового сигнала.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Различие распределения токов в микромостиках и параллельных структурах из NbN того же размера в плане и толщины не влияет на характерные времена дрейфа выходного сигнала НЕВ-смесителей на их основе, флуктуационная чувствительность смесителя определяется объемом чувствительного элемента.
2. Применение схемы СВЧ автоподстройки тока смещения к НЕВ-смесителю в охладителе на пульсирующих трубках позволяет полностью устранить соответствующие частоте рабочего цикла охладителя компоненты в выходном спектре смесителя с получением шумовой температуры 430 К на частоте гетеродина 1310 ГГц, интегрального времени и дисперсии Аллана выходной мощности на ПЧ 5 с и 3×10^{-7} соответственно при объеме чувствительного элемента смесителя $0,004 \times 0,11 \times 1,1$ мкм³.
3. Обработка выходного сигнала прямого НЕВ-детектора при помощи СВЧ рефлектометра обеспечивает возможность нулевого смещения детектора по постоянному току без ухудшения чувствительности в сравнении со стандартной схемой смещения и с получением ЭМШ не более 10^{-12} Вт/Гц^{0,5} на частоте сигнала 830 ГГц.
4. Частота релаксационных колебаний прямого НЕВ-детектора в рамках схемы СВЧ рефлектометрии пропорциональна мощности терагерцового входного сигнала в диапазоне 3–70 нВт при объеме чувствительного элемента детектора $0,004 \times 0,5 \times 5$ мкм³.

Достоверность полученных результатов. Соответствие промежуточных экспериментальных результатов на качественном и количественном уровне материалам, представленным в научно-технических работах других авторов, в сочетании с успешным использованием коммерциализованных наработок и опубликованных по итогам диссертационного исследования материалов представителями научного терагерцового сообщества подтверждают достоверность и надежность полученного итогового результата.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования были представлены на следующих международных конференциях:

- IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, Montreal, QC, Canada, June 17–22, 2012;
- Applied Superconductivity Conference, Portland, OR, USA, October 7–12, 2012;
- IEEE 14th International Superconductive Electronics Conference, Cambridge, MA, USA, July 7–11, 2013;
- The 25th International Symposium on Space Terahertz Technology, Higher School of Economics, Moscow, Russia, April 27–30, 2014;
- The 26th International Symposium on Space Terahertz Technology, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA, March 16–18, 2015.

Промежуточные результаты работы также неоднократно докладывались на семинарах RL CFA и обсуждались с членами научно-технического коллектива УНРЦ МПГУ.

Публикации. Материалы диссертации были опубликованы в 10 научных работах, из них 7 статей в журналах перечня рецензируемых научных

изданий, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7], 1 статья в сборниках трудов конференций [A8], 2 тезиса докладов [A9, A10].

Личный вклад автора. Работы, опубликованные в ходе выполнения диссертационного исследования, были выполнены в соавторстве с членами научных групп УНРЦ МПГУ и RL CFA. Личный вклад автора настоящей диссертации заключался в формулировке целей и задач эксперимента, разработке методик, создании измерительных лабораторных стендов, проектировании и изготовлении вспомогательных устройств, выполнении измерений, обработке и обсуждении результатов эксперимента, написании научных статей. В настоящей диссертационной работе представлены результаты экспериментов из опубликованных работ, полученные автором диссертации лично и при определяющем вкладе автора в измерительный процесс.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех основных глав, заключения, списка научных публикаций автора и библиографии. Объем диссертации составляет 130 страниц, из них 113 страниц текста, включающий также 42 иллюстрации и 8 таблиц. Список литературы включает 136 позиций и представлен на 17 страницах.

Во **«Введении»** обоснованы актуальность темы, научная новизна и практическая значимость диссертационного исследования, приведены основные полученные по итогам исследования результаты, сформулированы защищаемые положения, а также представлено краткое содержание диссертации.

В первой главе **«Терагерцовые приемники на основе НЕВ-технологии»** обозрены основные тенденции развития НЕВ-технологии за последние несколько десятилетий, включая технологию изготовления, расчетный физико-математический аппарат и основные сферы применения.

Во второй главе **«Спектр выходных шумов гетеродинного приемника на основе НЕВ-смесителя»** представлены результаты изучения

вклада нестабильностей узлов гетеродинного НЕВ-приемника в системную стабильность. Предложены методики по улучшению стабильности выходной мощности приемника на основе НЕВ-смесителя в охладителе на пульсирующих трубках, приведены результаты измерений его технических характеристик для конкретных схем реализации предложенных методик и топологий смесителя.

В третьей главе «**Чувствительность и спектр выходной мощности прямого НЕВ-детектора под действием слабого СВЧ сигнала**» приведены исследования особенностей функционирования НЕВ-приемника прямого детектирования со схемой регистрации выходного сигнала на базе СВЧ рефлектометра. Представлены результаты измерений основных технических характеристик приемника в широком диапазоне параметров смещения НЕВ-устройства. Сформулированы основные принципы создания сверхчувствительного прямого НЕВ-детектора с нулевым смещением по постоянному току.

В «**Заключении**» представлены основные полученные в ходе диссертационного исследования результаты.

Список сокращений и обозначений, используемых в работе.

- СИС – туннельный переход сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник;
- ДБШ – диод с барьером Шоттки;
- НЕВ – болометр на основе эффекта электронного разогрева в пленках сверхпроводника в резистивном состоянии (*англ.* hot-electron bolometer);
- SMT – Heinrich Hertz Submillimeter Telescope;

- RLT – Receiver Lab Telescope;
- APEX – Atacama Pathfinder Experiment;
- GREAT – German Receiver for Astronomy at Terahertz Frequencies;
- HIFI – Heterodyne Instrument for the Far Infrared;
- SOFIA – Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy;
- STO-2 – Stratospheric Terahertz Observatory II;
- GUSTO – Galactic/extragalactic Ultra long duration balloon Spectroscopic Stratospheric Terahertz Observatory;
- DATE5 – Dome A 5m Terahertz Explorer;
- OST – Origins Space Telescope;
- ВАХ – вольт-амперная характеристика;
- ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты;
- УНРЦ МПГУ – Учебно-Научный Радиофизический Центр Московского Педагогического Государственного Университета;
- RL CFA – Лаборатория приемных систем Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики (*англ.* Receiver Lab at Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics);
- SMA – Submillimeter Array;
- GLT – Greenland Telescope;
- ФНЧ – фильтр нижних частот;

- ПЧ – промежуточная частота;
- СВЧ – сверхвысокочастотный;
- ПИД – пропорционально-интегрально-дифференцирующий;
- НГ – непрерывная генерация;
- ЧТ – черное тело / чернотельный;
- ЭМШ – эквивалентная мощность шума;
- АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;
- ЖИГ – железо-иттриевый гранат;
- ВЧ – высокочастотный;
- КТП – кремнийорганическая теплопроводная паста;
- СКЗ – среднеквадратичное значение;
- БПФ – быстрое преобразование Фурье;
- LNA – малошумящий усилитель;
- ОСШ – отношение сигнал/шум;
- C_e – теплоемкость электронной подсистемы;
- T_e – эффективная электронная температура;
- T_p – температура подложки;
- G_p – коэффициент, определяемый особенностями электрон-фононного взаимодействия;
- I_{dc} – постоянный ток смещения;

- V_{dc} – напряжение смещения по постоянному току;
- V_{vol} – объем пленки сверхпроводника;
- P_{ac} – поглощенная пленкой мощность переменного тока;
- T_c – критическая температура;
- τ_{p-e} – время фонон-электронного взаимодействия;
- τ_{e-p} – время электрон-фононного взаимодействия;
- τ_{esc} – время ухода неравновесных фононов в подложку;
- C_{rf} – эффективность разогрева по переменному току;
- C_{dc} – эффективность разогрева по постоянному току;
- α – параметр Стекли;
- I_p – нижняя граница диапазона токов бистабильности НЕВ-устройства;
- I_c – критический ток;
- v – скорость движения границы горячего пятна;
- l_{hs} – максимальная длина горячего пятна;
- R_n – нормальное сопротивление;
- ΔT – флуктуационная чувствительность гетеродинного приемника;
- T_{noise} – шумовая температура гетеродинного приемника;
- B – шумовая полоса сигнала ПЧ, задаваемая полосовым фильтром;
- τ – время накопления сигнала;

- $\sigma_A^2(\tau)$ – кривая дисперсии Аллана;
- ΔT_c – ширина температурного перехода в сверхпроводящее состояние;
- P_{hot} – значения выходной мощности смесителя, соответствующие наличию «горячей» нагрузки на его входе;
- P_{cold} – значения выходной мощности смесителя, соответствующие наличию «холодной» нагрузки на его входе;
- T_{amb} – среднее значение комнатной температуры;
- T_{ln2} – температура жидкого азота;
- G_{heb} – коэффициент преобразования смесителя;
- T_{lna} – шумовая температура криогенного усилителя;
- T_{lhe} – рабочая температура смесителя (температура жидкого гелия);
- T_{eff} – эффективная температура «холодной» чернотельной нагрузки, приведенная ко входу рупорной антенны смесительной камеры;
- k – постоянная Больцмана;
- G_{amp} – коэффициент усиления цепи ПЧ;
- P_{if} – значение выходной СВЧ мощности системы при отсутствии на оптическом входе смесителя сигнала гетеродина;
- P_{LO} – мощность гетеродина;
- ΔP_{tot} – системные флуктуации выходной мощности НЕВ-приемника;
- ΔP_{bias} – флуктуации выходной мощности НЕВ-смесителя из-за нестабильности источника смещения;

- ΔP_{load} – флуктуации выходной мощности НЕВ-смесителя из-за нестабильности температуры ЧТ нагрузки;
- ΔP_{lo} – флуктуации выходной мощности НЕВ-смесителя из-за нестабильности мощности гетеродина;
- ΔP_{heb} – собственные флуктуации выходной мощности НЕВ-смесителя;
- r_{IP} – коэффициент корреляции Пирсона для значений тока смещения и выходной мощности НЕВ-смесителя;
- $M_j(z)$ – характеристическая матрица диэлектрической среды;
- r – коэффициент отражения слоистой диэлектрической среды;
- t – коэффициент пропускания слоистой диэлектрической среды;
- R – отражательная способность слоистой диэлектрической среды;
- T – пропускательная способность слоистой диэлектрической среды;
- P_T – полная мощность тепловых потерь, связанных с геометрией держателя;
- χ – коэффициент теплопроводности металла;
- T_{cp} – температура холодной платы охладителя на пульсирующих трубках;
- T_{mb} – температура смесительной камеры;
- R_{dc} – сопротивление НЕВ-смесителя по постоянному току;
- R_l – входное сопротивление цепи усиления сигнала ПЧ;
- τ_{Te} – постоянная времени электрон-фононной системы;

- P_{out} – значение выходной мощности НЕВ-приемника;
- T_{load} – физическая температура нагрузки;
- T_{heb} – шумовая температура НЕВ-смесителя;
- F_{bw} – диапазон входных рабочих частот;
- ΔP_{bb} – изменение подаваемой на оптический вход болометра мощности при смене ЧТ нагрузок;
- h – постоянная Планка;
- ν – частота излучения;
- B_{mesh} – полоса пропускания криогенного сеточного резонансного фильтра;
- B_{res} – полоса разрешения анализатора спектра;
- SNR – отношение сигнал/шум;
- NEP_o – оптическая ЭМШ;
- Γ_{net} – коэффициент отражения сложной цепи;
- S_{ij} – S-параметры участка цепи между портом/портами анализатора и фидерной линией планарной антенны НЕВ-устройства;
- Γ_{heb} – коэффициент отражения НЕВ-устройства в оптимальной рабочей точке смещения по постоянному току;
- Z_{heb} – импеданс НЕВ-устройства в оптимальной рабочей точке смещения по постоянному току;
- C_{rf} – эффективность электронного разогрева переменным током;

- T'_{eff} – эффективная температура системы из двух ЧТ нагрузок;
- V_{res} – напряжение на входе синхронного детектора, представляющее собой отклик НЕВ-устройства;
- ϕ – разность фаз.

Терагерцовые приемники на основе НЕВ-технологии

В данной главе обозрены основные тенденции развития НЕВ-технологии за последние несколько десятилетий, включая технологию изготовления, расчетный физико-математический аппарат и основные сферы применения.

1.1. Эффект электронного разогрева в пленке сверхпроводника

Пришедший из физики полупроводников термин «электронный разогрев» широко используется в настоящее время в физике, описывающей поведение заметного класса сверхпроводниковых детекторов – болометрических приемников на основе эффекта электронного разогрева (НЕВ). На сегодняшний день, НЕВ-смесители и прямые детекторы зарекомендовали себя, как совершенные инструменты для радиоастрономии и терагерцовой спектроскопии [7, 8, 13, 29]. Частотная независимость механизма формирования отклика в широком диапазоне частот в сочетании с достаточно высокой чувствительностью и быстродействием [12, 14, 30–32] сделали НЕВ-приемник наиболее привлекательным кандидатом для осуществления гетеродинных наблюдений на частотах от 1 ТГц и выше.

История НЕВ-технологии началась в 1980-х, когда одним из наиболее популярных предметов исследования было изучение неравновесной сверхпроводимости [33]. Многие работы были посвящены исследованию однородного и неоднородного неравновесного состояния, возникающего в сверхпроводнике под действием электромагнитного излучения. В 1980 эффект электронного

Геометрия образца	Ширина, мкм	Длина, мкм	Толщина, нм
Полоска	0,7–1	300	5–11
Меандр	2	5800	7

Таблица 1.1. Основные геометрические размеры НЕВ-устройств, используемых в [39].

разогрева был обнаружен в нормальном металле, пребывающем в окрестности перехода в сверхпроводящее состояние [34]. Для усиления электрон-электронного взаимодействия, и тем самым повышения эффективности термализации, было предложено перейти от чистого металлического материала к тонкой неупорядоченной пленке с короткой длиной свободного пробега электронов [35]. В 1981 эффект электронного разогрева был зарегистрирован в тонкой сверхпроводящей пленке, находящейся в резистивном состоянии [36, 37]. Наблюдавшееся изменение сопротивления образцов в ответ на приложенное электромагнитное излучение не имело частотной зависимости. Данное обстоятельство в сочетании с полученными значениями времен релаксации энергии подтверждало наличие разогрева квазичастиц в пленке. Природа зарегистрированного эффекта была позже подтверждена в [38]. Данная работа помимо полученных экспериментальных данных также содержала подробный теоретический анализ процесса электронного разогрева. Позже, в конце 1980-х, было исследовано влияние миллиметрового и субмиллиметрового излучения на узкие полоски из тонкой пленки ниобия (Nb), находящиеся в резистивном состоянии [39]. Образцы были изготовлены в форме сверхпроводящих проводов различной длины: наборы значений геометрических параметров приведены в таблице 1.1. Результатом работы стало получение экспериментального подтверждения, что а) избыточное сопротивление сверхпроводящей пленки возникает вследствие ее электромагнитного облучения, б) зависимость времени релаксации такого сопротивления от мощности излучения и транспортного

тока можно объяснить наличием в пленке процесса электронного разогрева. Экспериментальные результаты были сопоставлены с предсказаниями модели сосредоточенного болометра, предполагавшей равномерное распределение электронной температуры вдоль пленки, – количественное соответствие было достигнуто. Для улучшения понимания тонкостей физики, связанной с эффектом электронного разогрева в тонкой сверхпроводящей пленке, исследования были продолжены. В частности, работа [40] была сосредоточена на выявлении ролей таких физических параметров, как температура ванны и транспортный ток, с точки зрения их влияния на формирование сопротивления тонкой и узкой пленки из Nb. Геометрия образцов была аналогична используемой в [39]. Сопротивления пленки, находящейся в постоянном магнитном поле, было исследовано как функция значения транспортного тока и частоты зондирующего микроволнового сигнала диапазона 1–400 МГц. Эксперименты показали, что частотная зависимость сопротивления может быть представлена двумя плато, подобно тому как показано на рисунке 1.1. Причем, первое плато, лежащее в области низких частот, соответствует дифференциальному сопротивлению образца для заданной температуры ванны и рабочего тока смещения, а второе, простирающееся до более высоких частот, эквивалентно сопротивлению по постоянному току. Также было продемонстрировано, что для определенных режимов работы образца спад между плато может быть использован для получения времени релаксации энергии. Результаты были интерпретированы как свидетельство «тепловой» природы формирования импеданса. Другая важная часть работы была посвящена идее устранения воздействия разогрева электронов, и исследованию влияния магнитного поля на возникновение сопротивления пленки при различных значениях тока смещения. Авторами было предложено измерить и построить так называемые изотермические вольтамперные характеристики (ВАХ) длинных мостиков из Nb, размерами в плане 1×300 мкм² и толщиной ~ 10 нм. Экспери-

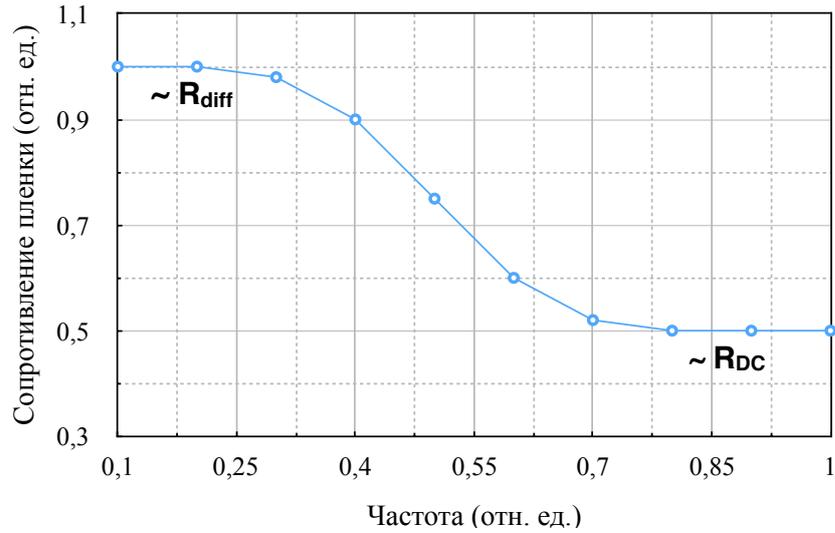


Рис. 1.1. Типичная зависимость сопротивления сверхпроводящего ниобиевого мостика от частоты зондирующего сигнала.

мент показал, что поведение изотермической ВАХ при изменении амплитуды магнитного поля аналогично случаю формирования резистивного состояния посредством вязкого течения вихрей магнитного потока. В качестве дополнительного результата, упомянутая в статье идея эквивалентности эффективных температур электронов в отдельных точках ВАХ, полученных для различного уровня накачки гетеродина, привела в итоге к формулированию изотермического метода [41], ставшего полезным инструментом для оценки мощности электромагнитного излучения, поглощенного пленкой. Данный метод, в частности, до сих пор является весьма полезным инструментом для оценки необходимой мощности гетеродина в процессе разработки практических гетеродинных приемников на основе эффекта электронного разогрева.

1.2. Волноводная и квазиоптическая схемы реализации НЕВ-детектора

Самые первые НЕВ-устройства были выполнены в форме сверхпроводящих проводов микроскопического размера (таблица 1.1). Сверхпроводящая пленка была нанесена на поверхность диэлектрической подложки, а сам чип был интегрирован с волноводной секцией для согласования с электромагнитным излучением. Практическая реализация сверхпроводящего зонда в рамках создания широкополосного волноводно-полоскового перехода с малыми входными потерями является задачей нетривиальной и требует использования сверхпроводящего материала с надлежащими значениями поверхностного импеданса в интересующем диапазоне длин волн. Однако, ситуация значительно упрощается, как только зонд переводится в резистивное состояние. Для этого случая, геометрия волноводно-полоскового перехода для согласования НЕВ-элемента с сигналом миллиметрового диапазона длин волн была предложена в [42]. Предложенный зонд был представлен параллельными полосками сверхпроводника, ориентированными вдоль E -плоскости прямоугольного волновода и заключенными между двумя выводными площадками из нормального металла, расположенными за пределами волновода. При данной конфигурации зонда входное электродинамическое рассогласование может быть легко устранено с помощью правильного выбора сочетания ширины и количества полосок сверхпроводника.

Альтернативная схема реализации волноводного НЕВ-устройства была предложена в [9, 43]. Как показано на рисунке 1.2, НЕВ-смеситель по сути был представлен сверхпроводящим мостиком микроскопического размера, вписанным в фидерную линию антенны «Бабочка», изготовленной из нормального металла. Пленка нитрида ниобия (NbN) была нанесена на поверхность кристаллической кварцевой подложки. Полосковый фильтр низких частот

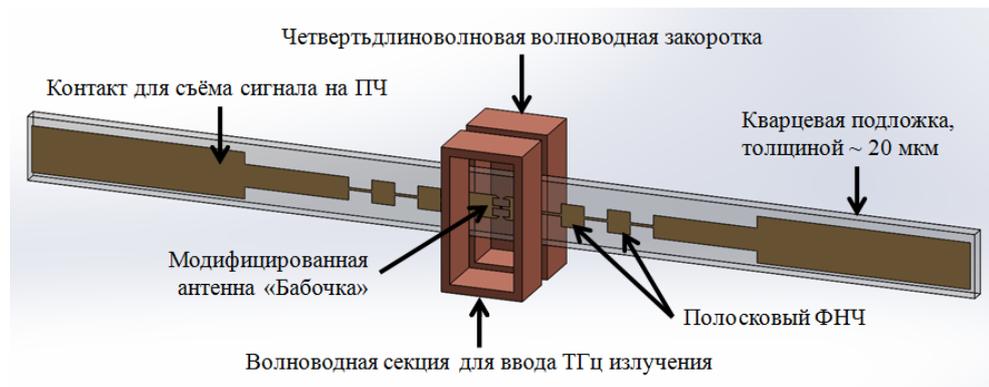


Рис. 1.2. 3D-модель волноводного НЕВ-смесителя, аналогичного описанному в [9, 43].

(ФНЧ) был включен в геометрию чипа НЕВ-смесителя для предотвращения утечки мощностей гетеродина и сигнала в выход смесителя на ПЧ. Чип был интегрирован с волноводной камерой для согласования с электромагнитным излучением, предложенная конструкция была оптимизирована для частот гетеродина вблизи 250 и 800 ГГц. Авторами были рассмотрены и поочередно исключены все потенциально возможные проблемные моменты, связанные с использованием практического гетеродинного инструмента на основе НЕВ-смесителя. Последнее в сочетании с результатами, представленными в [44] развеяло сомнения относительно эффективности волноводной НЕВ-технологии на частотах гетеродина от 1 ТГц и выше.

В квазиоптических НЕВ-смесителях и прямых детекторах используется иной подход для согласования чувствительного элемента с терагерцовым излучением [45, 46]. Как показано на рисунке 1.3, сверхпроводящий мостик обычно вписан в фидерную линию планарной антенны (в приведенном примере – спиральной), интегрированной с диэлектрической линзой, имеющей тот же показатель диэлектрической проницаемости, что и подложка антенны. В такой системе [47, 48] антенна излучает большую часть своей мощности в сторону диэлектрика, что приводит к «однаправленности» коэффициента усиления антенны при использовании линз с высокой диэлектрической проницаемостью. В отличие от волноводного случая, квазиоптическая схема

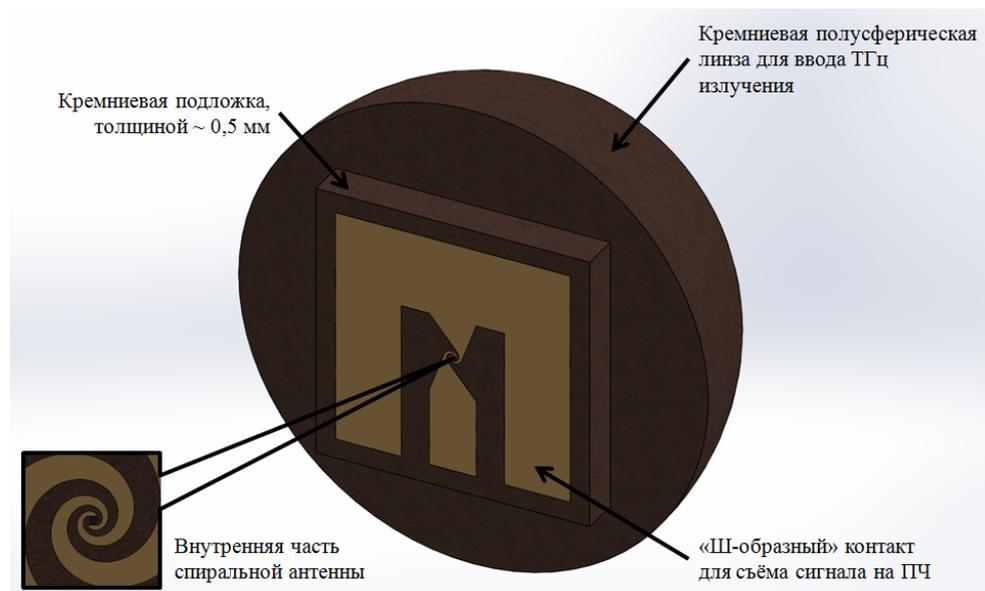


Рис. 1.3. Трёхмерное изображение чипа квазиоптического НЕВ-смесителя, интегрированного с кремниевой полусферической линзой.

реализации способна обеспечить значительно более широкую полосу входных рабочих частот созданного на ее базе приемника [49]. Кроме того, квазиоптическая НЕВ-технология становится еще более привлекательной на более высоких частотах [50, 51], где изготовление волноводов является задачей довольно сложной.

1.3. Фононный и диффузионный механизмы релаксации энергии в НЕВ-устройстве

Экспериментально-теоретические результаты предыдущих исследований [39, 40] были обобщены в [42]. Данная работа включила в себя теорию, описывающую эффект электронного разогрева в тонких сверхпроводящих пленках из Nb и оксида иттрия-бария-меди (YBaCuO) в виде количественного анализа технических характеристик НЕВ-смесителя. Расчеты шумовой температуры, эффективности преобразования, максимальной полосы преобразования и флуктуационной чувствительности были выполнены для различных

режимов работы детектора. Проверка соответствия рассчитанных значений технических параметров экспериментальным данным была сделана для смесителя из Nb. Год спустя, авторы опубликовали более детальную статью [52], в которой отразили основные аспекты и потенциальные проблемные моменты при разработке НЕВ-устройства. В частности, было рассмотрено преобразование частоты вследствие электронного разогрева с четким разграничением от классического болометрического эффекта. В статье также была приведена оценка геометрических параметров системы «Пленка из Nb - подложка из Si» как базис при разработке и создании НЕВ-смесителя: а) описаны условия наличия хорошего теплоотвода между пленкой и подложкой, б) представлены методы устранения обратного рассеяния неравновесных фононов на границе раздела «сверхпроводник-диэлектрик», в) предложены пути достижения Ферми-подобного распределение квазичастиц. Авторы использовали двух-температурную модель [53] для количественного анализа формирования отклика сверхпроводящей пленки, выведенной из равновесного состояния под воздействием периодического электромагнитного излучения. Путем решения уравнения теплового баланса 1.1, записанного для системы представленной на рисунке 1.4, они рассчитали основные технические характеристики НЕВ-смесителя, такие как шумовая температура, эффективность преобразования, импеданс на ПЧ и входное согласование с субмиллиметровым излучением.

$$C_e \frac{dT_e}{dt} = -G_p (T_e^4 - T_p^4) + \frac{I_{dc} V_{dc}}{V_{vol}} + \frac{P_{ac}}{V_{vol}} \quad (1.1)$$

Здесь C_e – теплоемкость электронной подсистемы; T_e – эффективная электронная температура; T_p – температура подложки; G_p – коэффициент, определяемый особенностями электрон-фононного взаимодействия; I_{dc} и V_{dc} – параметры смещения образца по постоянному току; V_{vol} – объем пленки; P_{ac} – поглощенная пленкой мощность переменного тока. Присвоение эффек-

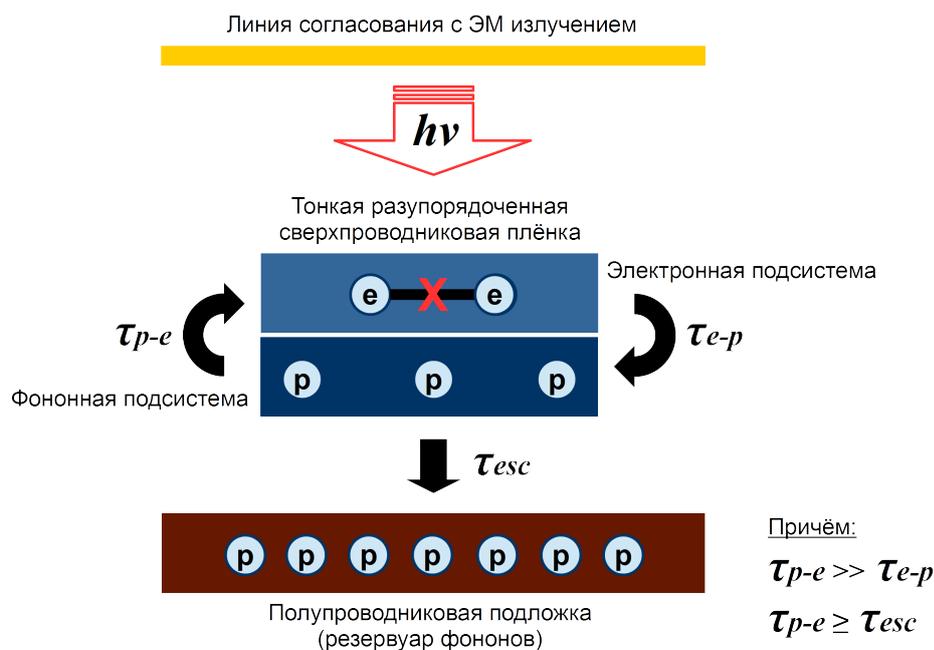


Рис. 1.4. Структурная схема НЕВ-устройства с фоновым каналом охлаждения, отражающая процесс детектирования электромагнитного излучения с частотой много выше щели используемого сверхпроводника. Разрыв Куперовской пары сопровождается обменом энергией между электронной и фоновыми подсистемами детектора, неравновесные фононы в итоге уходят в «холодную» подложку. Температура подложки не должна превышать критической температуры (T_c) сверхпроводниковой пленки. При этом эффективная электронная температура должна быть выше температуры фонованого резервуара, что достигается при описанном на иллюстрации соотношении постоянных времени.

тивной температуры каждой подсистеме пленки было выполнено в рамках гипотезы, что функция распределения квазичастиц является пространственно однородной и подчиняется закону распределения Ферми-Дирака. Теоретические расчеты, в конечном итоге, предсказали несколько преимуществ механизма детектирования на базе электронного разогрева по сравнению с другими нелинейными эффектами в сверхпроводниках: а) независимость эффективности преобразования от частоты гетеродина от миллиметровых до инфракрасных волн, б) возможность корректировки динамического диапазона и необходимой мощности гетеродина путем простого изменения объема чувствительного элемента НЕВ-устройства.

Обсуждаемые в данной главе до настоящего момента НЕВ-смесители являлись устройствами с фононным каналом охлаждения, в которых релаксация энергии осуществляется посредством оттока тепла из электронной подсистемы устройства в холодную подложку (см. рисунок 1.4). Помимо данного типа устройств существуют НЕВ-смесители, называемые диффузионными.

Правильный выбор размера чувствительного элемента НЕВ-смесителя может привести к заметному увеличению ширины полосы ПЧ [54]. Последнее возможно благодаря включению дополнительного механизма релаксации энергии – диффузионного. Представленное в работе [54] значение ширины полосы ПЧ для диффузионного НЕВ-смесителя составило ~ 4 ГГц, что существенно превышало 40 МГц, продемонстрированные ранее в [55] для смесителя с фононным каналом охлаждения. Основная идея заключалась в том, чтобы изготовить сверхпроводниковый мостик с длиной меньше, чем длина диффузии в соответствующем материале, и, тем самым, создать благоприятные условия для ухода «горячих» электронов из тонкой сверхпроводниковой пленки в массивные выводные контакты, изготовленные из нормального металла, посредством диффузии. Контактные площадки подобной структуры могли быть интегрированы с высокочастотным полосковым зондом, подходящим

для волноводной схемы реализации детектора. Однако, тенденция продвижения в сторону диапазона более высоких частот в сочетании с возрастающей потребностью в компактных матричных приемниках создали определенные проблемы для волноводной технологии, и квазиоптические НЕВ-детекторы стали более привлекательны. В данном контексте, предложенный микроболометр обладал значением импеданса, подходящим для интеграции с планарной антенной – системная полоса входных рабочих частот могла быть легко скорректирована правильным выбором ее типа. Последнее в сочетании с малой необходимой мощностью гетеродина, продемонстрированной в [54], подтверждало перспективность диффузионного НЕВ-смесителя как гетеродинного приемника субмиллиметрового диапазона длин волн.

НЕВ-смеситель с диффузионным каналом релаксации энергии стал одним из наиболее привлекательных предметов исследования в сфере НЕВ-технологий в конце 1990-х. Научно-технические работы в данной области были посвящены как теоретическому исследованию и описанию особенностей механизмов формирования отклика [51, 56–60], так и оптимизации технических характеристик смесителей [61, 62]. По итогам многочисленных работ, удалось получить диффузионный НЕВ-смеситель с шумовой температурой 395 и 1850 К (в двухполосном режиме) на частотах гетеродина 0,63 и 2,5 ТГц соответственно [63]. Сверхпроводящий мостик был изготовлен из Nb и имел длину 0,1 мкм. Поглощенная мощность гетеродина составила около 35 нВт. Смеситель обладал ультра-широкой полосой ПЧ $\sim 9,2$ ГГц.

Однако говоря об очевидных преимуществах технологии НЕВ-смесителей с диффузионным каналом охлаждения, следует учитывать несколько основных моментов, связанных с особенностями эксплуатации НЕВ-устройств данного типа. Во-первых, ширина полосы ПЧ достигает своего максимального значения, когда режим работы смесителя выбран таким образом, что эффективная температура электронной подсистемы находится вблизи T_c сверх-

проводниковой пленки. На практике же значение температуры, как правило, выбирается чуть ниже T_c , что незамедлительно приводит к сужению полосы. НЕВ-устройство также страдает от краевых эффектов, в результате которых возникают дополнительные входные потери на частотах гетеродина и ВЧ сигнала, рассогласование с пятидесятиомной линией съема выходного сигнала смесителя на ПЧ, нестабильность рабочей точки смещения по постоянному току [64]. Кроме того, в случае изготовленного в рамках технологии *in situ* [65] НЕВ-смесителя диффузионному уходу «горячих» электронов из находящегося под действием ЭМ излучения сверхпроводника препятствует запирающий потенциальный барьер, возникающий на границе раздела между сверхпроводниковым мостиком и выводными контактами из нормального металла при температурах двухслойной структуры значительно ниже T_c сверхпроводника [66]. В добавок, диффузионный НЕВ-смеситель принципиально обладает существенно меньшим объемом чувствительного элемента по сравнению с фоновым смесителем вне зависимости от сверхпроводящего материала, выбранного для изготовления устройств (справедливо лишь в случае использования одного и того же сверхпроводника при создании обоих смесителей). Данная особенность делает устройство значительно более уязвимым к повреждению в результате стекания электростатического заряда, что является крайне критичным моментом, когда речь заходит о создании практического инструмента для нужд радиоастрономии: например, гетеродинный приемник дальнего инфракрасного диапазона на борту космической обсерватории «Гершель» (HIFI) в конечном итоге был реализован при использовании более надежной технологии НЕВ-смесителей с фоновым каналом охлаждения [8].

Необходимо отметить, что, являясь исторически первым разработанным типом сверхпроводникового детектирующего устройства на основе эффекта электронного разогрева, НЕВ-смеситель с фоновым каналом охлаждения и по сей день подтверждает свою состоятельность в качестве практического

гетеродинного инструмента. Примерами успешного применения данной смесительной технологии могут служить субмиллиметровые приемники, установленные на телескопах наземного базирования – Heinrich Hertz Telescope [9], Receiver Lab Telescope [10], APEX [11], а также используемые при наблюдениях с борта самолета – SOFIA [12, 13] и космического летательного аппарата – HIFI [7].

1.4. НЕВ-приемник прямого детектирования

1.4.1. Модель горячего пятна

Когда на горизонте появились антенные НЕВ-устройства [67], и размер их чувствительного элемента достиг субмикронного масштаба [54], возникла необходимость пересмотра существующих моделей НЕВ. В 1995 году Карасик и соавторы [68] обобщили теорию для анализа шумовых характеристик НЕВ-детектора. Однако как было показано в [68], модель сосредоточенного НЕВ-устройства может быть с некоторой степенью точности использована для количественного анализа технических характеристик устройств лишь с малым размером чувствительного элемента. В 1999 году, независимо и практически одновременно, две группы предложили идею физических основ механизма детектирования в рамках концепции «горячего пятна» и сформировали теоретическую базу для модели распределенного НЕВ-устройства [69, 70]. Модели обеих групп учитывали электронную теплопроводность вдоль мостика в добавок к уходу «горячих» электронов в подложку. Флоет с соавторами [69] связывали формирование электронного «горячего пятна» с нагревом сверхпроводящего мостика под действием приложенного постоянного тока смещения и мощности гетеродина. При наличии радиочастотного сигнала малой амплитуды с частотой несколько отличающейся от частоты гетеродина рассе-

иваемая на чувствительном элементе мощность становится модулированной, что приводит к модуляции длины «горячего пятна». Предложенная авторами концепция была использована для оценки семейства ВАХ, чувствительности по напряжению постоянного тока и эффективности преобразования смесителя. Меркель и соавторы [70] отметили наличие расхождения между значениями эффективностей разогрева по переменному (C_{rf}) и постоянному току C_{dc} для различных областей ВАХ детектора. Разработанная модель предполагала, что в общепринятой рабочей области ВАХ поглощенная мостиком мощность достаточна для формирования в нем нормального домена – «горячего пятна». Авторами было показано, что изотермический метод оценки поглощенной пленкой мощности гетеродина [41] неприменим для малых напряжений смещения, поскольку подаваемая на НЕВ-устройство мощность гетеродина с частотой намного выше сверхпроводящей щели поглощается равномерно вдоль мостика в отличие от мощности постоянного тока, которая поглощается лишь «горячим пятном». Длина «горячего пятна» была использована как входной параметр при расчете распределения температуры вдоль мостика. Далее авторы оценили длину «горячего пятна» как функцию мощности нагрева, и полагаясь на результаты этого расчета, они теоретически получили семейство ВАХ НЕВ-устройства. Параметры смесителя для режима малых сигналов, полученные в рамках модели одномерного распределенного НЕВ-устройства, были использованы для расчета его эффективности преобразования и шумовой температуры.

1.4.2. Метастабильная область ВАХ

В 2001 году Жуангом и соавторами была инициирована серия экспериментов по изучению нестабильностей в выходном спектре НЕВ-детектора, работающего в области отрицательного дифференциального сопротивления

на ВАХ. Исследования были направлены на улучшение понимания явления электронного разогрева в тонких сверхпроводящих пленках и, в частности, должны были внести свой вклад в расширение существующей на тот момент модели «горячего пятна» [70] для НЕВ-устройства. В первой статье [71] авторы произвели детальное изучение ВАХ НЕВ-детектора с фононным каналом охлаждения из сверхтонкой пленки NbN, напыленной на кремниевую подложку. ВАХ в отсутствие мощности гетеродина была разделена на четыре участка, один из которых (соответствующий плато рядом с резким снижением тока смещения) был выделен в качестве предмета особого интереса. В области данного участка ВАХ НЕВ-устройство обладало отрицательным дифференциальным сопротивлением и, следовательно, должно было вести себя как генератор. Действительно, экспериментально была обнаружена неустойчивость параметров смещения НЕВ-устройства, частота осцилляций составила несколько сотен килогерц.

Авторы произвели измерения импеданса в диапазоне частот 0,3 – 400 МГц. Поскольку осцилляции были довольно быстрые, изменение импеданса можно было усреднить. Измерения показали положительное значение импеданса, соответствующее сопротивлению НЕВ-устройства на постоянном токе, независимо от выбора рабочей точки смещения в пределах выбранного участка ВАХ. Полученные экспериментальные результаты позволили сформулировать модель первого порядка, базирующуюся на метастабильном горячем пятне, которое сокращается и расширяется периодически. Периодичность обсуждалась с точки зрения влияния напряжения и тока смещения на поведение вихрей, населяющих мостик из NbN. В 2002 году авторы представили результаты дальнейших исследований явления бистабильности [72], наблюдаемой в НЕВ-устройствах из NbN при определенных режимах работы [73]. Работа была сфокусирована на усовершенствовании модели одномерного горячего пятна с целью объяснения природы наблюдаемых неустойчиво-

стей в количественном виде. Авторы показали, что вихри не могут существовать в мостике из NbN размера, типичного для используемых в работе НЕВ-устройств, и выделили распаривание Куперовских пар в качестве основного механизма, ответственного за формирование значения критического тока. На основании критерия Стекли [74], были сформулированы условия стабильности для НЕВ-образцов. Нестабильность оказалась достаточно ярко выраженной: НЕВ-устройство находилось в бистабильном состоянии в диапазоне тока смещения 30 – 400 мкА. Нижний предел был получен из параметра Стекли (α), как $I_p = \alpha^{-1/2} \cdot I_c \cdot \sqrt{2}$, а верхний предел соответствовал значению критического тока (I_c). Явления бистабильности было рассмотрено с точки зрения распространения переключающихся волн [72], представленных движением границ доменов между сверхпроводящим и нормальным состояниями. Качественная интерпретация природы релаксационных колебаний сопровождалась оценкой их характерной частоты. Полученное значение 30 МГц не в полной мере соответствовало эксперименту, согласно которому частота осцилляций должна была составлять 6 МГц. В 2003 году авторы представили обновление к модели бистабильного НЕВ-устройства [75]. Несколько экспериментов были проведены для изучения динамики нормального горячего пятна в NbN мостике при различных условиях. Во время первого измерения серия из двух коротких импульсов тока посылалась в НЕВ-устройство при рабочем токе смещения ниже I_p , не нарушающем его стабильное состояние. В момент прибытия первого импульса его амплитуда добавляется к рабочему току смещения и общее значение тока смещения превышает I_p . Второй импульс выбирается достаточно длинным, чтобы поддерживать расширение горячего пятна до тех пор, пока оно не охватит весь мостик. Когда импульсы прекращаются, горячее пятно начинает сжиматься и в конце концов исчезает, в то время как напряжение и ток смещения записываются при помощи быстрого цифрового осциллографа. Полученные в эксперименте временные

зависимости параметров смещения были использованы авторами для оценки скорости движения границы горячего пятна $v = \frac{l_{hs}}{2R_n} \cdot \frac{dV}{dt} \cdot (I(t))^{-1}$. Здесь l_{hs} – максимальная длина горячего пятна, R_n – нормальное сопротивление всего мостика, а член $1/2$ появляется в связи с наличием двух границ горячего пятна. Для учета фоновой теплоемкости и андреевского отражения была произведена нормировка расчетных скоростей. Нормированные значения показали хорошее соответствие экспериментальным результатам.

1.5. Гетеродинный НЕВ-приемник

1.5.1. Эффект прямого детектирования

В терагерцовом научном сообществе общеизвестным является тот факт, что шумовая температура и коэффициент преобразования гетеродинного приемника на основе НЕВ-смесителя могут быть недооценены в следствие так называемого эффекта прямого детектирования [76], возникающего во время процедуры калибровки. Эффект заключается в изменении рабочего тока смещения приемника при смене калибровочных нагрузок, представленных черными телами при температуре 300 и 77 К, согласованных с его оптическим входом. Работы [77–81], посвященные количественному описанию влияния данного паразитного эффекта на технические характеристики НЕВ-смесителя с малым объемом чувствительного элемента, приводят значения ошибки до 35 % в зависимости от структурных особенностей смесителя и выбранного режима работы.

1.5.2. Стабильность выходного сигнала

Флуктуационная чувствительность гетеродинного приемника $\Delta T = \frac{T_{noise}}{\sqrt{B\tau}}$ является функцией его шумовой температуры (T_{noise}), шумовой полосы на-

блюдения сигнала ПЧ (B) и времени накопления сигнала (τ). В случае неизменности первого и второго параметров, увеличение времени накопления может быть использовано для достижения более высокого температурного разрешения приемника. Максимальное эффективное время накопления сигнала, известное как время Аллана, соответствует минимуму функции дисперсии Аллана $\sigma_A^2(\tau) = \frac{c_-}{\tau} + c_0 + c_+\tau^\gamma$. Данная функция позволяет учесть вклад разных типов шумов, а именно, белого шума, $1/f$ -шума и дрейфового шума, в системную стабильности приемника. Чтобы удовлетворить требованиям, накладываемым на стабильность практического гетеродинного инструмента для радиоастрономии, приемник должен обладать интегральным временем Аллана [82] порядка 5-10 с для осуществления процедуры калибровки инструмента, а также эффективного накопления сигнала с усреднением вклада в измерение различных стохастических процессов.

Стабильность квазиоптического НЕВ-смесителя с фононным каналом охлаждения была исследована в диапазоне частот источника гетеродина 0,67 – 2,81 ТГц [25]. Измеренные значения интегрального и спектроскопического времен Аллана составили соответственно 0,3 с и 3 с в шумовой полосе 60 МГц. Изучение НЕВ-устройств с различным размером чувствительного элемента показало, что большие образцы обладают лучшей временной стабильностью. Однако, независимо от геометрии сверхпроводникового мостика спектр выходной мощности смесителей содержал сильно выраженную $1/f$ -компоненту, коррелированную во всей полосе ПЧ. В пределах полосы преобразования основным источником собственной нестабильности смесителя были признаны флуктуации эффективной температуры электронной подсистемы НЕВ-устройства, Джонсоновский шум считался основным источником нестабильности на частотах за пределами полосы ПЧ. Работа также подтвердила, что в отличие от гетеродинных приемников на основе структур СИС НЕВ-смесители весьма чувствительны к флуктуациям мощности накачки независимо

от выбора рабочей точки смещения по постоянному току в области ВАХ, соответствующей оптимальной чувствительности приемника.

Существует несколько способов увеличения времени Аллана выходного сигнала НЕВ-смесителя на ПЧ для случая, когда флуктуации мощности гетеродина становятся доминирующим фактором, ограничивающим стабильность всей гетеродинной приемной системы [26–28]. Очевидное и достаточно эффективное решение было предложено в [28] и заключалось в установке перестраиваемого аттенюатора [83] в оптический тракт согласования смесителя с гетеродином. Аттенюатор управлялся пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регулятором, использующим ток смещения НЕВ-устройства как параметр обратной связи, позволяющий осуществлять мониторинг и автоподстройку мощности накачки. Предложенная схема стабилизации позволила компенсировать флуктуации мощности источника гетеродина и увеличить стабильность приемника в 50 раз, что соответствовало измеренным значениям интегрального и спектроскопического времени Аллана в 2,5 с и 25 с, соответственно. Необходимо отметить, что для достижения столь высоких значений времен Аллана помимо применения описанной выше активной системы стабилизации, авторами была использована вакуумная камера, позволившая устранить негативное влияние колебаний делителя пучка, вызываемых воздушными потоками в окружающей среде. Предложенный подход является универсальным и может быть использован практически любым типом источника излучения. Кроме того, в отличие от более ранних работ по реализации аналогичных систем стабилизации с использованием сеточного поляризатора, управляемого шаговым двигателем, схема способна обеспечить малое время отклика: ширина полосы рабочих частот аналоговой части контура обратной связи ПИД-регулятора составила почти 200 Гц. Другая элегантная схема стабилизации была предложена в [24]. Авторы исследовали влияние СВЧ излучения на шумовые параметры, а также стабильность вы-

ходного сигнала волноводного НЕВ-смесителя. Частота сигнала, полученная при помощи работающего в режиме непрерывной генерации (НГ) синтезатора частоты, была выбрана таким образом, чтобы остаться значительно выше верхней границы полосы рабочих частот цепочки усиления сигнала на ПЧ с целью избежать негативного влияния на работу приемника. Поскольку выбранная частота сигнала оставалась существенно ниже сверхпроводящей щели материала, используемого для изготовления НЕВ-устройства, мощность излучения НГ, по сути, осуществляла роль нагревателя. Было показано, что замена небольшой части мощности гетеродина СВЧ излучением не приводит к заметному ухудшению шумовой температуры приемника. Данная особенность позволила реализовать схему автоподстройки рабочего тока смесителя, который поддерживался постоянным при помощи ПИД-регулировки амплитуды СВЧ сигнала в соответствии с изменениями мощности гетеродина. Благодаря наличию корреляции между изменениями тока смещения и выходной мощности НЕВ-смесителя, реализованный контур обратной связи позволил улучшить стабильность выходного сигнала смесителя на ПЧ в широком временном окне наблюдения. Исследования были продолжены и последовал ряд работ, посвященных оптимизации структурных элементов, используемых в рамках цепи обратной связи [24, 84, 85].

1.6. Базовая технология изготовления

Нитрид ниобия зарекомендовал себя как один из наиболее привлекательных материалов для изготовления НЕВ-детекторов благодаря сочетанию ряда своих свойств. Объемный материал имеет $T_c \approx 16$ К, а для сверхтонкой пленки с толщиной менее 10 нм T_c может составлять 9-12 К в зависимости от материала подложки. Пленки NbN демонстрируют высокую критическую плотность тока и полупроводниковую зависимость сопротивления от темпе-

ратуры. Характерное время электрон-фононного взаимодействия позволяет получать полосу преобразования смесителя ~ 10 ГГц для НЕВ-устройства на основе пленки NbN, работающего при температуре вблизи T_c .

Один из самых первых процессов осаждения тонкой пленки NbN был представлен в [86]. С тех пор ряд методов, таких как

- Реактивное магнетронное распыление на постоянном и переменном токе [6],
- Катодное распыление на переменном токе [87],
- Химическое осаждение из газовой фазы [88],
- Импульсное лазерное напыление [89],
- Молекулярно-лучевая эпитаксия [90],
- Атомно-слоевое осаждение [91],
- Осаждение с использованием ионного пучка [92]

были использованы для получения пленок NbN, обладающих необходимой структурой и свойствами.

Сверхпроводящая пленка должна быть нанесена на подложку, обеспечивающую достаточную акустическую прозрачность границы раздела «сверхпроводник-диэлектрик», которая достигается путем согласования фононных спектров пленки и подложки [93]. Для улучшения сверхпроводящих свойств пленки буферный слой со схожей постоянной решетки может быть включен в систему «пленка-подложка». Так например, осажденные поверх подложки из высокоомного Si с покрытием 3C-SiC пленки NbN демонстрируют увеличение T_c на нескольких Кельвин [6]. В случае кварцевой подложки, улучшение акустического согласования с пленкой NbN может быть достигнуто путем

нанесения буферного слоя MgO. В [94] было продемонстрировано, что использование данного буферного слоя при изготовлении НЕВ-смесителя ведет к увеличению полосы ПЧ в 1,5-2 раза и достижению абсолютного значения $\sim 3,5$ ГГц.

За последние два десятилетия был разработан ряд НЕВ-приемников на основе тонких пленок NbN, которые в дальнейшем были задействованы в бортовых и космических радиоастрономических наблюдениях [7, 8]. Возможность использования НЕВ-детекторов из NbN для регистрации слабых сигналов была продемонстрирована в диапазоне от миллиметровых [41, 95–97] до инфракрасных длин волн [98–102]. Пригодные для использования на частотах ниже частоты сверхпроводниковой щели нитрида ниобия, НЕВ-детекторы из NbN достигают максимальной эффективности в верхней части терагерцового диапазона [79, 103–105] и на «сверх-ТГц» частотах [13, 29, 106, 107]. Термин «сверх-ТГц» используется в языке терагерцового сообщества и, как правило, применяется к частотам между 3 и 6 ТГц, в то время как более высокие частоты называются дальним и средним ИК.

1.7. Выбор объекта исследования и постановка задач

В результате проведения аналитического обзора литературы, представленного в данной главе, были прослежены основные тенденции развития НЕВ-технологии за последние три-четыре десятка лет. Данная технология уже не раз доказывала свою состоятельность в рамках получения научного знания. Примеры успешного применения НЕВ-приемников связаны, в первую очередь, с гетеродинными наблюдениями в терагерцовом диапазоне частот. Большинство научных групп, лидирующих в области НЕВ-разработок, сконцентрированы на достижении предельных значений шумовой температуры / эквивалентной мощности шума детектора и увеличении его быстродействия

в рабочей точке. Данные параметры, безусловно, являются весьма важными с точки зрения создания практического приемного устройства. Однако, при проведении продолжительных спектральных / радиометрических измерений на первый план выходит стабильность выходного сигнала приемника. Ряд исследований в данном направлении также был выполнен в прошлом: попытки изучения коррелированного шума в выходном сигнале НЕВ-детектора были проделаны как сточки зрения прояснения фундаментальной природы нестабильностей, так и в рамках прикладных разработок и радиоастрономического приборостроения. Однако точка в вопросе однозначной интерпретации физических процессов, лежащих в основе собственной нестабильности НЕВ-детектора поставлена не была, а полученные на сегодняшний технические характеристики практической гетеродинной системы, такие как флуктуационная чувствительность и время Аллана, все еще далеки от предельных значений. Кроме того, вопрос оптимизации применения методик мультиплексирования, используемых для детекторов на границе сверхпроводящего перехода (*англ.* Transition-Edge Sensor) и на основе кинетической индуктивности (*англ.* Kinetic Inductance Detector), в случае матричной реализации НЕВ-детектора проработан недостаточно детально.

Таким образом, приемник на основе эффекта электронного разогрева в тонких разупорядоченных пленках сверхпроводника в резистивном состоянии был выбран объектом исследования данной научной работы. Экспериментальному изучению подверглись НЕВ-образцы, изготовленные в рамках как волноводной, так и квазиоптической схемы реализации.

В качестве основной задачи диссертационного исследования было выбрано изучение особенностей спектра выходного сигнала терагерцового приемника на базе детектора на основе эффекта электронного разогрева в тонких разупорядоченных пленках сверхпроводника в резистивном состоянии в зависимости от геометрии чувствительно элемента и выбранного режима работы.

В процессе выполнения работы, основываясь на результатах теоретических и экспериментальных исследований, пути улучшения стабильности приемника и эффективности мультиплексирования его элементов при матричной реализации должны были быть сформулированы и реализованы на практике.

Глава 2

Спектр выходных шумов гетеродинного приемника на основе НЕВ-смесителя

В данной главе представлены результаты изучения вклада нестабильностей узлов гетеродинного НЕВ-приемника в системную стабильность. Предложены методики по улучшению стабильности выходной мощности приемника на основе НЕВ-смесителя в охладителе на пульсирующих трубках, приведены результаты измерений его технических характеристик для конкретных схем реализации предложенных методик и топологий смесителя. Основные результаты опубликованы в [A1, A2, A4, A7, A8, A9].

2.1. Технология изготовления экспериментальных образцов

Используемые в рамках эксперимента волноводные НЕВ-смесители были изготовлены на основе ультратонких пленок нитрида ниобия, осажденных на подложки из кристаллического кварца. Напыление пленок нитрида ниобия и толстого контактного золота осуществлялось без снятия вакуума – *in situ* [65]. Геометрия чувствительных элементов смесителей была сформирована при помощи электронно-лучевой литографии.

Структуры НЕВ-смесителей были объединены на подложках в группы, содержащие по 18 устройств в каждой. После завершения процессов напыления, наноструктурирования и первичного тестирования основных параметров структур на постоянном токе кварцевые подложки со структурами были подвергнуты процедурам резки и шлифовки, по итогам которых были получены индивидуальные смесительные чипы размером $2000 \times 125 \times 25$ мкм³ (рисунок

Размер мостика NbN, мкм ²	T_c , К	ΔT_c , К	I_c , мкА	R_n , Ом
0,1×1–0,2×2	10,5	0,7	200–500	105

Таблица 2.1. Значения основных параметров по постоянному току для волноводных НЕВ-смесителей на основе пленки NbN толщиной 3-4 нм. Здесь ΔT_c – ширина температурного перехода в сверхпроводящее состояние.

2.1). В следствие локальных дефектов, возникающих при формировании ультратонких сверхпроводниковых пленок NbN, электрические характеристики НЕВ-устройств в рамках группы слегка отличались. Типичные значения параметров НЕВ-смесителей, полученные по итогам измерения характеристик индивидуальных чипов на постоянном токе, приведены в таблице 2.1.

Квазиоптические НЕВ-устройства, используемые в процессе выполнения работ, были изготовлены из сверхтонкой пленки нитрида ниобия, осаждаемой методом магнетронного распыления на постоянном токе на диэлектрическую подложку из высокоомного кремния. Напыление пленки толщиной 3-4 нм на подогретую до температуры 850 °С подложку осуществлялось в атмосфере газовой смеси аргона и азота, парциальное давление которых составляло 5×10^3 и 10^4 мбар соответственно. Затем при помощи взрывной фотолитографии и термического испарения были сформированы знаки совмещения титан/золото (5/100 нм): использовался фоторезист AZ 1512, испарение происходило в условиях вакуума и при комнатной температуре. При дальнейшем структурировании пленки нитрида ниобия в рамках электронной литографии и плазмохимического травления использовался резиста РММА 950К 3% толщиной 110 нм и смесь для травления на основе аргона и элегаза. Электронный резист в последствии смывался при помощи ацетона. По итогам структурирования пленке придавалась форма прямоугольника с типичным размером в плане $0,15 \times 1,5$ мкм². Выводные контакты на базе системы металлизации титан/золото (5/200 нм) в форме копланарной линии формировались при по-

мощи взрывной фотолитографии с использованием фоторезиста AZ 1512 и термического испарения при комнатной температуре. Разделение кремниевой подложки с чипами НЕВ-детекторов осуществлялось при помощи алмазного скрайбера, размер одиночного чипа составлял 4×4 мм².

2.2. Методики измерения основных технических характеристик НЕВ-смесителя

Чип НЕВ-смесителя устанавливается в волноводную смесительную камеру (рисунок 2.1), размещенную на холодной плате оптического гелиевого криостата (рисунок 2.2), и охлаждается до рабочих температур около температуры жидкого гелия. К выходу смесителя подключается четырехпортовый инжектор, который представляет собой направленный ответвитель на связанных полосках, интегрированный с широкополосным адаптером смещения [108]. Выход инжектора соединен со входом криогенного SiGe усилителя, обладающего коэффициентом усиления 30 дБ в полосе частот 0,1–4 ГГц. Комнатная часть цепи усиления выходного сигнала смесителя базируется на паре малошумящих усилителей с полосой рабочих частот 0,1–8 ГГц [109].

2.2.1. Измерение шумовой температуры и эффективности преобразования

Часть усиленного выходного сигнала НЕВ-смесителя подается на СВЧ измеритель мощности через перестраиваемый полосовой фильтр на железиттриевом гранате (ЖИГ). Развертка ПЧ осуществляется путем перестройки величины тока смещения ЖИГ-фильтра.

В качестве гетеродина используется диод Ганна с цепочкой твердотельных умножителей частоты, обеспечивающей перестройку выходной частоты

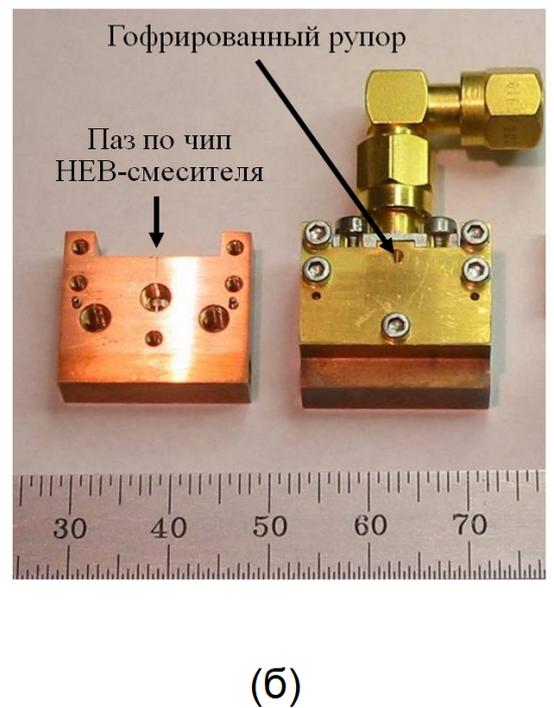
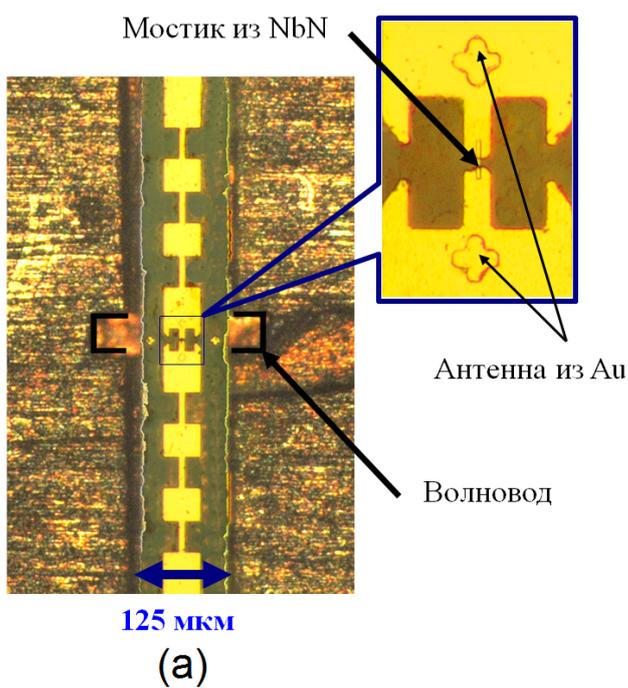


Рис. 2.1. (а) Увеличенное изображение чипа НЕВ-смесителя, установленного в паз волноводной смесительной камеры. (б) Волноводная смесительная камера, предназначенная для согласования смесительного чипа с гетеродином и субмиллиметровым сигнальным излучением, а также съема выходного сигнала смесителя на ПЧ. Камера состоит из 2 частей: точность согласования фидерной линии рупорной антенны передней части камеры и четвертьволновой волноводной закоротки задней части достигается посредством прецизионного штифтования в момент сборки.

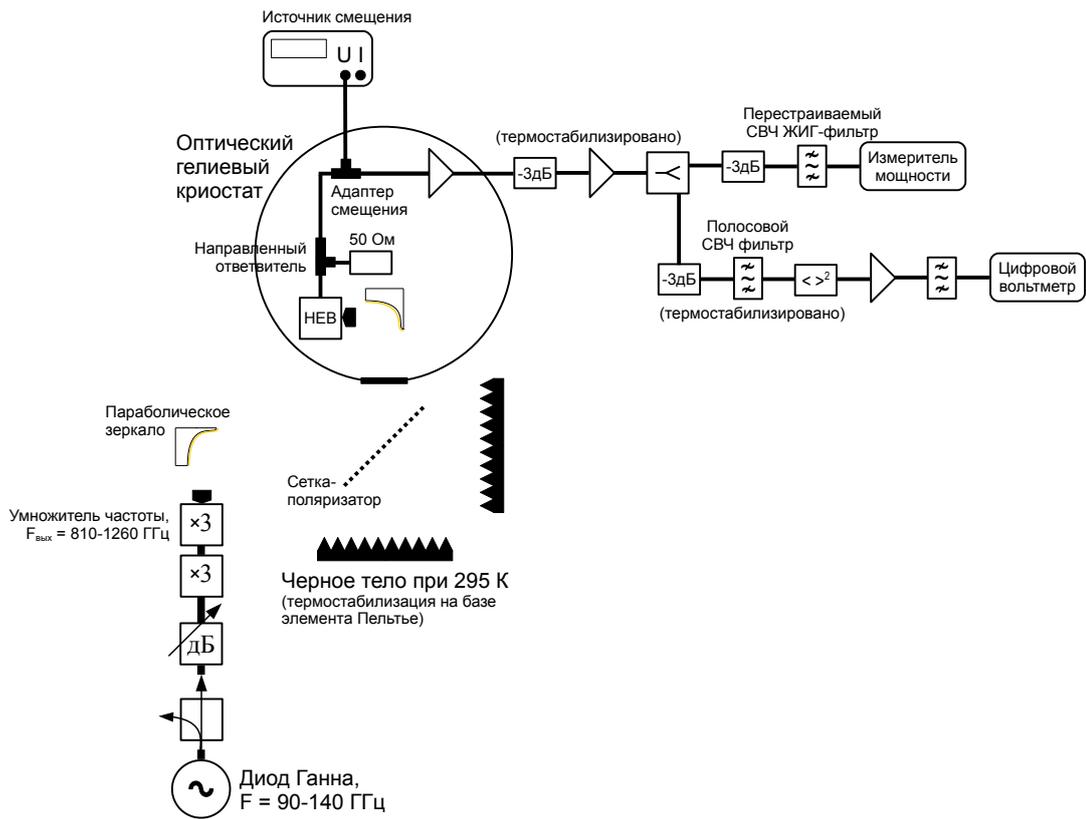


Рис. 2.2. Экспериментальная установка для измерения основных технических характеристик НЕВ-смесителя.

гетеродина в диапазоне 0,810–1,260 ТГц. Мощность гетеродинного сигнала в сочетании с излучением чернотельной нагрузки подаются на оптический вход НЕВ-смесителя через проволочную сетку-поляризатор. Угол ориентации сетки относительно плоскости поляризации волноводной смесительной камеры задает коэффициент ослабления терагерцового сигнала на входе смесителя.

При измерении шумовой температуры НЕВ-смесителя используется метод Y -фактора: оптический вход смесителя поочередно нагружается черным телом (ЧТ) различной температуры, и при этом регистрируется изменение выходной мощности смесителя на ПЧ в виде $Y = P_{hot}/P_{cold}$. Здесь P_{hot} и P_{cold} – значения выходной мощности, соответствующие наличию «горячей» и «холодной» нагрузки на входе смесителя. В качестве первой нагрузки используется ЧТ комнатной температуры, а в качестве второй – ЧТ, погруженное в ванну с жидким азотом. Тогда, системная шумовая температура для заданного значения ПЧ рассчитывается как

$$T_{noise} = \frac{T_{amb} - Y \cdot T_{ln2}}{Y - 1}, \quad (2.1)$$

где $T_{amb} = 295$ К и $T_{ln2} = 77$ К.

При расчете собственной шумовой температуры НЕВ-смесителя необходимо учитывать паразитный вклад входной согласующей оптики и первого усилительного каскада цепи ПЧ, что записывается в виде

$$T_{heb} = \frac{T_{amb} - Y \cdot T_{eff}}{Y - 1} - \frac{T_{lna} + T_{lhe}}{G_{heb}}, \quad (2.2)$$

где G_{heb} – коэффициент преобразования смесителя; T_{lna} – шумовая температура криогенного усилителя; T_{lhe} – рабочая температура смесителя; T_{eff} – эффективная температура «холодной» чернотельной нагрузки, приведенная ко входу рупорной антенны смесительной камеры. При угле ориентации сетки-поляризатора 12° и коэффициенте пропускания терагерцового окна

криостата 90 % получаем значение $T_{eff} = 115$ К.

Коэффициент преобразования НЕВ-смесителя также измеряется с использованием метода «горячей/холодной» нагрузки и рассчитывается как

$$G_{heb} = \frac{P_{amb} - P_{eff}}{kB G_{amp} \cdot (T_{amb} - T_{eff})}, \quad (2.3)$$

Здесь $P_{amb} = P_{hot}$ и $P_{eff} = P_{cold}$, т.е. значения выходного сигнала ПЧ, регистрируемые СВЧ измерителем мощности, при наличии на оптическом входе смесителя «горячего» и «холодного» ЧТ соответственно; k – постоянная Больцмана; B – шумовая полоса сигнала ПЧ, задаваемая ЖИГ-фильтром; G_{amp} – коэффициент усиления цепи ПЧ. Последний измеряется при гелиевой температуре и нулевом напряжении смещения образца и равен

$$G_{amp} = \frac{P_{if}}{kB \cdot (T_{lna} + T_{lhc})}, \quad (2.4)$$

где P_{if} – значение выходной СВЧ мощности системы при отсутствии на оптическом входе смесителя сигнала гетеродина.

2.2.2. Измерение временной стабильности

Другая часть усиленного выходного сигнала НЕВ-смесителя подается на СВЧ смеситель, и его частота понижается относительно частоты опорного сигнала, равной около 1,5 ГГц. Выходной сигнал пониженной частоты направляется на квадратичный СВЧ детектор через полосовой фильтр с полосой пропускания порядка 10 МГц. Выходное напряжение детектора подается на усилитель постоянного тока с коэффициентом усиления 20 дБ, проходит через сглаживающий ФНЧ с трехдецибельным спадом амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) около 250 Гц, а затем регистрируется с помощью цифрового вольтметра, работающего на частоте дискретизации 1 кГц. Полученный временной ряд используется для расчета кривой дисперсии Аллана

[110]. Для удобства сопоставления кривых, полученных для выходного сигнала смесителя различной амплитуды и/или при разной ширине шумовой полосы, временной ряд нормируется на среднее значение и строится нормированная кривая дисперсии Аллана. Продолжительность одного измерения составляет около 250 с.

При измерении кривой дисперсии Аллана на оптический вход НЕВ-смесителя устанавливается чернотельная нагрузка, оснащенная системой автоподстройки температуры около 295 К – использование жидкого азота неприемлемо из-за флуктуаций формы поверхности жидкости, которые приводят к заметному паразитному вкладу нестабильности нагрузки в измеряемую стабильность смесителя. Кроме того, чтобы избежать искажения результатов измерений в следствие влияния дрейфов цепи усиления выходного сигнала смесителя на получаемые профили кривых дисперсии Аллана, рабочая температуры комнатной части цепи ПЧ контролируется с помощью системы термостабилизации на основе элементов Пельтье. В сочетании с реализацией термической развязки цепи от окружающей среды, это приводит к улучшению интегрального времени Аллана практически на порядок: с 4 до не менее 25 с.

Выбранная конфигурация экспериментальной установки и порядок проведения измерений позволяют производить надежный расчет дисперсии Аллана в диапазоне времен интегрирования 0,01–25 с. Кривые дисперсии Аллана измеряются для тока смещения и выходной мощности НЕВ-смесителя.

2.3. Методика реализации отрицательной обратной связи по току смещения НЕВ-смесителя

Для реализации цепи обратной связи используется экспериментальная установка, аналогичная представленной на рисунке 2.3. В работе применена схема СВЧ стабилизации для НЕВ-смесителя на основе NbN. Ранее было

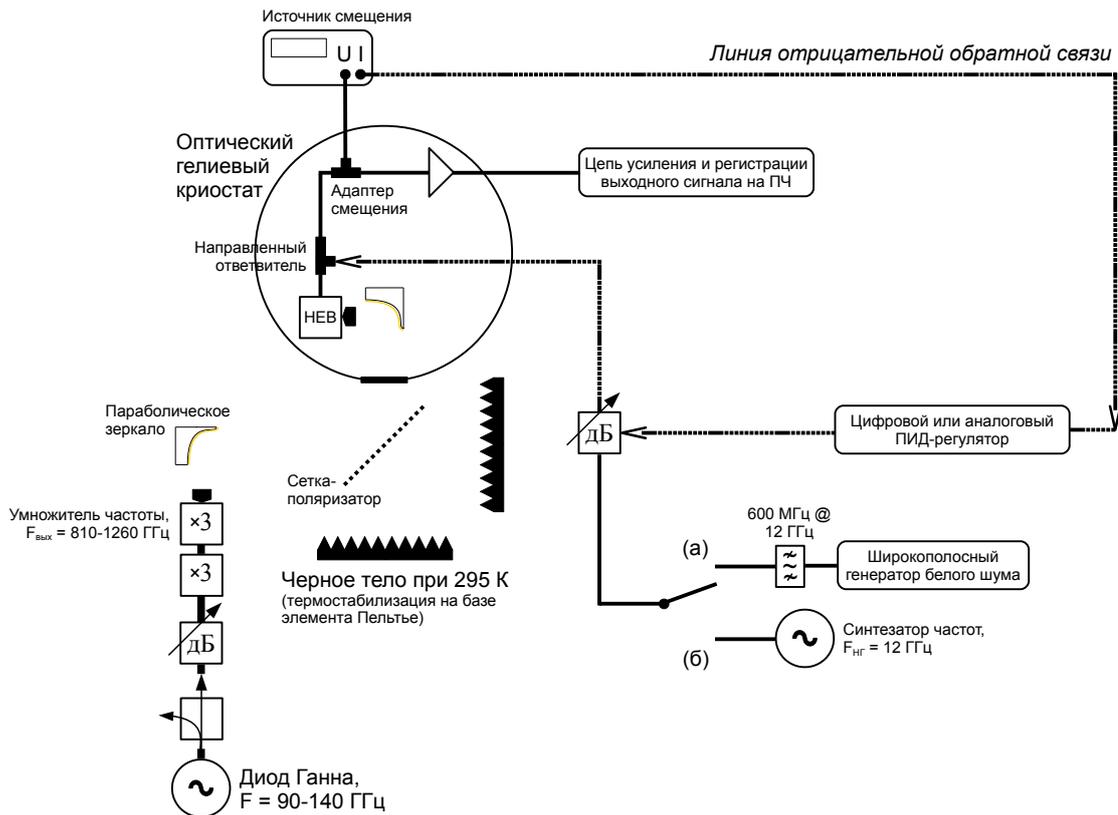


Рис. 2.3. Экспериментальная установка для реализации отрицательной обратной связи по току смещения НЕВ-смесителя.

показано, что небольшое количество СВЧ излучения может быть подано на НЕВ-смеситель для повышения его стабильности [27, 85, 111]. В то время как опубликованные работы по СВЧ стабилизации были направлены на снижение дрейфовых шумов приемника, в рамках настоящей работы данный подход применен в том числе и для компенсации колебаний коэффициента преобразования НЕВ-смесителя, наведенных охладителем на пульсирующих трубках. Метод СВЧ стабилизации имеет преимущества перед другими методами, которые сводятся к контролированию падающей на образец мощности гетеродина [28], потому что источник нестабильности не привязан лишь к флуктуациям мощности гетеродина.

2.3.1. Измерение корреляции тока смещения и выходной мощности НЕВ-смесителя

НЕВ-смеситель работает в режиме смещения по напряжению при приложенной оптимальной мощности гетеродина и под воздействием АМ СВЧ сигнала малой мощности. Предназначенный для отслеживания текущего значения транспортного тока смесителя выходной порт источника смещения и ограниченная ЖИГ-фильтром выходная мощность смесителя подается на многоканальное устройство сбора данных, работающее на частоте дискретизации около 200 кГц. Частота модуляции СВЧ сигнала составляет ~ 1 Гц, длительность одного измерения – 50 с. Для полученных наборов значений токов и мощностей рассчитывается коэффициент корреляции Пирсона (r_{IP})

$$r_{IP} = \frac{\sum_{j=1}^m (I_j - \bar{I})(P_j - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (I_j - \bar{I})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^m (P_j - \bar{P})^2}}, \quad (2.5)$$

где I_j и P_j – j -е элементы в выборке значений тока и мощности соответственно, m -число элементов в выборке, $\bar{I} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I_j$, $\bar{P} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_j$.

2.3.2. Повышение временной стабильности выходной мощности НЕВ-смесителя

Ключевым звеном здесь является цепь СВЧ стабилизации выходной мощности НЕВ-смесителя на ПЧ [27, 85, 111]. В рамках схемы стабилизации на смеситель подается СВЧ сигнал малой амплитуды, выполняющий роль дополнительного источника подогрева его электронной подсистемы. Значение мощности СВЧ излучения, обычно составляющее около 2-3 % от мощности гетеродина (P_{LO}), регулируется при помощи ПИД-алгоритма, входным параметром которого является рабочий ток смещения НЕВ-смесителя. Для ввода стабилизирующего СВЧ излучения малой амплитуды используется соединен-

ный с НЕВ-смесителем направленный ответвитель. Инжектор, в состав которого входит ответвитель, также оснащен полосно-заграждающим полосковым фильтром, препятствующим утечке СВЧ сигнала во входной порт криогенного усилителя ПЧ.

2.4. Вклад структурных узлов гетеродинного НЕВ-приемника в системную стабильность

Основные результаты, описанные в настоящем пункте диссертационной работы, были опубликованы в журналах из перечня международных баз данных [A8, A2], а также доложены на международных конференциях – IMS2012, ASC2012, ISEC2013.

2.4.1. Основные источники нестабильностей

Зависимость выходной мощности гетеродинного НЕВ-приемника на ПЧ от времени, типичная для использованных в эксперименте образцов, показана на рисунке 2.4, на рисунке 2.5 также представлена соответствующая ей кривая дисперсии Аллана.

Флуктуации выходной мощности приемника на ПЧ (ΔP_{tot}) складываются из нескольких основных составляющих:

- нестабильности источника смещения (ΔP_{bias});
- температурный дрейф чернотельной нагрузки (ΔP_{load});
- флуктуации мощности гетеродина (ΔP_{lo});
- флуктуации эффективной электронной температуры и Джонсоновский шум НЕВ-устройства (ΔP_{heb}).

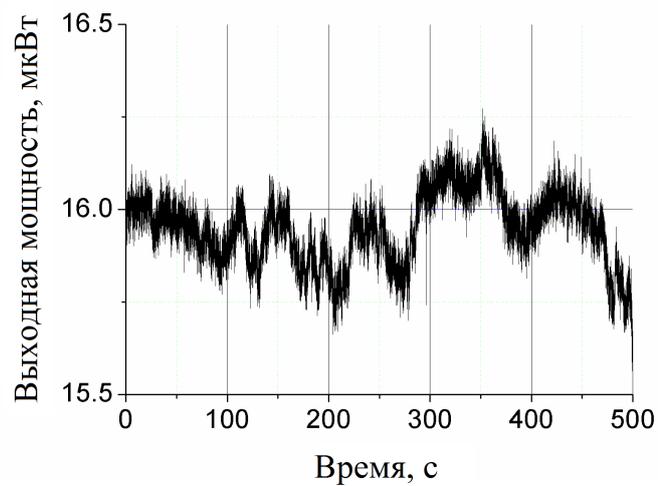


Рис. 2.4. Зависимость выходной мощности НЕВ-приемника (образец 1300/1/1-7) на ПЧ от времени.

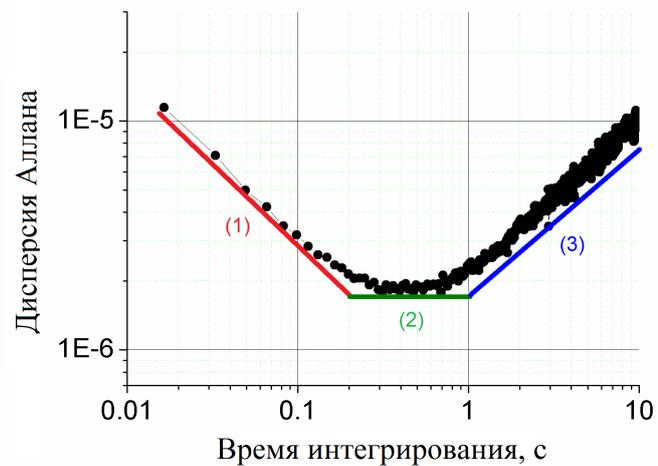


Рис. 2.5. График дисперсии Аллана для выходной мощности НЕВ-приемника (образец 1300/1/1-7) на ПЧ: (1) – компонента, соответствующая белому шуму, (2) – компонента, соответствующая $1/f$ -шуму, (3) – компонента, соответствующая дрейфовым шумам. Кривая нормирована на среднее значение выходной мощности приемника. Время Аллана составляет около 200 мс.

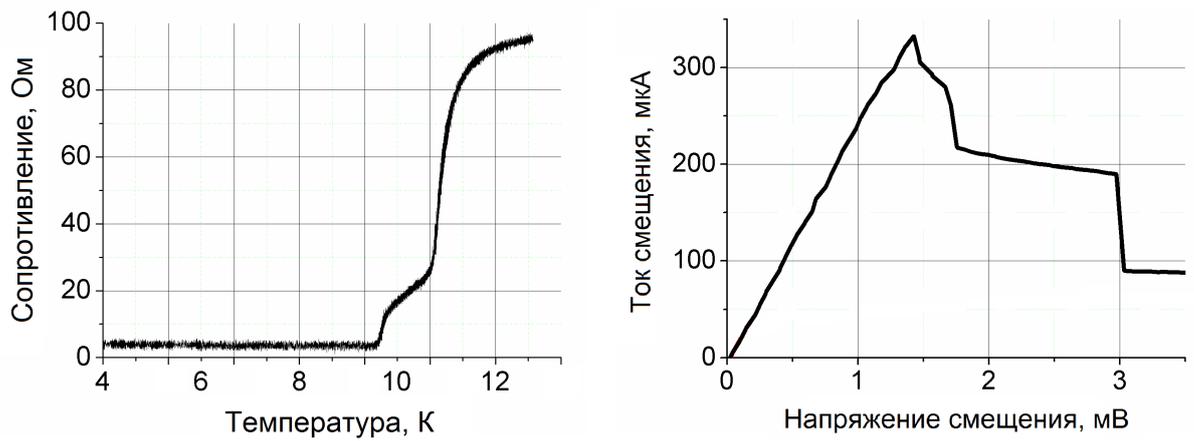


Рис. 2.6. Зависимость сопротивления НЕВ-смесителя от температуры (слева); вольт-амперная характеристика НЕВ-смесителя, измеренная при температуре 4,2 К (справа). Кривые получены для образца 1300/1/1-7.

Таким образом, итоговое значение флуктуаций выходного сигнала приемника на ПЧ можно записать как

$$\Delta P_{tot}^2 = \Delta P_{bias}^2 + \Delta P_{load}^2 + \Delta P_{lo}^2 + \Delta P_{heb}^2. \quad (2.6)$$

Для количественной оценки вклада каждого источника нестабильности в системную стабильность был создан гетеродинный приемник на базе НЕВ-смесителя с размером чувствительного элемента $0,15 \times 1,5 \text{ мкм}^2$. На рисунке 2.6 представлены зависимость сопротивления смесителя от температуры и его вольт-амперная характеристика, измеренная при отсутствии мощности гетеродина и температуре 4,2 К.

Как показано на рисунке 2.7, при подаче на смеситель мощности гетеродина его рабочая область ВАХ находилась в окрестности напряжения смещения 1,3 мВ и покрывала диапазон значений тока смещения 30–50 мкА. Ток смещения 50 мкА соответствовал наилучшей чувствительности: измеренное значение шумовой температуры в двухполосном режиме составило 650 К при коэффициенте преобразования смесителя -13 дБ. На рисунке также приведена зависимость выходной мощности НЕВ-смесителя на ПЧ от на-

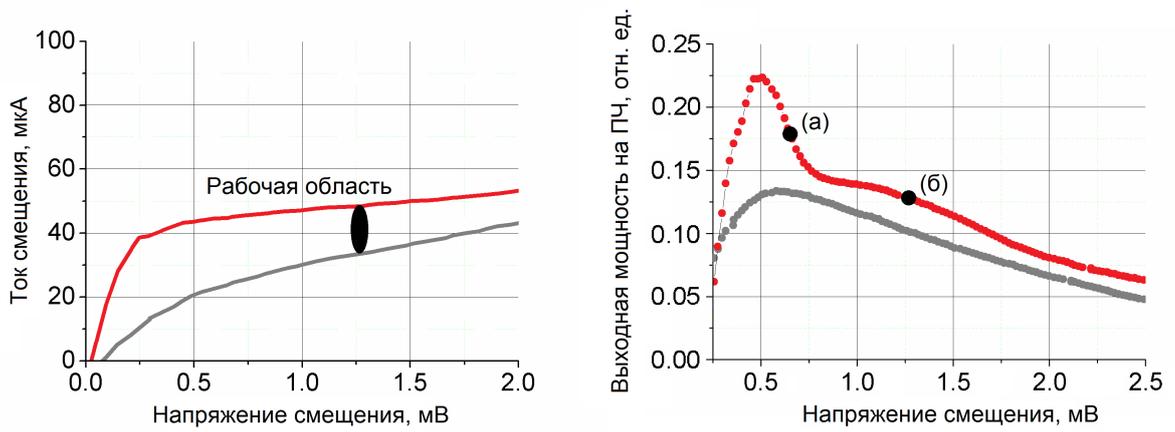


Рис. 2.7. Семейство вольт-амперных характеристик НЕВ-смесителя при наличии мощности гетеродина (слева); выходная мощность НЕВ-смесителя как функция напряжения смещения (справа). Кривые одного цвета соответствуют одинаковому уровню мощности гетеродина, зависимости получены для образца 1300/1/1-7.

пряжения смещения, которую в области напряжений смещения $V_{dc} > 0,5$ В можно аппроксимировать двумя линейными участками (а) и (б) с крутизной $(\frac{\Delta P}{\Delta V})_a = 1$ мкВт/мВ и $(\frac{\Delta P}{\Delta V})_b = 60$ нВт/мВ соответственно. С учетом нестабильности рабочего напряжения смещения $\Delta V_{dc} \approx 0,2$ мкВ при времени интегрирования 1 с (рисунок 2.8) получаем расчетное значение нестабильности выходной мощности смесителя $\Delta P_{bias(a)} = 0,2$ нВт и $\Delta P_{bias(b)} = 12$ пВт в точках (а) и (б) соответственно.

Измеренное значение дрейфа температуры ЧТ нагрузки при времени интегрирования 1 с $\Delta T_{amb} = 1,8$ мК (рисунок 2.8) позволяет пренебречь вкладом слагаемого ΔP_{load} в нестабильность выходной мощности НЕВ-приемника.

На рисунке 2.9 представлены результаты измерения флуктуаций мощности гетеродина через напряжение самосмещения (*англ.* self-biasing) последнего каскада частотного умножения. Среднее значение напряжения самосмещения в рабочей точке составило 400 мВ, что соответствует крутизне вольт-ваттной кривой $(\frac{\Delta P}{\Delta V}) = 75$ нВт/мВ. Таким образом, при времени инте-

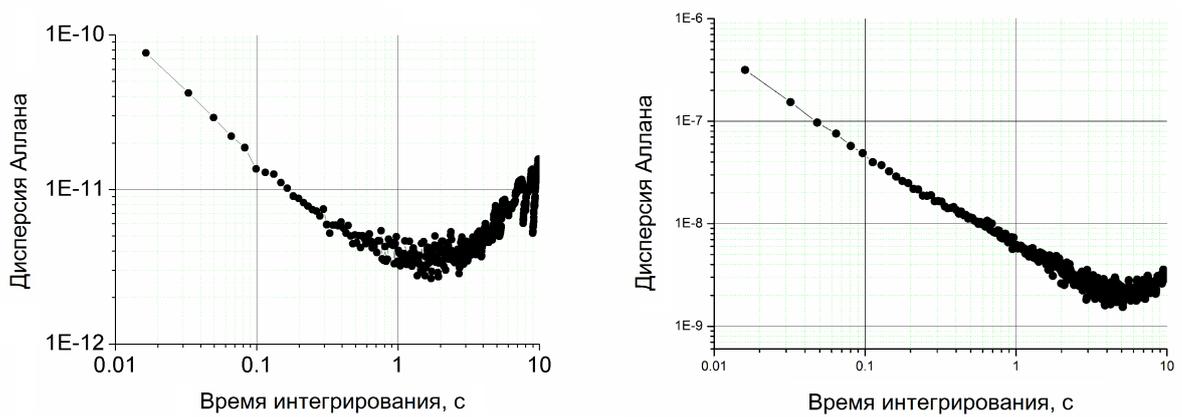


Рис. 2.8. Графики дисперсии Аллана для физической температуры термостабилизированной СВЧ нагрузки, представленной черным телом с температурой на $0,5^{\circ}\text{C}$ выше комнатной (слева), и напряжения источника смещения при наличии на его входе нагрузки $50\ \text{Ом}$ (справа). Обе кривые нормированы на среднее значение измеряемых величин.

рирования $1\ \text{с}$, соответствующем флуктуациям напряжения самосмещения $13,2\ \text{мкВ}$, флуктуации мощности гетеродина составляют $1\ \text{нВт}$. С учетом токовой чувствительности НЕВ-смесителя к изменениям мощности гетеродина – в рабочей точке ВАХ было получено значение $\sim 0,05\ \text{мкА/нВт}$ – получаем флуктуации тока смещения $\Delta I_{dc} = 0,05\ \text{мкА}$. Таким образом, при сильно выраженной корреляции тока смещения и выходной мощности смесителя на ПЧ (детали будут далее представлены в пункте 2.4.3) значение нестабильности выходной мощности смесителя из-за флуктуаций мощности гетеродина $\Delta P_{lo} = 20\ \text{нВт}$.

Результаты измерения системной дисперсии Аллана для выходной мощности гетеродинного НЕВ-приемника представлены на рисунке 2.10. Как видно из рисунка, при автоподстройке тока смещения НЕВ-смесителя с применением СВЧ подогрева стабильность приемника была существенно улучшена. С учетом среднего значения выходной мощности на ПЧ $\sim 15,6\ \text{мкВт}$ при выключенной системе автоподстройки $\Delta P_{tot} = 27\ \text{нВт}$, а при включенной – $16\ \text{нВт}$. Принимая во внимание описанные выше результаты измерений вклада струк-

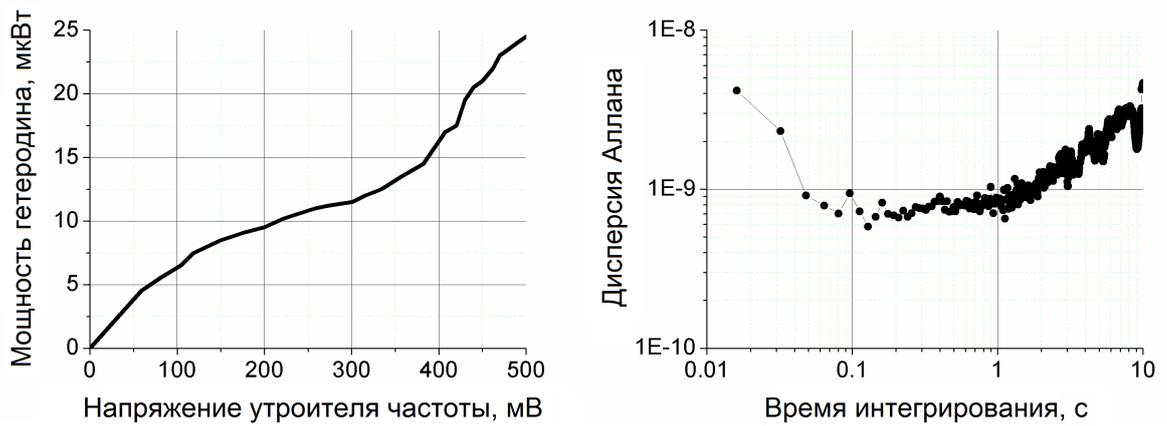


Рис. 2.9. Зависимость выходной мощности утроителя частоты от напряжения самосмещения (слева); нормированный график дисперсии Аллана для напряжения самосмещения (справа). Кривые получены для второго каскада частотного умножения: выходная частота утроителя составляет около 0,8 ТГц.

турных узлов НЕВ-приемника в системную стабильность и уравнение 2.6, получаем $\Delta P_{heb} \approx \sqrt{\Delta P_{tot}^2 - \Delta P_{lo}^2} = 18$ нВт. Очевидно, что вклад флуктуаций эффективной электронной температуры и Джонсоновского шума НЕВ-смесителя не были скомпенсированы при помощи системы автоподстройки его тока смещения.

2.4.2. Стабильность выходного сигнала НЕВ-смесителя в зависимости от формы чувствительного элемента

С целью детального изучения флуктуаций эффективной температуры электронной подсистемы НЕВ-смесителя и их вклада в стабильность выходного сигнала смесителя на ПЧ были изготовлены НЕВ-образцы с различной формой и объемом чувствительного элемента (рисунок 2.11), измерены их чувствительность и временная стабильность. В таблице 2.2 приведены основные геометрические параметры образцов, а также представлены результаты измерений их шумовой температуры и кривой дисперсии Аллана.

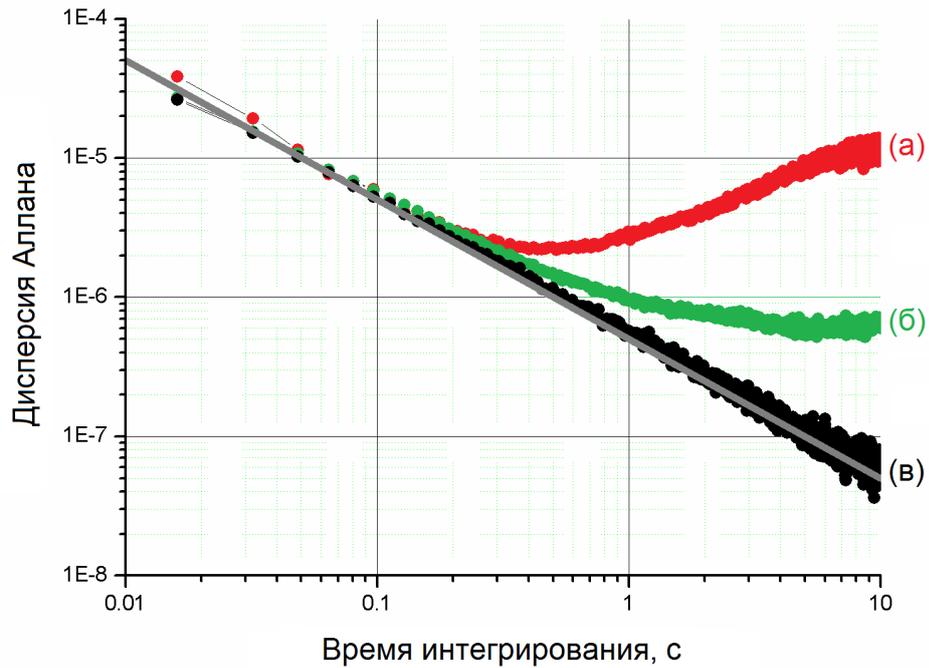


Рис. 2.10. Нормированный график дисперсии Аллана для выходной мощности НЕВ-приемника (образец 1300/1/1-7) на ПЧ при использовании цепи обратной связи (б) и без нее (а). Также на рисунке представлена дисперсия Аллана для цепочки усиления сигнала ПЧ (в), совпадающая с уравнением радиометра при временах интегрирования от 20 мс до 10 с.

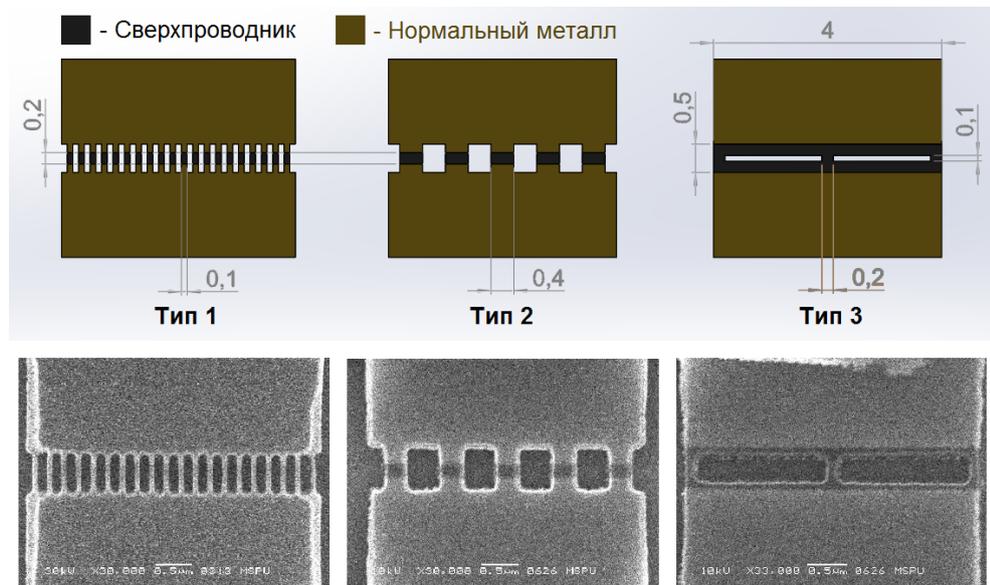


Рис. 2.11. Эскизы (сверху) и снимки с электронного микроскопа (снизу) топологий НЕВ-образцов, используемых в рамках эксперимента. Все размеры приведены в микронах.

№ образца	Топология	V_{vol} , мкм ³	T_A , с	T_{noise} , К	ΔT , К
1595/Е3-12	Мостик	$5,7 \times 10^{-4}$	0,7	710	0,71
1595/Е5-18	Мостик	$6,7 \times 10^{-4}$	1	700	0,52
1595/Е5-7	Мостик	$1,4 \times 10^{-3}$	3	620	0,35
1595/Е5-1	Мостик	$1,4 \times 10^{-3}$	4	600	0,30
1595/Е3-2	Мостик	$1,7 \times 10^{-3}$	3	560	0,32
1595/Е3-1	Мостик	$1,7 \times 10^{-3}$	4	600	0,36
1915/1/5-16	Тип 1	$1,6 \times 10^{-3}$	0,7	3500	3,13
1915/1/5-9	Тип 2	$1,6 \times 10^{-3}$	6	900	0,38
1915/1/5-17	Тип 2	$1,6 \times 10^{-3}$	6	900	0,42
1915/1/5-12	Тип 3	$2,6 \times 10^{-3}$	3	1250	0,34
1915/1/5-18	Тип 3	$2,6 \times 10^{-3}$	4	1250	0,35

Таблица 2.2. Чувствительность и стабильность выходного сигнала НЕВ-образцов различной геометрии. Здесь V_{vol} – объем чувствительного элемента НЕВ-смесителя, T_A – интегральное время Аллана для выходной мощности НЕВ-смесителя на ПЧ, T_{noise} и ΔT – шумовая температура в двухполосном режиме и флуктуационная чувствительность НЕВ-приемника на частоте гетеродина 810 ГГц соответственно.

2.4.3. Система стабилизации выходной мощности НЕВ-приемника на ПЧ

Потребность в схеме активной стабилизации возникает от того, что вследствие флуктуаций мощности гетеродина ток смещения НЕВ-смесителя изменяется со временем, что приводит к флуктуациям выходной мощности на ПЧ. Вблизи области ВАХ смесителя, соответствующей оптимальной чувствительности, измеренное значение $\Delta P_{LO}/\Delta I_{dc}$ оказалось весьма велико и составило около 1 дБ/мкА. Следовательно, малые флуктуации мощности гетеродина способны приводить к большому изменению мощности ПЧ. Таким образом, основная задача цепи стабилизации состоит в компенсации флуктуаций тока смещения посредством контролируемого подогрева электронной подсистемы смесителя СВЧ излучением при использовании терагерцовых источников гетеродина различного типа, в частности, используемого в настоящей работе твердотельного источника на основе диода ганна и цепочки умножителей частоты.

Результаты экспериментальной оценки корреляции тока смещения и выходной мощности смесителя на ПЧ представлены на рисунке 2.12 в виде осциллограмм данных параметров при воздействии на образец АМ СВЧ излучением малой амплитуды. Из рисунка видно, что изменению мощности гетеродина 0,4 мкВт соответствовало изменение рабочего тока смещения 1 мкА. Рассчитанное с использованием полученных осциллограмм значение коэффициента корреляции Пирсона составило $\sim 94\%$ при делении наборов значений тока и мощности на выборки соответствующие временному окну 1 с (рисунок 2.13), что соответствует 200000 элементов в каждой выборке.

Для подачи СВЧ излучения на НЕВ-смеситель как при оценке корреляции его тока смещения и выходной мощности, так и при реализации системы автоподстройки рабочей точки по току смещения был изготовлен полосковый

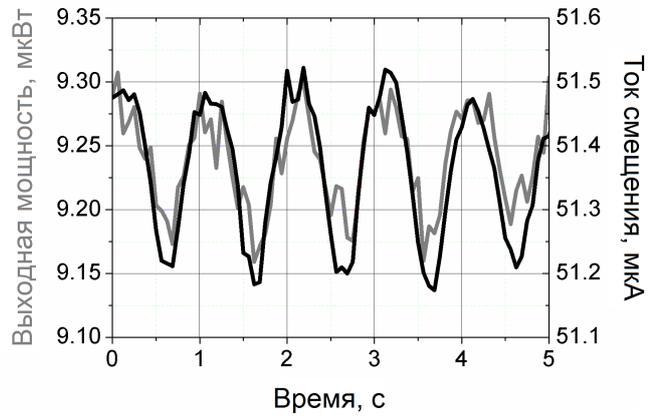


Рис. 2.12. Изменения выходной мощности и тока смещения НЕВ-смесителя при подаче на него амплитудно-модулированного СВЧ сигнала малой мощности.

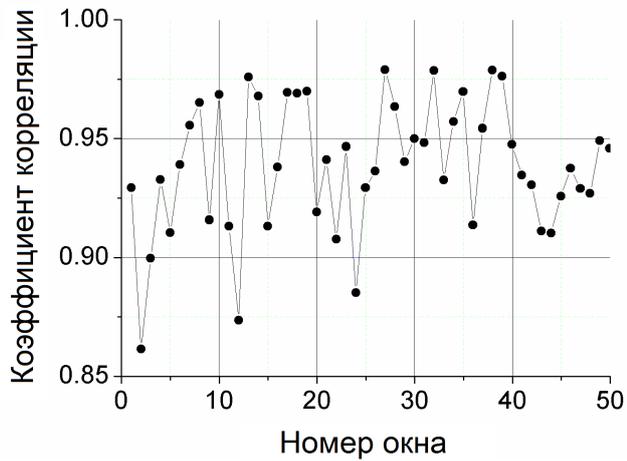


Рис. 2.13. Коэффициент корреляции изменений выходной мощности и тока смещения НЕВ-смесителя при подаче на него амплитудно-модулированного СВЧ сигнала малой мощности.

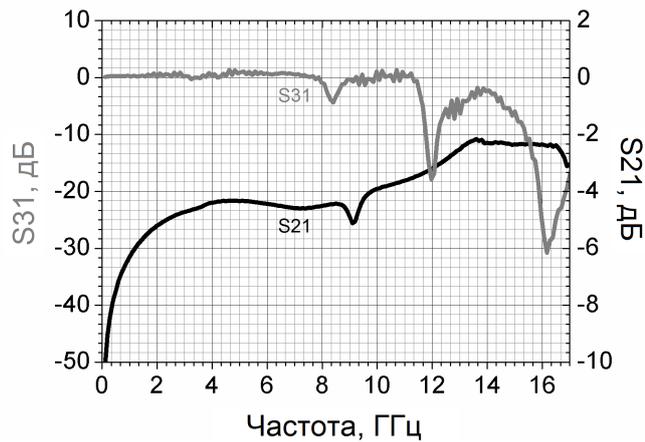


Рис. 2.14. S-параметры полоскового инжектора.

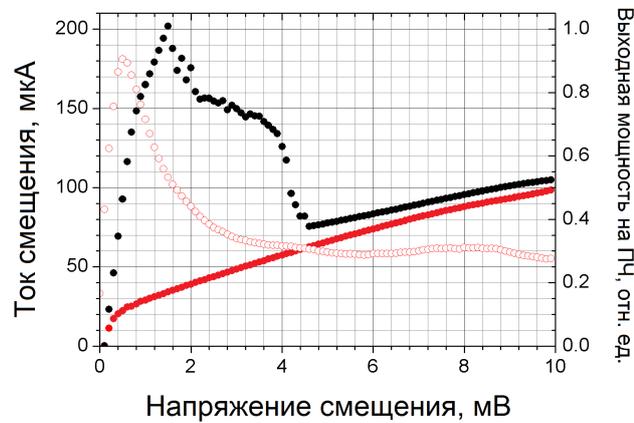


Рис. 2.15. Вольт-амперные характеристики НЕВ-смесителя при наличии (красные круги) и отсутствии мощности гетеродина (черные круги), и выходная мощность смесителя на ПЧ как функция напряжения смещения (красные незакрашенные круги).

инжектор. Результаты измерений S-параметров инжектора представлены на рисунке 2.14.

На рисунке 2.15 показаны вольт-амперные характеристики НЕВ-смесителя при наличии мощности гетеродина с частотой 0,8 ТГц и без нее. Рабочая точка $V_{dc} = 0,9$ мВ, $I_{dc} = 28$ мкА соответствует шумовой температуре смесителя 630 К, измеренной в двухполосном режиме.

Для оценки эффективности цепи обратной связи была измерена дисперсия Аллана для тока смещения НЕВ-смесителя. Каждое измерение длилось

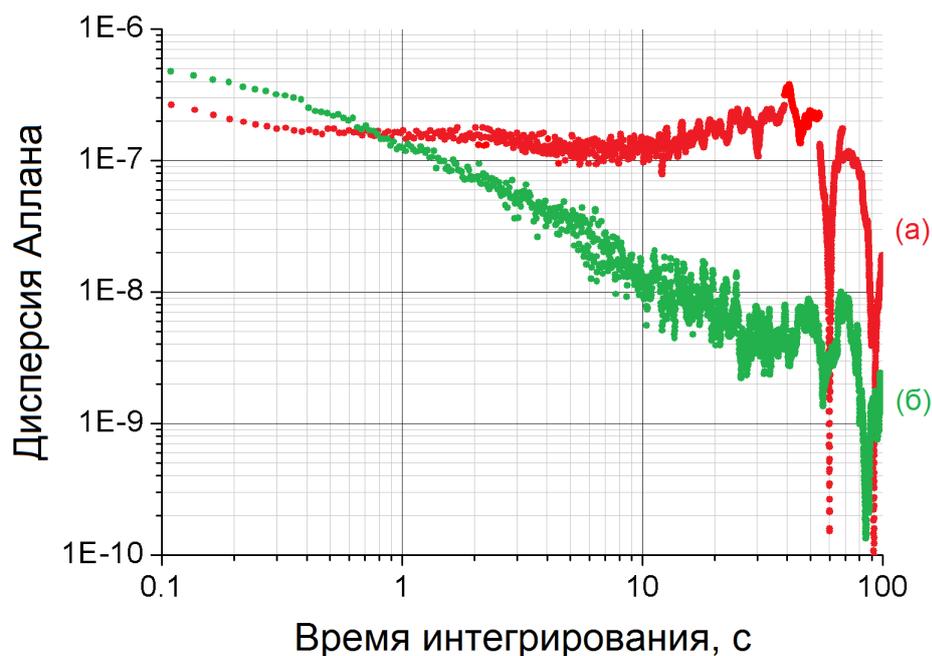


Рис. 2.16. Графики дисперсии Аллана для тока смещения НЕВ-смесителя при использовании цепи обратной связи (б) и без нее (а).

около 10 мин., чтобы обеспечить малую погрешность при расчете дисперсии для времен интегрирования до 30 с. Как показано на рисунке 2.16, схема СВЧ стабилизации подавляет $1/f$ -шум и дрейф и увеличивает время Аллана до 30 с. При помощи ПИД-регулятора подаваемая на образец СВЧ мощность изменялась в диапазоне 10–20 нВт, в то время как поглощенная мощность гетеродина составила 250 нВт. При данном соотношении мощностей было обнаружено небольшое ухудшение шумовой температуры НЕВ-смесителя, которое составило ~ 20 К.

При времени интегрирования 10 с значение нормированной дисперсии Аллана для стабилизированного тока смещения составляет 10^{-8} . Это означает, что мы смогли контролировать ток до 0,01 %, что эквивалентно уровню флуктуаций тока $\Delta I_{dc} \approx 3$ нА или спектральной плотности 10 нА/Гц^{0,5}.

На рисунке 2.17 показаны нормированные графики дисперсии Аллана для выходной мощности гетеродинного приемника на основе НЕВ-смесителя.

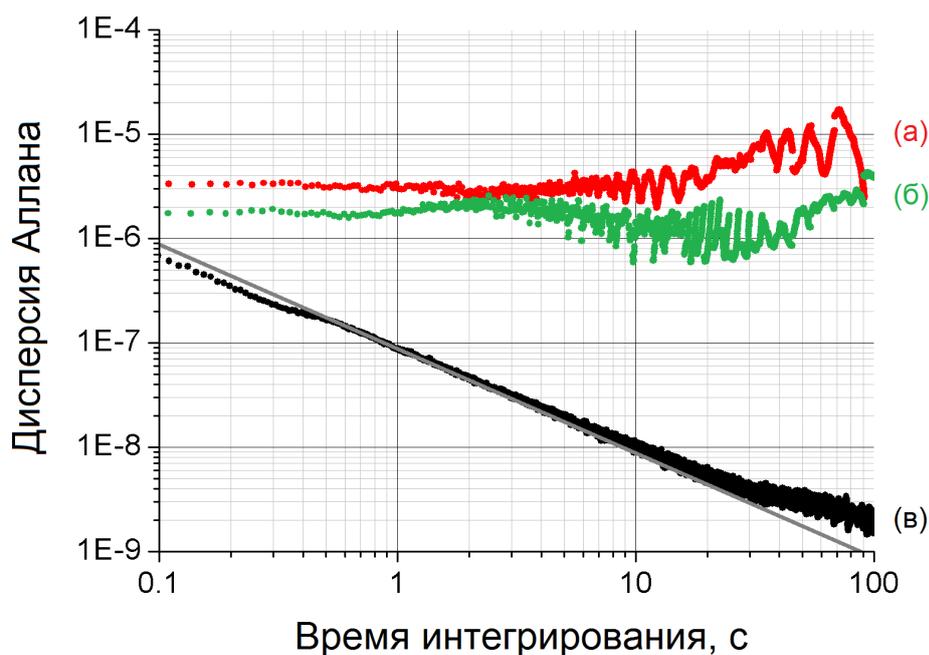


Рис. 2.17. Графики дисперсии Аллана для выходной мощности на ПЧ гетеродинного приемника на основе НЕВ-смесителя при использовании цепи обратной связи (б) и без нее (а). Также на рисунке представлена дисперсия Аллана для цепочки усиления сигнала ПЧ (в): кривая совпадает с уравнением радиометра вплоть до времени интегрирования около 30 с.

Когда цепь обратной связи включена, нормированная дисперсия достигает своего минимума $\sim 10^{-6}$ (в несколько раз лучше, чем в случае отсутствия системы СВЧ стабилизации) для времени Аллана в интервале 10–20 с. Однако, несмотря на наблюдаемое увеличение максимального эффективного времени накопления сигнала приемника значение дисперсии Аллана все еще на два порядка превышает величину теоретического минимума, предсказываемую уравнением радиометра и достигнутую для цепочки усиления сигнала ПЧ.

Завышенное значение дисперсии Аллана для выходной мощности можно объяснить, рассмотрев взаимосвязь между флуктуациями выходной мощности приемника и флуктуациями его тока смещения. Учитывая, что $\left(\frac{\Delta P_{hot}}{P_{hot}}\right)^2 \approx 10^{-6}$ и $\Delta I_{dc} \approx 3$ нА, мы получаем $\frac{\Delta P_{hot}}{P_{hot}} / \Delta I_{dc} \approx 0,3/\text{мкА}$. Данное значение хо-

рошо согласуется со значением $\Delta P_{LO}/\Delta I_{dc} \approx 1$ дБ/мкА, обсуждаемым в начале настоящего пункта. Очевидно, что для того, чтобы снизить дисперсию Аллана на 2 порядка, контроль тока смещения должен быть более прецизионным – обладать точностью до 0,3 нА. Это означает, что спектральная плотность должна быть уменьшена до ~ 1 нА/Гц^{0,5} путем повышение чувствительности измерения тока смещения и путем контроля шума в нашей системе.

2.4.4. Флуктуационная чувствительность гетеродинного приемника на основе НЕВ-смесителя в машине замкнутого цикла

Рабочая температура НЕВ-смесителя не должна превышать половины критической температуры его перехода в сверхпроводящее состояние [112], что составляет 4-5 К для НЕВ-смесителей на основе тонких разупорядоченных пленок NbN. Несмотря на то что данные температуры могут быть легко получены при использовании криогенного оборудования на основе жидкого гелия в условиях лаборатории, машина замкнутого цикла становится наиболее оптимальным выбором в случае полевых измерений в удаленных локациях в силу сложности и дороговизны поставки расходных материалов.

Общеизвестным является факт, что криогенные машины замкнутого цикла имеют недостатки в виде температурных флуктуаций и механических вибраций холодной платы, что является препятствием для стабильной работы гетеродинного приемника на базе НЕВ-смесителя.

Мы выбрали охладитель на пульсирующих трубках (*англ.* pulse-tube cryocooler) с разнесенным от криостата мотором [113]. Данная конфигурация обеспечивает очень низкие механические вибрации. Однако, колебания температуры холодной платы охладителя вызывают флуктуации коэффициента

преобразования НЕВ-смесителя. Диапазон флуктуаций рабочей температуры смесителя, установленного на холодную плату второй ступени охладителя, зависит от тепловой нагрузки ступеней охладителя (активные высокочастотные компоненты, паразитный теплоприток и т.п.) и для охладителя на пульсирующих трубках может в среднем составлять 200-250 мК вблизи номинального значения ~ 4 К, в то время как амплитуда колебаний положения холодной платы охладителя вследствие вибраций ее охладительного механизма достигает 10-15 мкм на частоте порядка 1 Гц. В качестве альтернативного решения, можно было бы использовать охладитель на пульсирующих трубках типа Стирлинга с частотой рабочего цикла не менее 30 Гц, также обеспечивающий достижение гелиевых температур [114]. Более высокая частота рабочего цикла способствовала бы более эффективному продолжительному интегрированию выходного сигнала смесителя. Однако, данный тип охладителя все еще находится в стадии ранней разработки [115].

В нашей работе мы старались максимально снизить температурные флуктуации холодной платы второй ступени охладителя с целью повышения стабильности рабочей температуры НЕВ-смесителя. Для решения данной задачи был произведен ряд модификаций входной оптики охладителя, а также была изменена конфигурация монтажа смесителя на холодной плате охладителя:

- Уменьшено влияние организации процесса теплоотвода в рамках рабочего цикла ненагруженного охладителя на стабильность рабочей температуры.

Размах температурных колебаний нагруженной второй ступени в базовой комплектации охладителя достигал порядка 250 мК при номинальном значении температуры 4 К. Использование редкоземельной пластины, развязывающей выводной контакт второй ступени охладителя и монтажную холодную плату, позволило снизить температурные

флуктуации до 50 мК, при этом повысив среднее значение температуры лишь до 4,2 К.

- Уменьшен паразитный приток тепла через оптические входы охладителя, связанный с фоновым ИК излучением.

В добавок к использованию ИК фильтра Zitex G104 были установлены кварцевые окна (внешнее при 295 К и внутреннее при 65 К) с двухсторонним четвертьволновым просветлением. Необходимая толщина слоев достигалась путем комбинирования дискретного набора толщин пленок полиэтилена низкой (ПЭНП) и высокой плотности (ПЭВП). Полученная многослойная структура запекалась при температуре вблизи точки плавления полимеров. Толщины слоев рассчитывались следующим образом.

Характеристическая матрица диэлектрической среды ($M_j(z)$) [116] может быть записана как

$$M_j(z) = \begin{bmatrix} \cos(k_0 n_j z_j \cdot \cos(\theta_j)) & -\frac{i}{p_j} \sin(k_0 n_j z_j \cdot \cos(\theta_j)) \\ -i p_j \sin(k_0 n_j z_j \cdot \cos(\theta_j)) & \cos(k_0 n_j z_j \cdot \cos(\theta_j)) \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

где $k_0 = 2\pi\nu/c$, $n_j = \sqrt{\epsilon_j \mu_j}$, $p_j = \sqrt{\epsilon_j / \mu_j} \cdot \cos(\theta_j)$.

В случае слоистой среды ее характеристическую матрицу можно представить в виде матричного произведения характеристических матриц слоев, входящих в ее состав, т.е.

$$M = \prod_{1 \leq j \leq N} M_j, \quad (2.8)$$

где N – число слоев в составе среды.

Тогда коэффициенты отражения (r) и пропускания (t) слоистой среды можно рассчитать как

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12} p_N) p_1 - (M_{21} + M_{22} p_N)}{(M_{11} + M_{12} p_N) p_1 + (M_{21} + M_{22} p_N)} \quad (2.9)$$

$$t = \frac{2p_1}{(M_{11} + M_{12} p_N) p_1 + (M_{21} + M_{22} p_N)}. \quad (2.10)$$

В итоге, отражательная (R) и пропускательная (T) способности среды могут быть получены как

$$R = |r|^2, \quad T = \frac{p_N}{p_1} |t|^2. \quad (2.11)$$

Результаты расчетов отражательной и пропускательной способности слоистых диэлектрических сред, обычно используемых при создании терагерцовых окон, приведены на рисунках 2.18 и 2.19. Значения основных диэлектрических параметров соответствующих слоев представлены в таблице 2.3. Как видно из графиков зависимостей $R(\nu)$ и $T(\nu)$, терагерцовое окно на базе политетрафторэтилена (ПТФЭ), также известного как тефлон, обладает лучшими оптическими характеристиками с точки зрения минимизации негативного вклада в чувствительность приемника. Однако, в рамках данной работы выбор был сделан в пользу окна охладителя на основе кварца с целью снижения паразитного теплопритока со стороны фонового ИК излучения и, тем самым, снижения нагрузки на вторую ступень охладителя.

В силу различия коэффициентов теплового расширения кварца и используемых полимеров внутреннее окно криостата подвергается разрушительному воздействию сил натяжения $F_s \sim S$, где S – площадь окна, при термоциклировании. Данный негативный эффект был уменьшен за

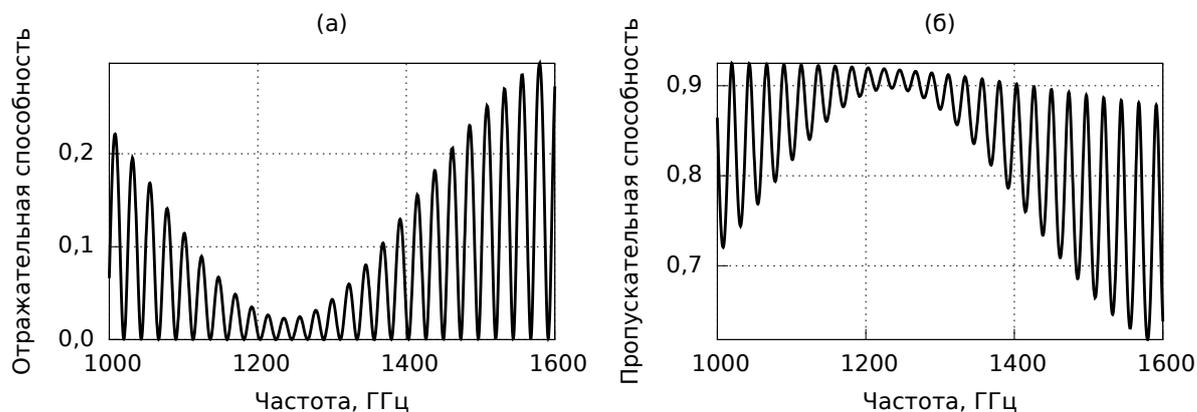


Рис. 2.18. Расчетные частотные зависимости отражательной (а) и пропускательной (б) способности для структуры ПВПЭ/ПЭНП/Кварц/ПЭНП/ПЭВП с толщинами слоев 25/95/3100/95/25 мкм.

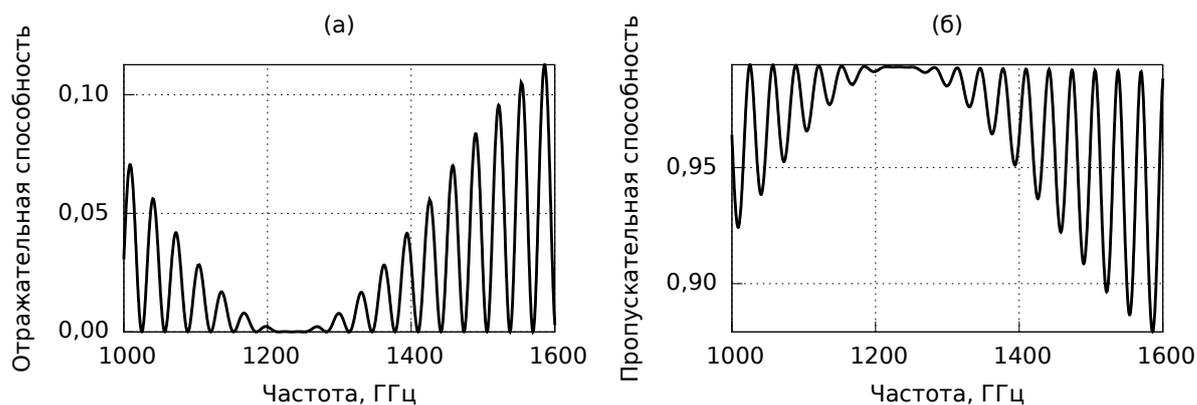


Рис. 2.19. Расчетные частотные зависимости отражательной (а) и пропускательной (б) способности для структуры Zitex/ПТФЭ/Zitex с толщинами слоев 152/3140/152 мкм.

Материал	ν , ТГц	n	ϵ'	$\tan(\delta)$	α , см ⁻¹
Кварц (пл.)	1	1,954	–	–	2
ПЭНП	1	1,514	2,291	$6,8 \times 10^{-4}$	–
ПЭВП	0,97	1,525	2,324	$6,4 \times 10^{-4}$	–
ПТФЭ	1	1,433	2,054	$1,5 \times 10^{-5}$	–
Zitex	1	1,2	–	–	1,28

Таблица 2.3. Основные диэлектрические свойства материалов [117–119], используемых при расчетах терагерцовых окон с оптическим просветлением вблизи 1300 ГГц.

счет дробления просветляющего покрытия на секции малой площади $S' \approx 5 \times 10^{-3} S$ при помощи полуавтоматической установки резки на базе прецизионной дисковой пилы.

В результате модификаций рабочая температура нагруженной второй ступени машины была уменьшена с 4,2 до 3,3 К с размахом температурных колебаний 20 мК.

- Оптимизирована термическая развязка между холодной платой второй ступени охладителя и смесительной камерой.

Изначально, смесительная камера закреплялась на медном держателе, притянутом к холодной плате охладителя с использованием кремнийорганической теплопроводной пасты (КТП). При данной конфигурации установки температуры смесительной камеры и холодной платы отличались на величину $\sim 0,1$ К. Для определения полной мощности тепловых потерь, связанных с геометрией медного держателя, (P_T) смесительная камера была оснащена резистивным нагревателем с сопротивлением 75 Ом, на который подавался ток в диапазоне 0–12,2 мА. На рисунке 2.20 приведены графики зависимостей температур смесительной камеры и холодной платы охладителя от мощности, выделяемой

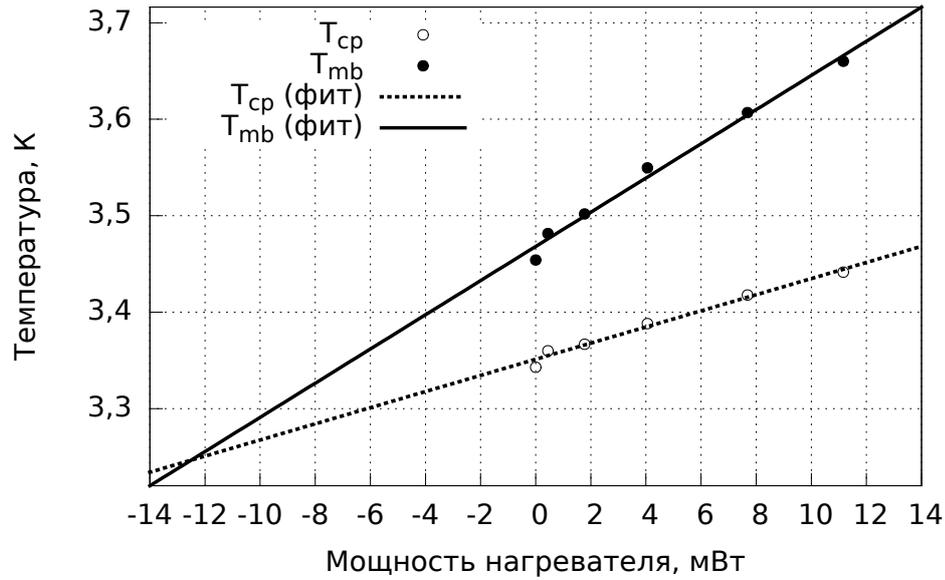


Рис. 2.20. Зависимости температур холодной платы охладителя (T_{cp}) и смесительной камеры (T_{mb}) от мощности на резистивном нагревателе.

на резистивном нагревателе. Абсцисса точки пересечения прямых T_{cp} и T_{mb} соответствует значению $P_T = -12,5$ мВт.

Для осуществления термической развязки между смесительной камерой и медным держателем была установлена тонкая прокладка из нержавеющей стали, при этом вся криогенная часть цепи усиления ПЧ осталась по-прежнему расположена непосредственно на холодной плате охладителя. Температурную зависимость коэффициента теплопроводности металла (χ) в общем случае можно записать в форме степенной функции вида

$$\chi(T) = 10^{a+b\log(T)+c\log^2(T)+d\log^3(T)+e\log^4(T)+f\log^5(T)+g\log^6(T)+h\log^7(T)+i\log^8(T)}. \quad (2.12)$$

Значения коэффициентов $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ из выражения 2.12 для нержавеющей стали SS 304, используемой для изготовления прокладки, приведены в таблице 2.4.

Коэффициент	Значение
a	-1,4087
b	1,3982
c	0,2543
d	-0,6260
e	0,2334
f	0,4256
g	-0,4658
h	0,1650
i	-0,0199

Таблица 2.4. Коэффициенты из температурной зависимости коэффициента теплопроводности нержавеющей стали SS 304 [120].

Геометрические параметры стальной прокладки были получены с использованием измеренного ранее значения P_T и закона теплопроводности Фурье, записанного в интегральной форме,

$$P_T = -\chi \frac{S_{ss} \Delta T_{mb}}{t_{ss}}. \quad (2.13)$$

При закладываемом увеличении рабочей температуры смесителя с 3,5 до 4,2 К (или $\Delta T_{mb} = 0,7$ К) и площади прокладки $S_{ss} = 100$ мм² получаем значение толщины прокладки $t_{ss} = 1,8$ мм.

На рисунке 2.21 представлены результаты измерений флуктуаций рабочей температуры НЕВ-смесителя, полученной по итогам описанных выше модификации оптики охладителя и изменения конфигурации монтажа смесителя на холодной плате. Из рисунка видно, что рабочая температура смесителя колеблется около среднего значения 4,2475 К с размахом 1 мК.

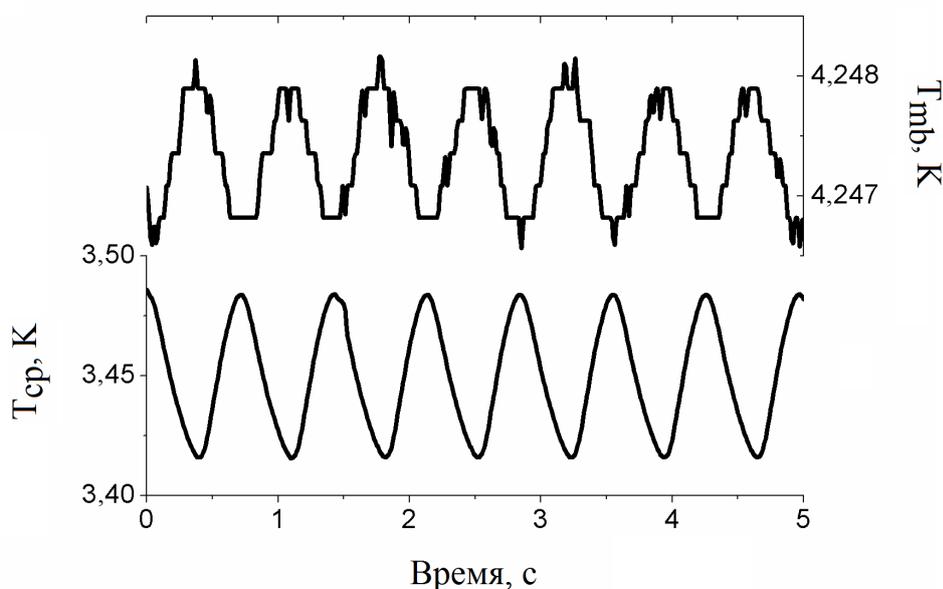


Рис. 2.21. Рабочая температура холодной платы охладителя на пульсирующих трубках (снизу) и установленного в охладитель НЕВ-смесителя при рабочем режиме гетеродинного приемника на его основе (сверху).

При реализации СВЧ стабилизации рабочего тока установленного в охладитель НЕВ-смесителя мы работали на нескольких частотах гетеродина. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 2.3, положение ключа (б).

На частоте гетеродина 810 ГГц при рабочей точке $V_{dc} = 1,5$ мВ и $I_{dc} = 56,5$ мкА измеренная в двухполосном режиме шумовая температура НЕВ-приемника составляет 550 К. Вольт-амперная характеристика НЕВ-смесителя приведена на рисунке 2.22(а). НЕВ-устройства, используемые на данном этапе работы, были изготовлены из сверхтонкой пленки NbN в рамках *in situ* технологии создания контактной металлизации Ti-Au/NbN [65]. Размер чувствительного элемента смесителя составляет $2,0 \times 0,2$ мкм². Исследование зависимостей сопротивления устройств от температуры показал, что критическая температура сверхпроводящего перехода составляет 10,8 К с шириной перехода около 0,6 К. Критический ток составляет около 500 мкА и сопротивление в нормальном состоянии находится в диапазоне 90–100 Ом.

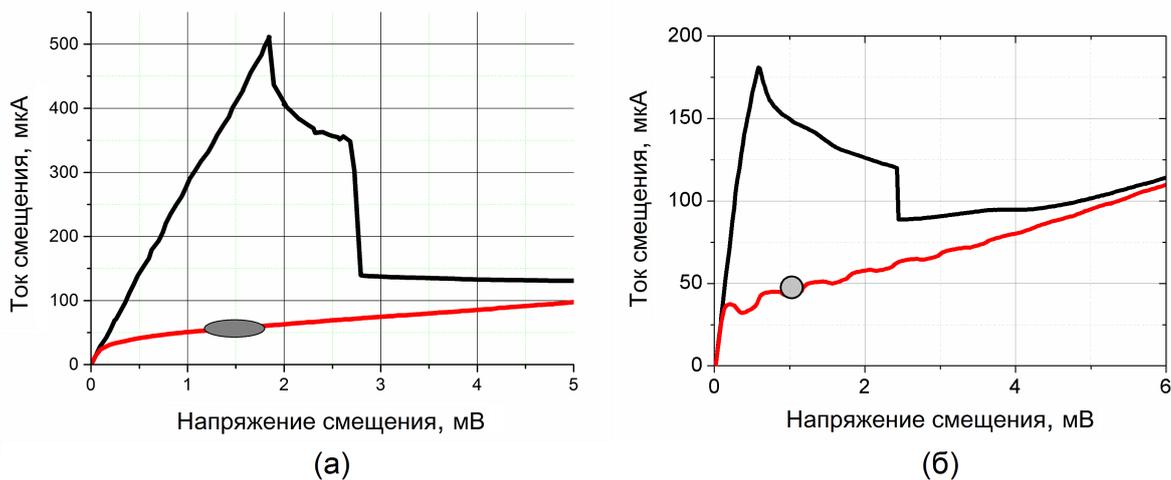


Рис. 2.22. ВАХ НЕВ-смесителей с различным объемом чувствительного элемента при отсутствии (черные кривые) и наличии мощности гетеродина (красные кривые) с частотой 810 (а) и 1310 ГГц (б).

Поскольку мотор охладителя расположен отдельно от криостата (соединение осуществляется при помощи гибкой линии подачи гелия), уровень механических вибраций очень низок. В связи с этим тепловые флуктуации становятся основным препятствием для стабильной работы смесителя. В нашем эксперименте, среднеквадратичное значение (СКЗ) колебания температуры холодной платы охладителя составляет 7 мК при частоте колебаний около 1,4 Гц. Как следствие, ток смещения нестабилен.

Как видно из рисунка 2.23, вызванные нестабильностью температуры холодной платы охладителя колебания рабочего тока смесителя обладают СКЗ 0,12 мкА около номинальной точки смещения 56,5 мкА. 2.22(а). Флуктуации тока смещения, в свою очередь, приводят к колебаниям мощности на выходе цепочки ПЧ. Наблюдаемое среднеквадратичное изменение мощности составило 60 нВт около номинального значения выходного сигнала ПЧ 15,5 мкВт. Полученные значения можно представить в виде $\Delta G_{heb}/\Delta I_{dc}$, что составляет $\sim 0,2$ дБ/мкА и справедливо для области ВАХ, соответствующей оптимальной чувствительности смесителя.

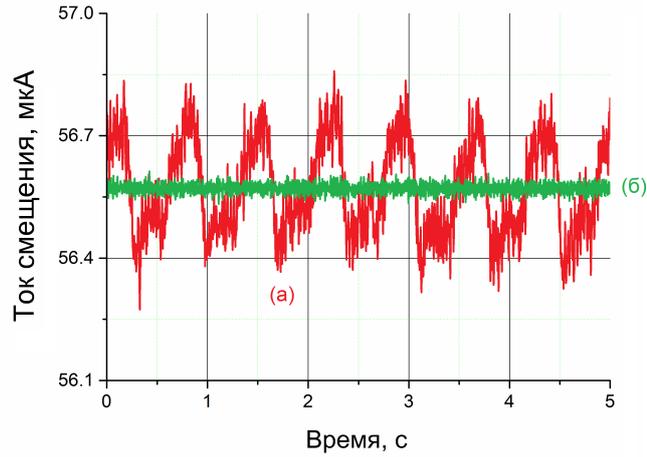


Рис. 2.23. Ток смещения НЕВ-смесителя при выключенной (а) и включенной (б) системе СВЧ автоподстройки.

Для подтверждения природы флуктуаций коэффициента преобразования мы использовали стандартную модель смещения [121], [122] для расчета коэффициента преобразования нашего НЕВ-смесителя как функции эффективной температуры электронной подсистемы по формуле

$$G_{heb}(T_e) = \frac{2C^2(T_e) \cdot R_l \cdot P_{LO}}{(R_{dc} + R_l) \cdot I_{dc}^2(T_e)} \cdot \frac{1}{\left(1 + C(T_e) \cdot \frac{R_{dc} - R_l}{R_{dc} + R_l}\right)^2}, \quad (2.14)$$

где

$$C(T_e) = \frac{dR_{dc}/dT_{mb}(T_e) \cdot I_{dc}^2(T_e) \cdot \tau_{Te}}{C_e \cdot V_{vol}}. \quad (2.15)$$

Здесь R_{dc} – сопротивление смесителя по постоянному току, R_l – входное сопротивление цепи усиления сигнала ПЧ и τ_{Te} – постоянная времени электрон-фононной системы. Поглощенная мощность гетеродина может быть получена при анализе приведенных на рисунке 2.22 вольт-амперных характеристик НЕВ-устройства с использованием изотермического метода [41].

Если предположить, что T_e колеблется с тем же СКЗ, что и измеренная температура смесительной камеры (7 мК), уравнение 2.15 позволяет оценить относительное изменение коэффициента преобразования $\frac{\Delta G_{heb}}{G_{heb}}$. Значения используемых при расчете параметров приведены в таблице 2.5 [94, 123].

Параметр	Значение	Размерность
P_{LO}	350	нВ
V_{vol}	1,54	$10^{-21} \cdot \text{м}^3$
C_e	16,2	мДж/см ³ ·К
τ_{Te}	47	пс
$T_e + \Delta T_{mb}$	10,810	К
dR_{dc}/dT_e	148,3	Ом/К
R_{dc}	54,9	Ом
I_{dc}	56,5	мкА
$T_e - \Delta T_{mb}$	10,790	К
dR_{dc}/dT_e	145,8	Ом/К
R_{dc}	53,5	Ом
I_{dc}	56,6	мкА

Таблица 2.5. Параметры НЕВ-смесителя, используемые при расчетах.

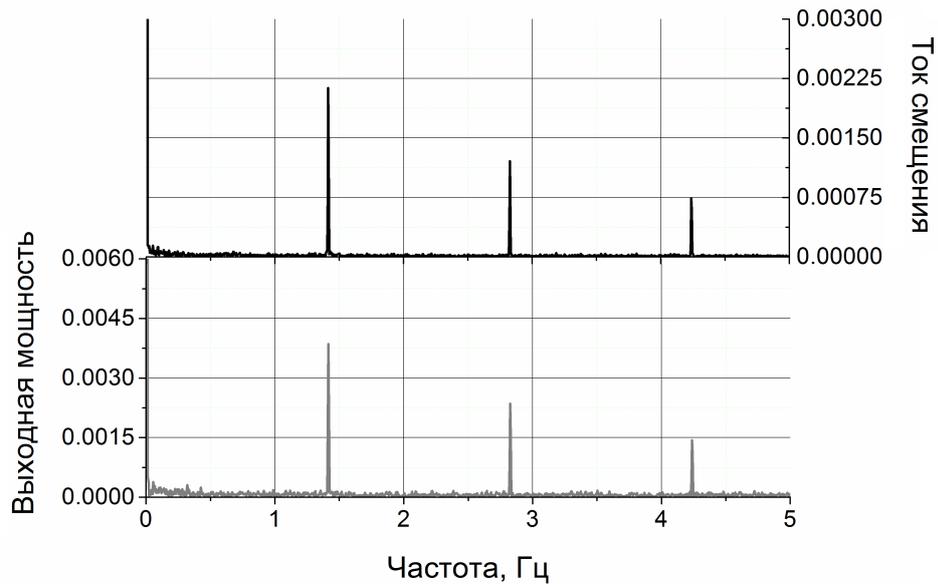


Рис. 2.24. Кривые БПФ для тока смещения и мощности на ПЧ НЕВ-приемника, смесительный элемент которого расположен в охладителе на пульсирующих трубках. Для обеих кривых значения по оси ординат нормированы на амплитуду БПФ на нулевой частоте.

Расчетное значение $\frac{\Delta G_{heb}}{G_{heb}} \approx 1\%$ в 3 раза отличается от наблюдаемого в эксперименте СКЗ флуктуаций коэффициента преобразования. Это подтверждает, что отсутствие колебаний электронной температуры, наведенных охладителем на пульсирующих трубках, является важным фактором стабильности выходного сигнала смесителя на ПЧ. Несмотря на тот факт, что величина подобных нестабильностей мала, их наличие неприемлемо для высокоточных измерительных систем терагерцовой астрономии.

На рисунке 2.24 приведены нормированные графики результатов быстрого преобразования Фурье (БПФ) для тока смещения и выходной мощности НЕВ-смесителя для случая работы приемника при отключенной системе стабилизации его рабочего тока. Для тока смещения относительная амплитуда колебаний на основной частоте 1,4 Гц (тепловой цикл охладителя) составляет 0,22 %, в то время как амплитуды второй и третьей гармоник – 0,13 % и 0,07 % соответственно. Аналогичное соотношение амплитуд (1: 0,6: 0,3) на-

блюдается в спектре флуктуирующей выходной мощности. Относительные амплитуды колебаний составляют 0,39 %, 0,23 % и 0,12 % на частотах 1,4 Гц, 2,8 Гц и 4,2 Гц соответственно. Данный факт является дополнительным доказательством того, что флуктуации выходной мощности напрямую связаны с колебаниями тока смещения, а стабилизация тока смещения является ключом к повышению стабильности выходного сигнала НЕВ-смесителя на ПЧ.

До сих пор мы предполагали, что флуктуации выходной мощности приемника вызваны исключительно колебаниями коэффициента преобразования смесителя, а шумовая температура считалась величиной постоянной. Для того чтобы проверить справедливость этого предположения, мы измерили выходную мощность приемника с двумя нагрузками на его оптическом входе: черным телом при температуре 295 К (комната) и черным телом при температуре 77 К (жидкий азот). Значение выходной мощности приемника (P_{out}) может быть получено по формуле

$$P_{out} = k \cdot G_{heb} \cdot (T_{load} + T_{heb}) \cdot B, \quad (2.16)$$

где T_{load} – это физическая температура нагрузки, T_{heb} – шумовая температура НЕВ-смесителя.

Если предположить, что оба значения G_{heb} и T_{heb} изменяются с малыми амплитудами ΔG_{heb} и ΔT_{heb} соответственно, то с учетом уравнение 2.16 мы получаем

$$\frac{\Delta P_{out}}{P_{out}} = \frac{\Delta G_{heb}}{G_{heb}} + \frac{\Delta T_{heb}}{T_{load} + T_{heb}} \quad (2.17)$$

Согласно уравнению 2.17, если колебания шумовой температуры смесителя ΔT_{heb} существенны, то мы должны наблюдать различные значения флуктуаций выходной мощности приемника для нагрузок разной температуры. Однако, эксперимент не выявил никакой разницы в значениях $\frac{\Delta P_{out}}{P_{out}}$

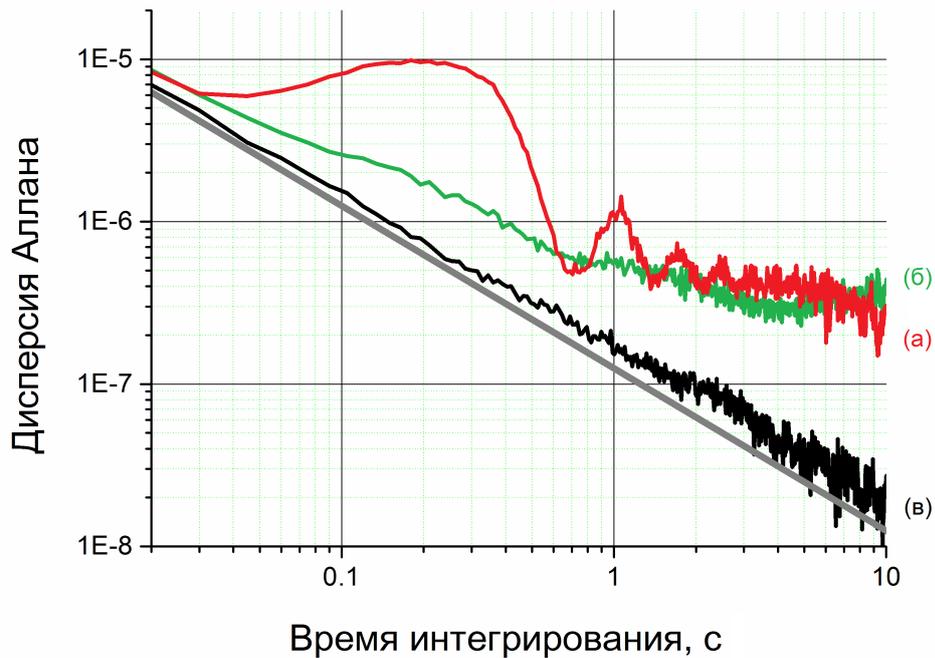


Рис. 2.25. Кривые дисперсии Аллана для выходной мощности НЕВ-приемника при выключенной (а) и включенной (б) системе СВЧ стабилизации рабочего тока смещения. Также приведена кривая дисперсии Аллана для цепочки усиления сигнала ПЧ.

при смене нагрузок на оптическом входе приемника. Данный факт позволяет сделать вывод, что доминирующим фактором в формировании флуктуаций выходной мощности приемника являются колебания коэффициента преобразования НЕВ-смесителя.

Схема СВЧ стабилизации рабочего тока НЕВ-устройства позволяет существенно улучшить стабильность выходной мощности приемника на его основе. Это иллюстрирует график дисперсии Аллана, представленный на рисунке 2.25. При отсутствии цепи СВЧ обратной связи по току смещения можно наблюдать ярко выраженные колебания выходного сигнала НЕВ-приемника с периодом 0,7 секунды. Когда цепь обратной связи включена, эти колебания исчезают, а значения дисперсии Аллана понижаются при увеличении времени интегрирования, достигая минимума при $T_A \approx 5$ с. Несмотря на небольшое отклонение от радиометрического предела, монотонное убыва-

ние кривой дисперсии Аллана (2.25(б)) позволяет заключить, что белый шум доминирует над $1/f$ -шумом и дрейфом в спектре выходного сигнала приемника, а колебания температуры холодной платы охладителя на частоте 1,4 Гц эффективно компенсированы. Сама кривая дисперсии Аллана практически повторяет кривую, полученную с тем же НЕВ-смесителем в оптическом гелиевом криостате в рамках той же экспериментальной установки с привлечением цепи СВЧ стабилизации рабочего тока смесителя. Следует отметить, что при расчете радиометрического предела было использовано фактическое значение ширины шумовой полосы фильтра на входе СВЧ детектора, используемого для регистрации выходной мощности НЕВ-приемника. Сравнение графиков дисперсии Аллана для выходного сигнала усилителя ПЧ и стабилизированного приемника позволяет заметить присутствие остаточной компоненты $1/f$ -шума на временах интегрирования порядка нескольких секунд. Очевидно, что форма кривой дисперсии и время Аллана могут быть улучшены по средством оптимизации конфигурации ПИД-регулятора в рамках решения конкретной прикладной задачи.

Полученная в ходе выполнения измерений на частоте гетеродина 810 ГГц информация была использована для создания лабораторного макета гетеродинной приемной системы на базе НЕВ-смесителя в охладителе на пульсирующих трубках для терагерцового канала GLT. Измерения технических характеристик системы были произведены на частоте гетеродина 1310 ГГц, где наблюдался максимум выходной мощности гетеродина – 5 мкВт, приведенных ко входу сетки поляризатора. В силу малой мощности гетеродина мы выбрали НЕВ-смеситель с небольшим объемом чувствительного элемента, который в дальнейшем должен быть заменен на смеситель топологии Тип 3, обеспечивающий температурное разрешение $\sim 0,3$ К при практически той же необходимой мощности гетеродина. Последний каскад частотного умножения гетеродина был оснащен диагональным рупором в качестве выходной оптики,

Параметр	Значение
V_{vol} , мкм ³	$4,8 \times 10^{-4}$
T_c , К	$10,8 \pm 0,3$
I_c , мкА	190
F_{bw} , ГГц	1200–1600
P_{LO} , мкВт	5
T_{noise} , К	910
T_{heb} , К	430
T_A , с	5
ΔT , К	0,5

Таблица 2.6. Параметры лабораторного макета гетеродинной приемной системы на базе НЕВ-смесителя в охладителе на пульсирующих трубках. Здесь F_{bw} – диапазон входных рабочих частот приемной системы.

неоптимально согласующимся с входной оптикой охладителя. О присутствии в оптическом тракте стоячих волн можно судить по негладкой ВАХ смесителя (2.22(б)). Результаты измерений технических характеристик приемной системы и НЕВ-смесителя приведены в таблице 2.6.

2.5. Выводы к главе

В данной главе показано, что 1/f-шум и дрейф в токе смещения НЕВ-смесителя могут быть значительно уменьшены при использовании активной системы СВЧ подогрева электронной подсистемы НЕВ-устройства. Стабильность выходной мощности смесителя при этом также улучшается. Продемонстрирована одна из возможных реализаций СВЧ автоподстройки рабочего тока НЕВ-смесителя и стабилизации его выходного сигнала на ПЧ, связанная с использованием компактного ПИД-регулятора на базе микроконтроллера и

узкополосного источника белого шума с центральной частотой за пределами полосы ПЧ смесителя. Данная конфигурация пригодна для использования в полевых условиях и должна найти достойное применение в автономных измерительных терагерцевых системах.

Также в главе представлены результаты измерений по выявлению геометрии чувствительного элемента НЕВ-смесителя, способной одновременно обеспечить минимизацию значений флуктуационной чувствительности и необходимой мощности гетеродина. Эксперимент показал, что НЕВ-образцы топологии Тип 3 являются оптимальными кандидатами для решения данной задачи. Измеренные значения флуктуационной чувствительности и критического тока образцов данной топологии составили $\sim 0,3$ К на частоте гетеродина 810 ГГц и 180 мкА соответственно.

При использовании схемы СВЧ автоподстройки рабочего тока продемонстрировано, что работающий в охладителе на пульсирующих трубках НЕВ-смеситель может обеспечить интегральное время Аллана выходной мощности приемника на его основе ~ 5 с. Спектр выходного сигнала приемника при этом не содержит гармонических компонент, соответствующих колебаниям рабочей температуры смесителя на основной частоте и высших гармониках. Простота схемы СВЧ автоподстройки должна способствовать упрочению позиций машин замкнутого цикла, не требующих жидкого хладагента, в качестве охладителей для НЕВ-смесителей. В свою очередь, НЕВ-смесители должны стать более привлекательны для практических инструментов терагерцевой астрономии.

Глава 3

Чувствительность и спектр выходной мощности прямого НЕВ-детектора под действием слабого СВЧ сигнала

В данной главе приведены исследования особенностей функционирования НЕВ-приемника прямого детектирования со схемой регистрации выходного сигнала на базе СВЧ рефлектометра. Представлены результаты измерений основных технических характеристик приемника в широком диапазоне параметров смещения НЕВ-устройства. Сформулированы основные принципы создания сверхчувствительного прямого НЕВ-детектора с нулевым смещением по постоянному току. Основные результаты опубликованы в [A3, A5, A6, A10].

3.1. Методика регистрации выходного сигнала прямого НЕВ-детектора при помощи СВЧ рефлектометра

При выполнении работ используется экспериментальная установка, схожая с системой СВЧ автоподстройки рабочего тока НЕВ-смесителя, описанной в предыдущей главе настоящей диссертации. Подвод СВЧ излучения к образцу осуществляется через четырехпортовое устройство (рисунок 3.1), представленное широкополосным направленным ответвителем с коэффициентом передачи 10 дБ в сочетании с адаптером смещения, термически привязанным к холодной плате криостата. В качестве хладагента используется жидкий гелий – температура холодной платы криостата достигает значений порядка 4,2 К во время выполнения измерений. Для развязки детектора с комнатным фоном, обладающим температурой 295 К, на вход ответвителя

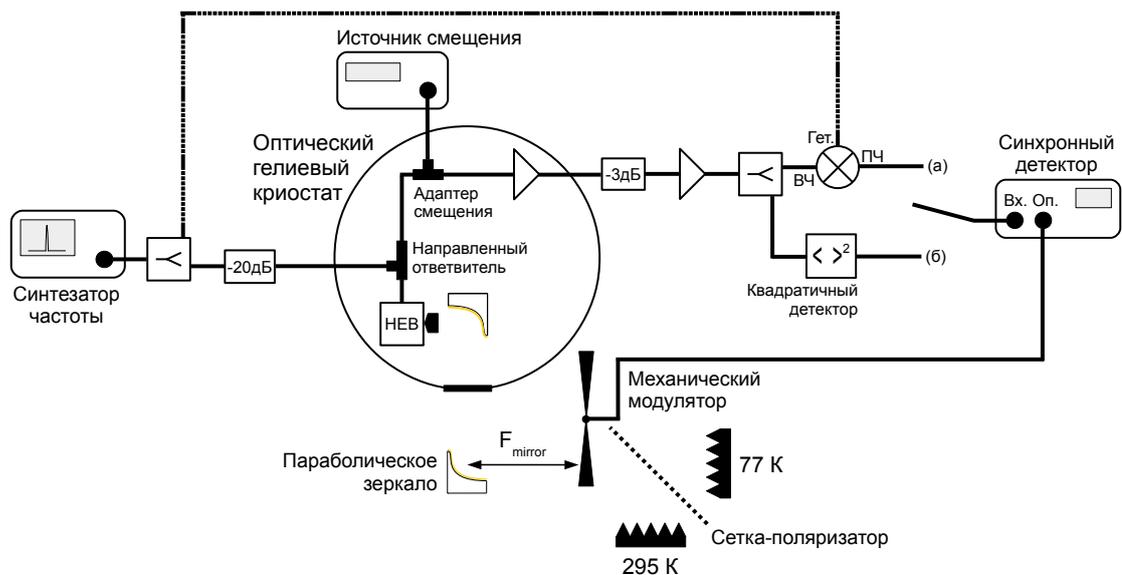


Рис. 3.1. Экспериментальная установка для регистрации выходного сигнала прямого НЕВ-детектора при помощи СВЧ рефлектометра.

устанавливается холодный аттенюатор с коэффициентом ослабления 20 дБ. Сигнал с прямого НЕВ-детектора может быть получен при фиксации напряжения смещения и регистрации токового отклика, усиленного малошумящим DC-усилителем. В связи с тем, что экспериментальная установка изначально предназначена для реализации гетеродинного детектирования, DC-усилитель внутри криостата не установлен, а вместо этого установлен SiGe малошумящий усилитель (LNA). Данное обстоятельство позволяет осуществлять регистрацию отраженного от болометра слабого СВЧ сигнала при различной мощности терагерцового излучения, подаваемого на оптический вход криостата.

Ввод терагерцового сигнального излучения осуществляется через гофрированную рупорную антенну волноводной камеры, в которую устанавливается чип НЕВ-устройства. Криогенный сеточный резонансный фильтр с центральной частотой 830 ГГц используется для ограничения полосы входных рабочих частот болометра. В качестве сигнальных источников используются

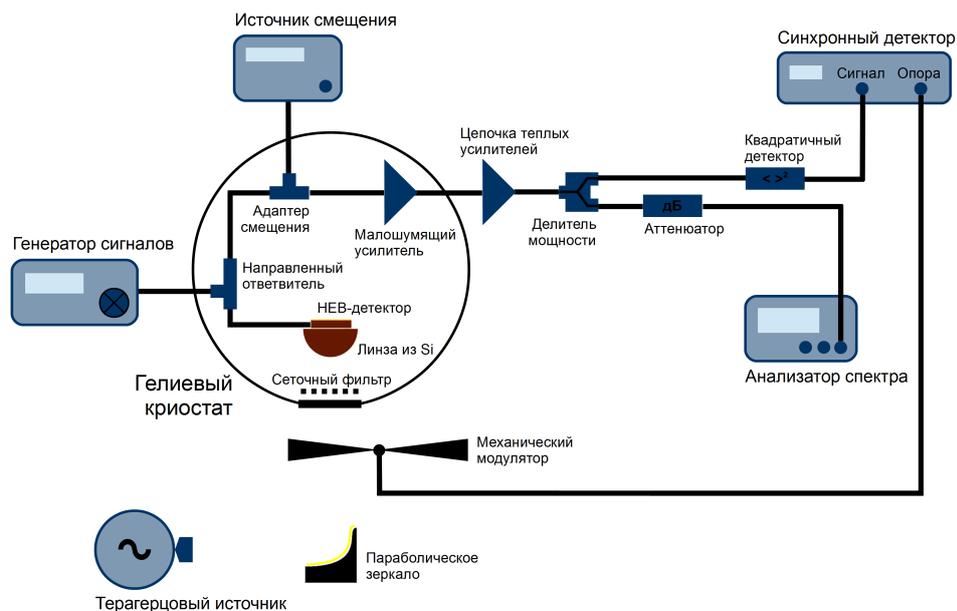


Рис. 3.2. Экспериментальная установка для измерения ЭМШ прямого НЕВ-детектора.

ЧТ различных температур: комнатной и жидкого азота. Эксперименты проводятся с использованием механического модулятора терагерцового сигнала, который обеспечивает смену горячей и холодной ЧТ нагрузки на оптическом входе криостата с частотой 1,48 кГц. Выход LNA соединен с комнатным квадратичным детектором / СВЧ смесителем, осуществляющим демодуляцию отклика прямого НЕВ-детектора возникающего в результате смены нагрузок на его входе. Амплитуда выходного сигнала квадратичного детектора / СВЧ смесителя измеряется при помощи синхронного детектора с цифровым интерфейсом сбора данных.

В данной конфигурации эксперимента СВЧ сигнал выполняет двойную функцию: обеспечивает подогрев электронной подсистемы НЕВ-устройства и служит индикатором изменения его импеданса при подаче АМ терагерцового излучения, тем самым реализуя съём отклика с образца.

3.1.1. Методика измерения эквивалентной мощности шума

На рисунке 3.2 изображена схема экспериментальной установки, использующейся для измерения ЭМШ. НЕВ-устройство смещается в рабочую точку при помощи СВЧ сигнала малой мощности и напряжения смещения по постоянному току. На оптический вход болометра поочередно подаются ЧТ нагрузки комнатной температуры и температуры жидкого азота. Используя закон Планка для излучения абсолютно черного тела, изменение подаваемой на оптический вход болометра мощности при смене нагрузок (ΔP_{bb}) можно записать как

$$\Delta P_{bb} = h\nu B_{mesh} \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{amb}}\right) - 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{ln2}}\right) - 1} \right], \quad (3.1)$$

где h – постоянная Планка, ν – частота излучения и B_{mesh} – полоса пропускания криогенного сеточного резонансного фильтра.

Отраженный от НЕВ-устройства зондирующий СВЧ сигнал регистрируется анализатором спектра, работающим в цифровом режиме с полосой разрешения (B_{res}) 1 Гц при наличии сигнального источника на базе ЧТ нагрузок и модулятора и без него. В последнем случае на оптический вход болометра между окном криостата и лопастью модулятора устанавливается ЧТ нагрузка комнатной температуры. Отношение сигнал/шум (SNR) на выходе болометра определяется амплитудой спектральной компоненты на частоте 1,48 кГц по отношению к базовой линии спектра.

Значение оптической ЭМШ (NEP_o) рассчитывается по формуле

$$NEP_o = \frac{\Delta P_{bb}}{SNR\sqrt{B_{res}}}. \quad (3.2)$$

3.1.2. Методика измерения импеданса и эффективности электронного разогрева

На рисунке 3.3 изображена экспериментальная установка, используемая для измерения импеданса НЕВ-устройства в СВЧ диапазоне длин волн. Измерения импеданса проводятся как для квазиоптических, так и для волноводных образцов. ВЧ разъем, служащий обычно для съема выходного сигнала болометра, используется для ввода СВЧ излучения малой амплитуды. Зондирующий СВЧ сигнал из порта «1» векторного анализатора цепей подается на исследуемый образец через направленный ответвитель, после чего отраженный от образца сигнал через малошумящую усилительную цепочку направляется в порт «2» анализатора. Полученный в результате измерений набор комплексных значений S -параметров сложной цепи используется для восстановления собственного коэффициента отражения НЕВ-устройства в рабочей точке смещения по постоянному току, соответствующей оптимальной чувствительности. Значение коэффициента отражения затем было пересчитывается в импеданс.

При измерениях используется стандартный метод калибровки по трем точкам «нагрузка-закоротка-холостой ход». Общий вид уравнения для значения коэффициента отражения сложной цепи (Γ) при фиксированной частоте зондирующего СВЧ сигнала можно представить как

$$\Gamma_i = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma'_i}{1 - S_{22}\Gamma'_i} \quad (3.3)$$

В выражении 3.3 индекс i принимает значения «load», «short», «open», что соответствует переводу НЕВ-устройства в нормальное состояние, сверхпроводящее состояние и состояние разрыва (последнее достигается посредством сознательного разрушения сверхпроводникового мостика путем прикладывания к нему повышенного напряжения смещения $\sim 1,5$ В); S_{11} , S_{12} ,

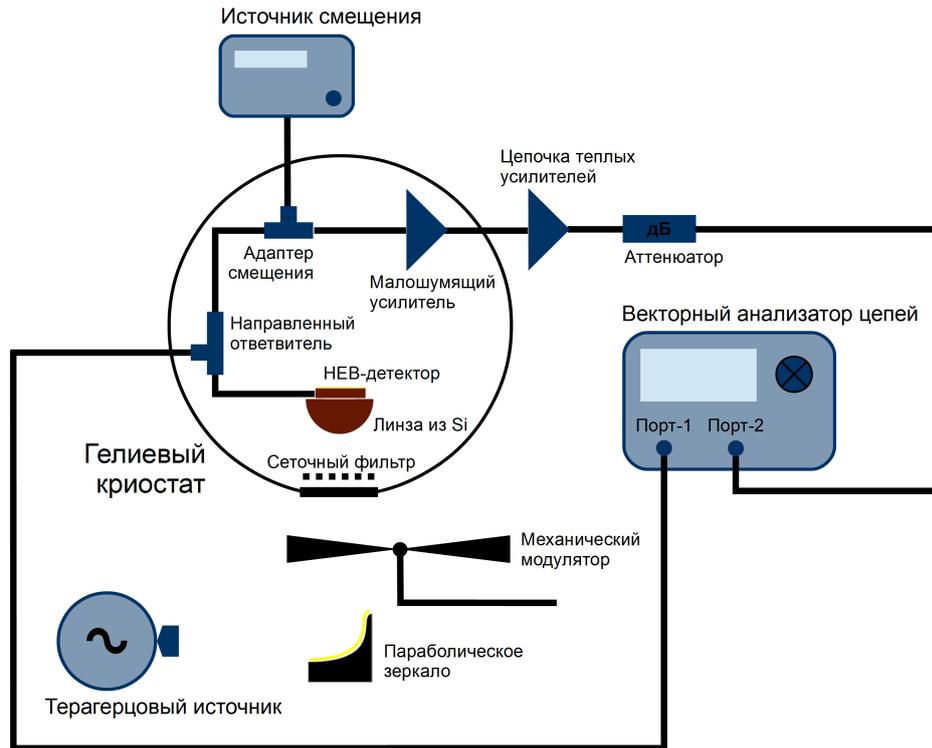


Рис. 3.3. Экспериментальная установка для измерения импеданса НЕВ-устройства в СВЧ диапазоне длин волн.

S_{21} , S_{22} – S-параметры участка цепи между портом/портами анализатора и фидерной линией планарной антенны НЕВ-устройства; пометка «'» означает принадлежность коэффициента отражения к собственным характеристикам болметра. В итоге получаем следующую систему уравнений.

$$\begin{cases} \Gamma_{open} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma'_{open}}{1-S_{22}\Gamma'_{open}} \\ \Gamma_{short} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma'_{short}}{1-S_{22}\Gamma'_{short}} \\ \Gamma_{load} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma'_{load}}{1-S_{22}\Gamma'_{load}} \end{cases} \quad (3.4)$$

Как известно, для распространяющейся из среды «1» в среду «2» волны коэффициент отражения может быть записан в виде $\Gamma_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$, где Z_1 и Z_2 – значения импеданса для первой и второй среды соответственно.

Подставляя $\Gamma'_{open} = 1$, $\Gamma'_{short} = -1$, $\Gamma'_{load} = \frac{R_n - 50}{R_n + 50}$ и экспериментально полученные значения для Γ_{open} , Γ_{short} , Γ_{load} и R_n в 3.4, получаем представ-

ленную ниже систему из трех уравнений с тремя неизвестными.

$$\begin{cases} \Gamma_{open} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}}{1-S_{22}} \\ \Gamma_{short} = S_{11} - \frac{S_{12}S_{21}}{1+S_{22}} \\ \Gamma_{load} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21} \frac{R_n-50}{R_n+50}}{1-S_{22} \frac{R_n-50}{R_n+50}} \end{cases} \quad (3.5)$$

С использованием полученных в результате решение системы уравнений 3.5 значений S-параметров и измеренного в ходе эксперимента коэффициента отражения сложной цепи (Γ_{net}), значения собственного коэффициента отражения (Γ_{heb}) и импеданса (Z_{heb}) НЕВ-детектора в оптимальной рабочей точке смещения по постоянному току могут быть рассчитаны как

$$\Gamma_{heb} = \frac{-S_{11} + \Gamma_{net}}{S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22}\Gamma_{net} + S_{22}\Gamma_{net}} \quad (3.6)$$

$$Z_{heb} = 50 \cdot \frac{1 + \Gamma_{heb}}{1 - \Gamma_{heb}} \quad (3.7)$$

Эффективность электронного разогрева переменным током (C_{rf}) по определению есть отношение изменений импеданса НЕВ-устройства и мощности терагерцового сигнала (уравнение 3.8). Значение C_{rf} рассчитывается на основе двух последовательных измерений импеданса болометра при наличии ЧТ комнатной температуры и температуры жидкого азота на его оптическом входе.

$$C_{rf} = \frac{\Delta Z_{heb}}{\Delta P_{bb}} \quad (3.8)$$

3.2. Технические характеристики НЕВ-приемника прямого детектирования со схемой регистрации отклика на базе СВЧ рефлектометра

3.2.1. Чувствительность и динамический диапазон

Использованные в данной работе образцы были изготовлены из тонких пленок нитрида ниобия с реализацией *in situ* контактных структур. Типичный размер чувствительного элемента был $0,12 \times 1,3$ мкм². Измеренная критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние была 11,6 К с шириной перехода 0,6 К. Боллометры обладали критическим током порядка 250 мкА, и сопротивлением в нормальном состоянии 115 Ом.

Рисунок 3.4 демонстрирует спектр усиленной выходной мощности прямого НЕВ-детектора, подаваемой на вход квадратичного детектора. На спектре присутствует сильно выраженная компонента с частотой 1,5 ГГц, которая соответствует амплитуде СВЧ излучения, отраженного от болометра; также хорошо различимы более слабовыраженные компоненты, удаленные от центрального максимума на 1,48 кГц, что соответствует частоте смены ЧТ нагрузок. Наличие этих боковых пиков может быть объяснено небольшим периодическим изменением импеданса НЕВ-устройства на несущей частоте в следствие амплитудной модуляции входного терагерцового сигнала. В следствие чего, коэффициент отражения устройства также изменяется, что приводит к модуляции отраженного сигнала на несущей частоте.

На рисунке 3.5 изображена типичная ВАХ НЕВ-устройства под действием излучения с частотой 1,5 ГГц. Подаваемая на образец мощность излучения составила около 1,5 мкВт. Как видно из рисунка, на кривой отсутствует гистерезисный участок. Эффект СВЧ подогрева выражался в частичном подавлении критического тока с 250 мкА до 110 мкА. Кроме того, наблюдался

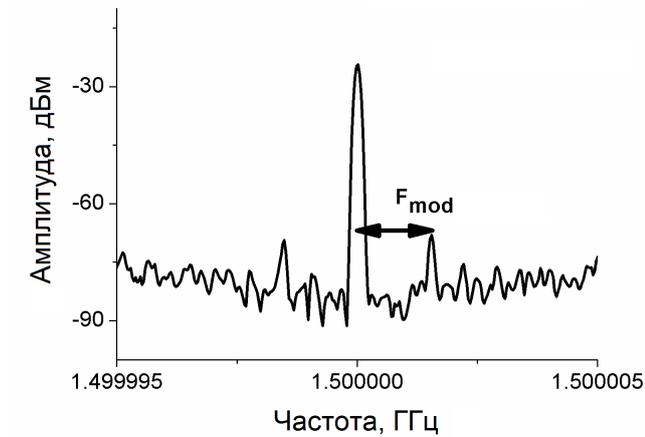


Рис. 3.4. Спектр выходного сигнала прямого НЕВ-детектора.

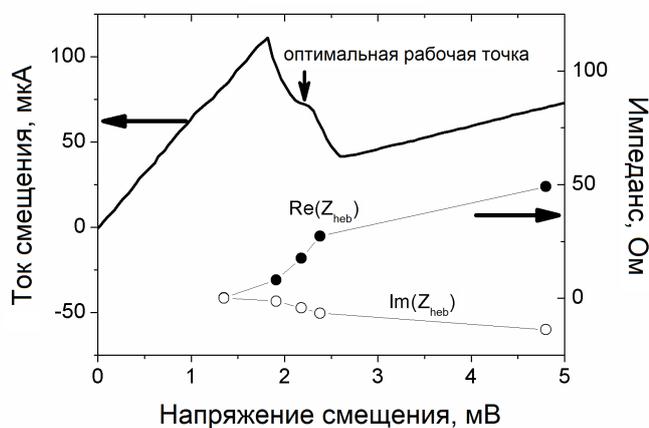


Рис. 3.5. ВАХ НЕВ-устройства под действием СВЧ излучения с частотой 1,5 ГГц и мощностью 1,5 мкВт (сплошная линия). Действительная и мнимая части импеданса НЕВ-устройства на частоте СВЧ излучения в зависимости от напряжения смещения (закрашенные и незакрашенные кружки соответственно).

небольшой участок выполаживания крутизны ВАХ в ее бистабильный области (локальное увеличения дифференциального сопротивления) около точки смещения 2,35 мВ, 74 мкА. По итогам изучения влияния мощности СВЧ подогрева и величины напряжения смещения было экспериментально установлено, что болометр демонстрирует наибольшую чувствительность в этой рабочей точке.

Для того чтобы подтвердить нашу гипотезу о том, что модулированный сигнал на выходе усилительной цепочки связан с модуляцией импеданса НЕВ-устройства в следствие смены входных ЧТ нагрузок, мы измерили импеданс болометра как функцию напряжения смещения, при наличии на его оптическом входе ЧТ нагрузки комнатной температуры. Методика измерения импеданса была описана предыдущем пункте настоящей работы. Результаты измерений представлены на рисунке 3.5. В оптимальной точке смещения, действительная часть измеренного импеданса составила ~ 17 Ом, в то время как мнимая часть – около -4 Ом. Значения импеданса были также измерены в двух соседних точках смещения болометра. Как видно из рисунка, в данном диапазоне смещений наклон кривой $Z_{heb}(I_{dc})$ довольно крутой (по сравнению с областями на краях ВАХ) и, следовательно, значение dZ_{heb}/dI_{dc} довольно велико. Это подтверждает, что в ответ на изменение мощности входного терагерцового сигнала импеданс болометра может существенно изменяться, что приводит к заметной модуляции выходной мощности болометра на несущей частоте зондирующего СВЧ сигнала.

Сигнальный источник был представлен системой из ЧТ нагрузок и механического модулятора (рисунок 3.1, положение ключа (б)), и поэтому изменение падающей на болометр мощности также определялось полосой пропускания охлаждаемого сеточного фильтра. Мы измерили коэффициент пропускания фильтра с помощью Фурье-спектрометра. Частотная характеристика коэффициента пропускания, полученная в результате измерений, приведена

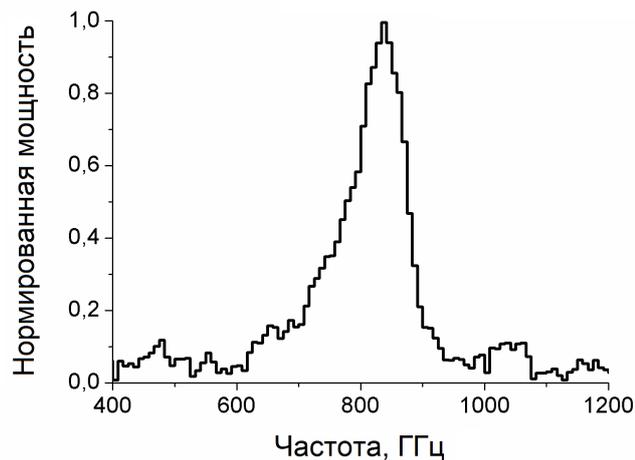


Рис. 3.6. Коэффициент пропускания охлаждаемого сеточного фильтра.

на рисунке 3.6. Из рисунка видно, что $B_{mesh} = 77$ ГГц, $\nu = 0,83$ ТГц. Подставив эти значения вместе с $T_{amb} = 295$ К и $T_{ln2} = 77$ К в уравнение 3.1, получаем $\Delta P_{bb} = 0,23$ нВт.

В оптимальной рабочей точке (см. выше) синхронным детектором было зарегистрировано отношение сигнал/шум (ОСШ), равное 29. При данном значении ОСШ, цифровой спектр на частоте 1,48 кГц повышается до 37 дБ по отношению к базовой линии спектра. Таким образом, в полосе частот 1 Гц, величина напряжения переменного тока в 70 раз выше величины шумового напряжения. С использованием уравнения 3.2 получаем значение оптической ЭМШ в оптимальной точке смещения, составляющее $3,3 \times 10^{-12}$ Вт/Гц^{0,5}. Полученное значение соответствует трехкратному улучшению по сравнению с оптической ЭМШ, полученной в рамках стандартной схемы считывания тока болометра с использованием комнатного усилителя постоянного тока. Кроме того, несмотря на отрицательное дифференциальное сопротивление ВАХ в окрестности рабочей точки, болометр стабилен. При последовательном увеличении времени интегрирования синхронного детектора в диапазоне 0,1 – 3 с ОСШ улучшается, что указывает на время Аллана не менее нескольких секунд.

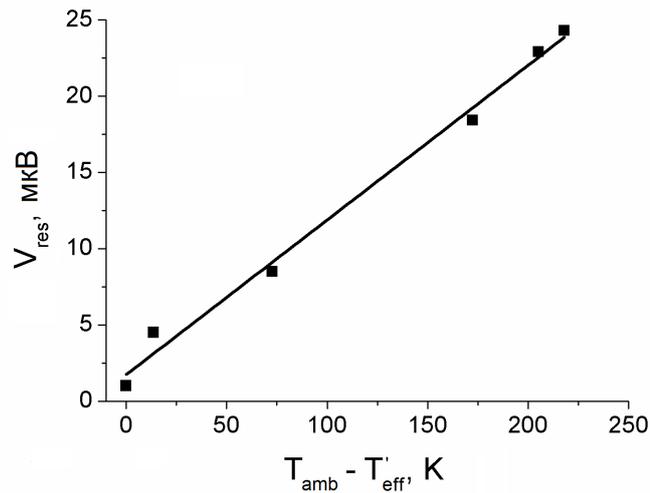


Рис. 3.7. Кривая линейности прямого НЕВ-детектора при использовании зондирующего СВЧ сигнала для съема отклика.

Для того чтобы убедиться, что прямой НЕВ-детектор не находится в состоянии насыщения и работает в рамках линейного режима, был измерен его динамический диапазон. Для этой цели была использована сетка-поляризатор для суммирования излучений комнатной и азотной ЧТ нагрузок на оптическом входе болометра. Регулируя угол поляризации сетки, можно изменять эффективную температуру системы из двух нагрузок (T'_{eff}). На рисунке 3.7 построена зависимость напряжения на входе синхронного детектора, представляющего собой отклик болометра, (V_{res}) от значения эффективной температуры по отношению к комнатному фону. Представленная зависимость подтверждает, что прямой НЕВ-детектор работает в линейном режиме. Стоит также отметить, что связь регистрируемого отклика с субгармоническим смешением зондирующего СВЧ излучения и терагерцового сигнала крайне маловероятна – отношение их частот составляет около 600.

Измерения при различных частотах СВЧ излучения и модуляции терагерцового сигнала, показали следующее. Измеренное значение ОСШ в выходном сигнале болометра оказалось практически постоянным в диапазоне частот модуляции от 100 Гц до нескольких кГц. В целях изучения быстрой

модуляции на частотах за пределами возможностей механического модулятора, мы протестировали прямой НЕВ-детектор при помощи АМ терагерцового источника излучения НГ. Максимальная реализуемая частота модуляции составила 1 МГц, завала на частотной зависимости отклика болометра обнаружено не было. Мы также обнаружили, что предложенная схема регистрации отклика хорошо работает при подогреве НЕВ-устройства СВЧ излучением с частотой до 3 ГГц. При увеличении частоты зондирующего СВЧ сигнала отраженная от болометра мощность значительно снижается и применение СВЧ рефлектометра для регистрации выходного сигнала болометра становится менее эффективно. Стоит отметить, что типичное значение ширины ПЧ волноводного NbN НЕВ-смесителя также составляет ~ 3 ГГц [124], а частотная зависимость выходного импеданса смесителя имеет точку перегиба в окрестности данного значения ПЧ [68, 124].

При гомодинной демодуляции выходного сигнала прямого НЕВ-детектора выход LNA подключался к ВЧ входу комнатного СВЧ смесителя (рисунок 3.1, положение ключа (а)), использующего в качестве гетеродина ответвленный от зондирующего СВЧ сигнал. При данной модификации экспериментальной установки значение оптической ЭМШ составило $1,6 \times 10^{-12}$ Вт/Гц^{0,5}, что соответствует двукратному улучшению по сравнению с использованием демодуляции квадратичным СВЧ детектором. Полученный результат объясняется снижением уровня входных шумов системы регистрации выходного сигнала прямого НЕВ-детектора. Об этом свидетельствует также тот факт, что динамический диапазон приемника увеличился примерно в 3 раза.

3.2.2. Цифровой режим детектирования

В метастабильной области ВАХ, в которую смещалось НЕВ-устройство при помощи зондирующего СВЧ сигнала и напряжения смещения по посто-

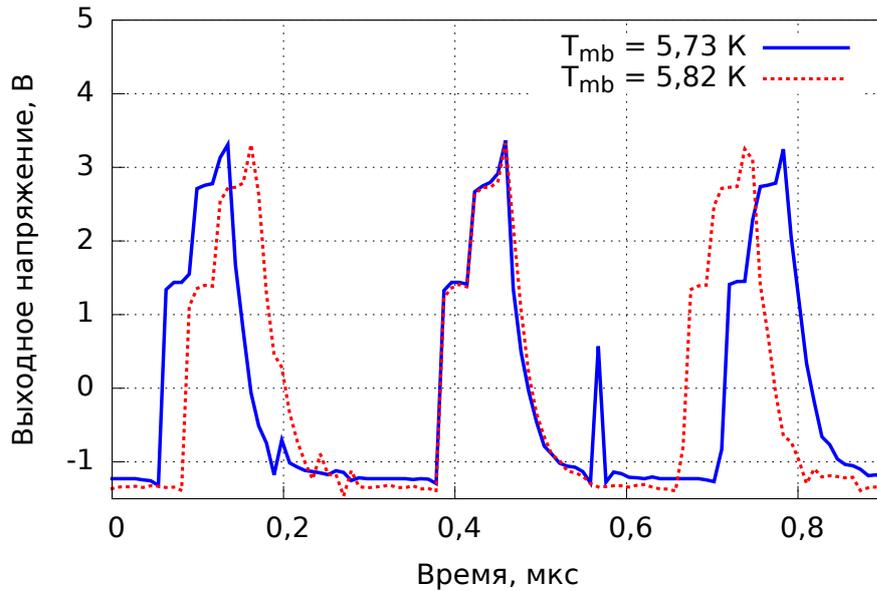


Рис. 3.8. Выходной сигнал прямого НЕВ-детектора, зарегистрированный быстрым цифровым осциллографом.

явному току, в выходном спектре болометра присутствовали релаксационные колебания (рисунок 3.8). Полученная по итогам измерений и представленная на рисунке 3.9 температурная зависимость частоты колебаний при фиксированной мощности СВЧ излучения подчиняется линейному закону в интервале температур болометра 4,5–5,5 К. Экспериментально было также установлено, что частота наблюдаемых релаксационных колебаний на выходе прямого НЕВ-детектора пропорциональна мощности терагерцового входного сигнала в диапазоне 3–70 нВт. Измерения проводились для болометра с объемом чувствительного элемента $0,004 \times 0,5 \times 5$ мкм³.

3.2.3. Зондирование импеданса прямого НЕВ-детектора сверхслабым СВЧ сигналом

Как видно из рисунка 3.10, ВАХ НЕВ-устройства под действием сверхслабого СВЧ сигнала имела гистерезисный участок в диапазоне напряжений смещения 5,5–7,5 мВ. При данной конфигурации эксперимента критический ток болометра практически не был подавлен, а СВЧ сигнал по-прежнему мог

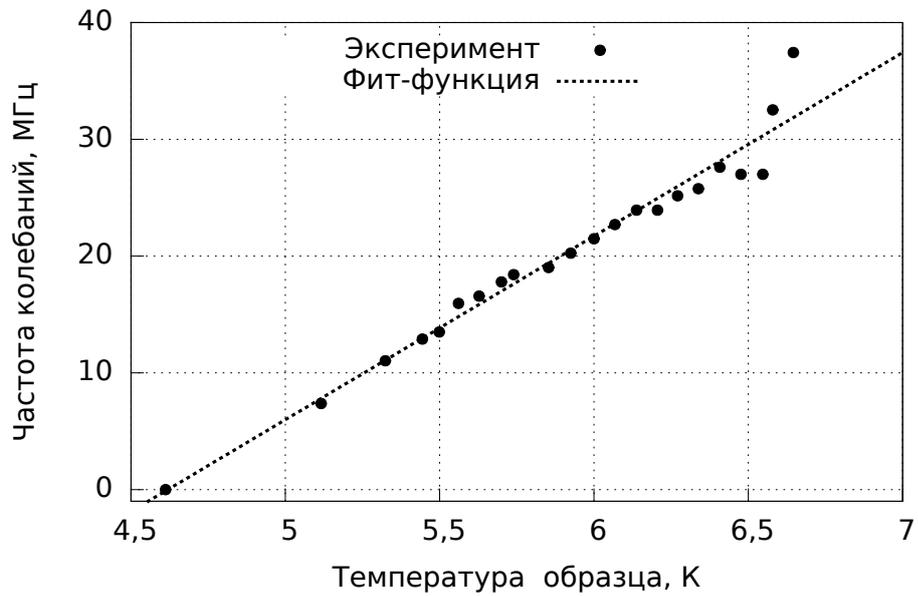


Рис. 3.9. Зависимость частоты релаксационных колебаний НЕВ-устройства, возникающих при работе в метастабильной области ВАХ, от его физической температуры.

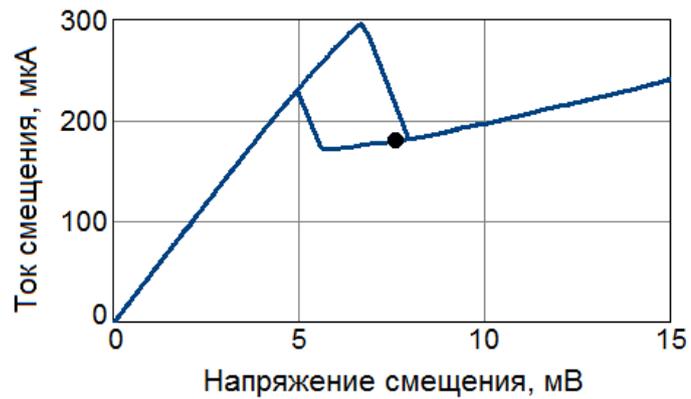


Рис. 3.10. ВАХ НЕВ-устройства под действием сверхслабого СВЧ сигнала. Черным кружком отмечена рабочая точка.

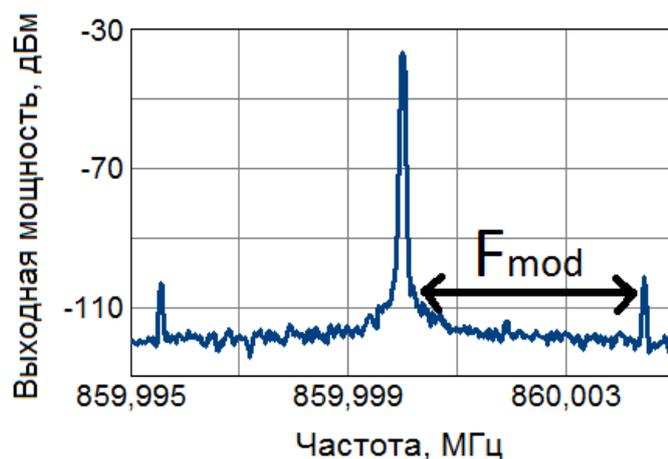


Рис. 3.11. Спектр выходной мощности прямого НЕВ-детектора в рабочей точке ВАХ.

быть эффективно использован для зондирования изменений импеданса НЕВ-устройства в ответ на изменение мощности на его оптическом входе (рисунок 3.11).

Стабильность прямого НЕВ-детектора при работе в точке смещения $V_{dc} = 7,5$ мВ, $I_{dc} = 180$ мкА на гистерезисном участке ВАХ при развертке напряжения смещения в сторону понижения была подтверждена измерением линий N_2O (рисунок 3.12)¹.

В выбранной рабочей точке смещения НЕВ-устройство обладало импедансом $92 - 18i$ Ом на частоте зондирующего сигнала 860 МГц, эффективность электронного разогрева при этом составила $30 - 4, 3i$ Ом/мкВт. Стоит отметить, что в ходе измерений импеданса было обнаружено, что использование анализатора цепей в режиме частотной развертки приводит к появлению артефактных АЧХ измеряемых величин, на которых присутствуют ни чем не обусловленные колебания низкой частоты и их гармоники. Данное обстоятельство было объяснено особенностями организации системы ФАПЧ анализатора, и с целью устранения негативного влияния на ход эксперимента он был переведен в режим НГ на фиксированной частоте.

¹ Расчет частотных профилей линий газа осуществлял Скотт Пэйн, Смитсоновская Астрофизическая Обсерватория.

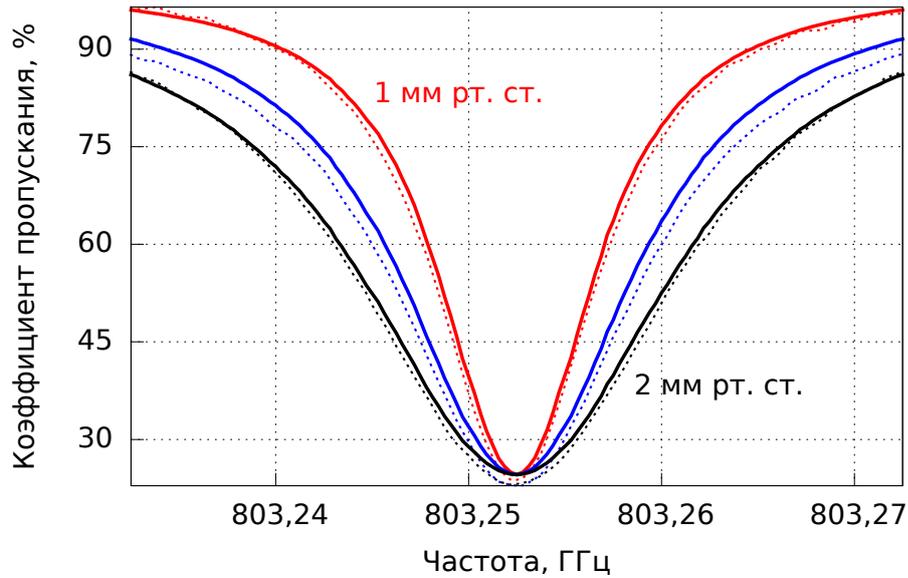


Рис. 3.12. Линии N_2O , измеренные при помощи смещенного в гистерезисную область ВАХ прямого НЕВ-детектора (сплошные кривые) и теоретически предсказанные для заданных значений температуры и давления газа в кювете (штриховые линии).

	Z_{heb} , Ом	C_{rf} , Ом/мкВт
Измерение	$92 - 18i$	$30 - 4,3i$
Расчет	$91 - 7i$	$20 - 3,7i$

Таблица 3.1. Экспериментальные и теоретические значения импеданса и эффективности электронного разогрева для квазиоптического прямого НЕВ-детектора из тонкой пленки NbN на частоте зондирующего сигнала 860 МГц.

Для количественной оценки результатов эксперимента мы воспользовались численным решением системы записанных в рекуррентной форме для НЕВ-устройства с электрической обвязкой уравнений теплового баланса методом Эйлера. При расчете в качестве входного параметра использовалась экспериментальная зависимость сопротивления образца от температуры. Расчетные значения Z_{heb} и C_{rf} приведены в таблице 3.1.

На основе анализа результатов измерений и расчетов можно заключить следующее. При зондировании импеданса НЕВ-устройства сверхслабым СВЧ

сигналом и работе при напряжении смещения в гистерезисной области ВАХ вкладом реактивного сопротивления в формирование отклика болометра на сигнальное терагерцовое излучение можно пренебречь.

3.2.4. Прямой НЕВ-детектор с нулевым смещением по постоянному току

При дальнейшем увеличении мощности зондирующего СВЧ сигнала критический ток на ветви ВАХ, полученной при развертке напряжения смещения в сторону понижения, исчезал (рисунок 3.13). В таком случае НЕВ-устройство могло быть переведено в точку ВАХ, соответствующую нулевому смещению по постоянному току, при помощи импульса тока с амплитудой превышающей значение критического тока на ветви ВАХ, полученной при развертке напряжения смещения в сторону повышения. В данной рабочей точке болометр обладал импедансом $68 - 7i$ Ом – наличие мнимой составляющей в полученном значении импеданса на частоте зондирующего СВЧ сигнала было интерпретировано следующим образом.

Уравнение теплового баланса для НЕВ-устройства можно записать как

$$C_e \frac{dT_e}{dt} = P_{ac} + I_{dc}V_{dc} - G_p(T_e - T_p) \quad (3.9)$$

Здесь C_e и T_e – теплоемкость и эффективная температура электронной подсистемы болометра, P_{ac} – мощность переменного сигнала на болометре, I_{dc} и V_{dc} – ток и напряжение смещения болометра, G_p и T_p – теплопроводность и эффективная температура фононной подсистемы болометра.

Как видно из уравнения 3.9, эффективная температура электронной подсистемы НЕВ-устройства должна изменяться в соответствии с изменением мощности поданного на него переменного сигнала, причем, в общем случае, должна присутствовать разность фаз (ϕ). Таким образом, уравнение 3.9 мож-

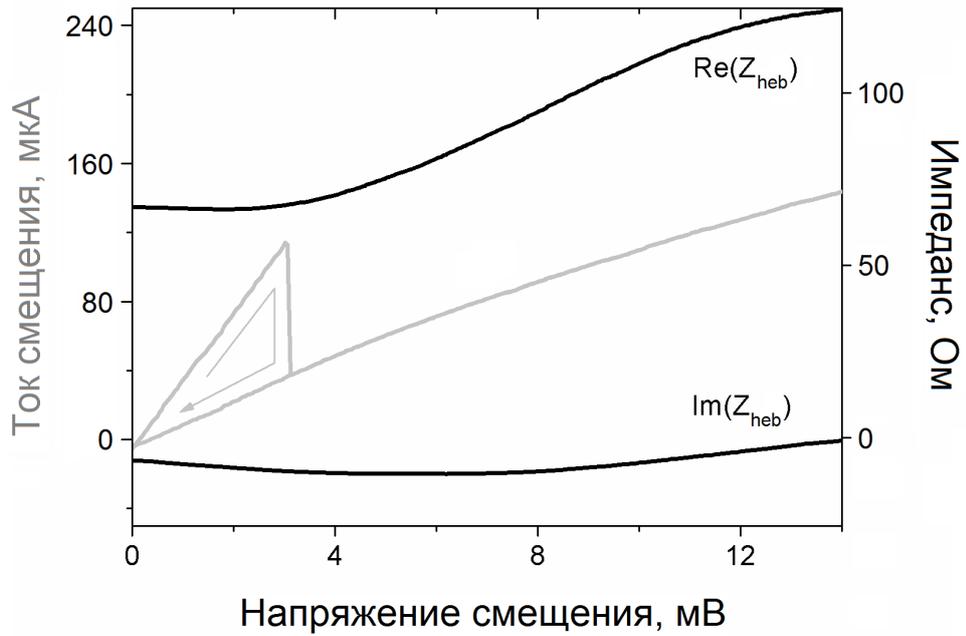


Рис. 3.13. ВАХ (серая кривая) и импеданс (черные кривые) НЕВ-устройства под действием сильного зондирующего СВЧ сигнала.

но привести к виду

$$C_e \frac{d}{dt} [T_0 \cos(\omega t + \phi)] = P_0 \cos(\omega t) + I_{dc} V_{dc} - G_p [T_0 \cos(\omega t + \phi) - T_p] \quad (3.10)$$

Продифференцировав, представив все тригонометрические функции в виде алгебраической суммы комплексных экспонент по формулам Эйлера и приведя подобные слагаемые, можно преобразовать уравнение 3.10 к следующей форме

$$k_1 \cdot e^{i\omega t} = k_2 \cdot e^{-i\omega t} + I_{dc} V_{dc} + G_p T_p, \quad (3.11)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{1}{2} (iC_e T_0 \omega e^{i\phi} - P_0 + T_0 G_p e^{i\phi}), k_2 = \frac{1}{2} (iC_e T_0 \omega e^{-i\phi} + P_0 - T_0 G_p e^{-i\phi}).$$

Примем для простоты, что образец находится при нулевой температуре, а смещение по постоянному току отсутствует. Тогда, для того чтобы равенство 3.11 выполнялось для любой произвольной точки во времени, должны быть равны нулю коэффициенты при комплексных экспонентах. В результате

получаем систему из двух уравнений

$$\begin{cases} e^{i\phi} = \frac{P_0}{T_0 G_p} \cdot \frac{1}{1+i\omega\tau_{Te}} \\ e^{-i\phi} = \frac{P_0}{T_0 G_p} \cdot \frac{1}{1-i\omega\tau_{Te}} \end{cases}, \quad (3.12)$$

где $\tau_{Te} = \frac{C_e}{G_p}$ – время релаксации электронной температуры.

В итоге получаем $\phi = -\frac{i}{2} \cdot \ln\left(\frac{1-i\omega\tau_{Te}}{1+i\omega\tau_{Te}}\right)$. С учетом того что для волноводного прямого НЕВ-детектора время релаксации достигает ~ 27 пс [94], получаем ожидаемое запаздывание фазы изменений эффективной температуры электронной подсистемы болометра по отношению к падающему переменному сигналу с частотой 1,5 ГГц $\phi \approx -0,25$. Данное значение превышает полученное по итогам измерений импеданса значение $\text{carg}(Z_{heb}) = -0,1$, однако на качественном уровне подтверждает наличие емкостной составляющей в выходном импедансе болометра под действием СВЧ излучения.

В рабочей точке с нулевым смещением по постоянному току прямой НЕВ-детектор обладал $NEP_o = 10^{-12}$ Вт/Гц^{0,5} при гомодинной демодуляции выходного сигнала. Улучшение чувствительности по сравнению со случаем смещения болометра в метастабильную область ВАХ (см. пункт 3.2.1) в 1,5-2 раза связано с возрастанием вклада реактивного сопротивления в формирование отклика на сигнальное терагерцовое излучение. Так, измеренные значения C_{rf} составили $310 - 780i$ Ом/мкВт и $310 - 310i$ Ом/мкВт для случая нулевого смещения и при смещении болометра в метастабильную область ВАХ соответственно.

3.3. Выводы к главе

В настоящей главе диссертации продемонстрирован новый способ эксплуатации НЕВ-устройства в болометрическом режиме. Данный способ сопряжен с использованием СВЧ рефлектометра для регистрации выходного

сигнала прямого НЕВ-детектора. Зондирующий СВЧ сигнал малой амплитуды используется одновременно и для смещения болометра в рабочую область ВАХ. При работе в метастабильной области ВАХ обнаружена линейная зависимость частоты собственных релаксационных колебаний НЕВ-устройства от мощности входного терагерцового сигнала в диапазоне 3–70 нВт.

В главе также показано, что болометр в рамках методики СВЧ рефлектометрии обладает высокой чувствительностью как при смещении в метастабильную область ВАХ, так и при нулевом смещении по постоянному току. В последнем случае измеренное значение оптической ЭМШ составило 10^{-12} Вт/Гц^{0,5} на частоте сигнала 830 ГГц. Хотя полученное значение сопоставимо с техническими характеристиками работающих при 4 К прямых НЕВ-детекторов [125, 126], использование СВЧ рефлектометрии дает ряд преимуществ. Схему также легко адаптировать для мультиплексирования выходного сигнала матричного НЕВ-приемника прямого детектирования. При использовании криогенного SiGe LNA быстродействие такого приемника будет ограничено лишь собственным быстродействием его пикселей. Стабильность выходного сигнала прямого НЕВ-детектора под действием зондирующего СВЧ сигнала была подтверждена измерением спектра линий N₂O в лабораторных условиях.

Заключение

По итогам выполненных в рамках диссертационного исследования работ были получены следующие основные результаты:

1. Установлена точная количественная корреляция между стабильностью выходной мощности НЕВ-смесителя и рабочим током смещения. На основе этого разработана и реализована автономная система СВЧ подогрева электронной подсистемы НЕВ-смесителя с отрицательной обратной связью по току смещения для стабилизации рабочей точки смесителя по постоянному току.
2. Исследована стабильность гетеродинного приемника на основе НЕВ-смесителя, выявлены доминантные источники коррелированного шума в выходном сигнале приемника. На основе этого создан прототип приемной гетеродинной системы на основе НЕВ-смесителя в машине замкнутого цикла. Частота источника гетеродина – 1310 ГГц, флуктуационная чувствительность – 0,5 К, время Аллана – 5 с (флуктуации температуры и вибрации, вызываемые машиной, скомпенсированы).
3. Исследованы шумовые характеристики и спектр выходного сигнала прямого НЕВ-детектора, работающего в рамках схемы регистрации отклика на базе СВЧ рефлектометра: определена оптимальная мощность зондирующего СВЧ сигнала и параметры смещения по постоянному току. На основе этого сформулированы принципы для создания матричного приемника терагерцового излучения на базе прямого НЕВ-детектора с нулевым смещением по постоянному току.
4. Подтверждена стабильность прямого НЕВ-детектора, смещенного в гистерезисную область ВАХ при развертке напряжения смещения в сто-

рону понижения, путем измерений в лабораторных условиях спектра линий N_2O .

5. Изучены особенности частотно-импульсной модуляции релаксационных колебаний в выходном спектре прямого НЕВ-детектора, работающего в рамках схемы СВЧ рефлектометрии: получена зависимость частоты колебаний от рабочей температуры детектора и мощности входного терагерцового сигнала.

Соответствие промежуточных экспериментальных результатов на качественном и количественном уровне материалам, представленным в научно-технических работах других авторов, в сочетании с успешным использованием коммерциализованных наработок и опубликованных по итогам диссертационного исследования материалов представителями научного терагерцового сообщества подтверждают достоверность и надежность полученного итогового результата.

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты были использованы при разработке и создании прототипа приемной системы на основе НЕВ-смесителя в рамках реализации канала с центральной частотой 1,44 ТГц для GLT (в числе потенциальных кандидатов DATE5 и GUSTO). Кроме того, полученные наработки были успешно применены для создания инновационных коммерчески доступных одно- и многоэлементных приемников на базе прямого НЕВ-детектора с нулевым смещением по постоянному току компанией ЗАО «Сконтел», созданной представителями Учебно-научного радиофизического центра МПГУ для коммерциализации результатов научно-технических разработок.

Список публикаций

- A1. Shurakov A., Seliverstov S., Kaurova N. et al. Input bandwidth of Hot Electron Bolometer with spiral antenna // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2012. Vol. 2, no. 4. Pp. 400–405.
- A2. Shurakov A., Tong C.-Y. E., Blundell R. et al. Microwave stabilization of a HEB mixer in a pulse-tube cryocooler // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2013. Vol. 23, no. 3. P. 1501504.
- A3. Tong E., Trifonov A., Shurakov A. et al. A microwave-operated Hot-Electron-Bolometric power detector for terahertz radiation // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014. Vol. 25, no. 3. P. 2300604.
- A4. Lobanov Y., Shcherbatenko M., Shurakov A. et al. Heterodyne detection at near-infrared wavelengths with a superconducting NbN Hot Electron bolometer mixer // Opt. Lett. 2014. Vol. 39, no. 6. Pp. 1429–1432.
- A5. Shurakov A., Tong C.-Y. E., et al. A microwave reflection readout scheme for Hot Electron Bolometric direct detector // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. Vol. 5, no. 1. Pp. 81–84.
- A6. Shurakov A., Lobanov Y., Goltsman G. Superconducting hot-electron bolometer: from the discovery of hot-electron phenomena to practical applications // Supercond. Sci. Technol. 2015. Vol. 29, no. 2. P. 023001.
- A7. Shurakov A., Mikhalev P., Mikhailov D. et al. Ti/Au/n-GaAs planar Schottky diode with a moderately Si-doped matching sublayer // Microelectron. Eng. 2018. Vol. 195. Pp. 26–31.
- A8. Shurakov A., Tong E., Blundell R., Gol'tsman G. Microwave stabilization of

HEB mixer by a microchip controller // IEEE MTTT Int. Microw. Symp. 2012. Pp. 1–3.

A9. Shurakov A., Tong C. E., Blundell R., Gol'tsman G. A Microwave Pumped HEB Direct Detector Using a Homodyne Readout Scheme // Proc. of the 25th Int. Symp. on Space Terahertz Technology / Higher School of Economics. Moscow, Russia: 2014. — April 27-30. P. 129.

A10. Shurakov A., Maslennikov S., Tong C. E., Gol'tsman G. Performance of an HEB Direct Detector Utilizing a Microwave Reflection Readout Scheme // Proc. of the 26th Int. Symp. on Space Terahertz Technology / Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Cambridge, MA, USA: 2015. — March 16-18. Pp. P–36.

Литература

1. Miao W., Zhang W., Zhong J. Q. et al. Non-uniform absorption of terahertz radiation on superconducting Hot Electron Bolometer microbridges // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104. P. 052605.
2. Maslennikov S. N. RF heating efficiency of the terahertz superconducting Hot Electron Bolometer // arXiv:1404.5276v5. 2014.
3. Vercruyssen N., Verhagen T. G. A., Flokstra M. G. et al. Evanescent states and nonequilibrium in driven superconducting nanowires // Phys. Rev. B. 2012. Vol. 85. P. 224503.
4. Krause S., Mityashkin V., Antipov S. et al. Reduction of phonon escape time for NbN Hot Electron Bolometers by using GaN buffer layers // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2017. Vol. 7, no. 1. Pp. 53–59.
5. Novoselov E., Cherednichenko S. Low noise terahertz MgB₂ hot-electron bolometer mixers with an 11 GHz bandwidth // Appl. Phys. Lett. 2017. Vol. 110. P. 032601.
6. Gao J. R., Hajenius M., Tichelaar F. D. et al. Monocrystalline NbN nanofilms on a 3C-SiC / Si substrate // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. P. 062504.
7. de Graauw T., Helmich F. P., Phillips T. G. et al. The Herschel – Heterodyne Instrument for the Far-Infrared (HIFI) // A & A. 2010. Vol. 518, no. 2. Pp. 1–7.
8. de Lange G., Krieg J.-M., Honingh N. et al. Performance of the HIFI flight mixers // Proc. of the 19th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2008. Pp. 98–105.

9. Kawamura J., et al. Superconductive Hot Electron Bolometer mixer receiver for 800 GHz operation // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2000. Vol. 48, no. 4. Pp. 683–689.
10. Meledin D. V., Daniel P. Marrone C.-Y. E. T., et al. A 1 THz Superconducting hotelectron-bolometer receiver for astronomical observations // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2004. Vol. 52. Pp. 2338–2343.
11. Meledin D., et al. A 1.3-THz balanced waveguide HEB mixer for the APEX telescope // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2009. Vol. 57, no. 1. Pp. 89–98.
12. Putz P., Buchel D., Jacobs K. et al. Waveguide Hot Electron Bolometer mixer development for upGREAT // Proc. of the 39th IRMMW-THz. 2014. Pp. 1–2.
13. Buchel D., Putz P., Jacobs K. et al. 4.7-THz superconducting Hot Electron Bolometer waveguide mixer // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2015. Vol. 5, no. 2. Pp. 207–214.
14. Zhou K. M., Miao W., Lou Z. et al. A 1.4 THz quasi-optical NbN superconducting HEB mixer developed for the DATE5 telescope // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014. Vol. 25, no. 3. Pp. 1–5.
15. Blundell R. Invited talk: The Greenland Telescope // Proc. of the 25th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2014. Pp. 72–75.
16. Shi S.-C., Zhang W., Li J. et al. A THz Superconducting Imaging Array Developed for the DATE5 Telescope // J. Low. Temp. Phys. 2016. Vol. 184. Pp. 754–758.

17. Silva J. R., Farinha R., Hayton D. J. et al. Preliminary design study of a 4x2 HEB array at 4.7 THz for GUSTO // Proc. of the 29th Int. Symp. on Space Terahertz Technology / Caltech. Pasadena, CA, USA: 2018. — March. P. 82–86.
18. Lewis R. A. A review of terahertz sources // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. P. 374001.
19. Tuchak A. N., Gol'tsman G. N., Kitaeva G. K. et al. Generation of nanosecond terahertz pulses by the optical rectification method // JETP Lett. 2012. Vol. 96, no. 2. Pp. 94–97.
20. Burghoff D., Kao T.-Y., Han N. et al. Terahertz laser frequency combs // Nat. Photonics. 2014. Vol. 8. Pp. 462–467.
21. Baryshev A., et al. Phase locking and spectral linewidth of a two-mode terahertz quantum cascade laser // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 31115.
22. Khosropanah P., et al. Phase locking of a 2.7 THz quantum cascade laser to a microwave reference // Opt. Lett. 2009. Vol. 34. Pp. 2958–2960.
23. Irimajiri Y., et al. Phase-locking of a THz-QCL using a low noise HEB mixer and a frequency-comb as a reference // Proc. of the 39th IRMMW-THz. 2014. Pp. 1–2.
24. Ryabchun S., Tong C.-Y. E., Blundell R. et al. Study of the effect of microwave radiation on the operation of HEB mixers in the terahertz frequency range // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. Vol. 17, no. 2. Pp. 391–394.
25. Kooi J. W., et al. Stability of heterodyne receivers // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. P. 64904.

26. Zannoni R., Yngvesson K. S. The bias II feedback system: understanding and improving stability in NbN HEB terahertz receivers // Proc. of the 33rd IRMMW-THz. 2008. Pp. 1–2.
27. Chen J., et al. Stability of superconducting Hot Electron Bolometer receivers // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. Vol. 21, no. 3. Pp. 667–670.
28. Hayton D. J., et al. Stabilized Hot Electron Bolometer heterodyne receiver at 2.5 THz // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. P. 081102.
29. Kloosterman J., Hayton D., Ren Y. et al. Hot Electron Bolometer heterodyne receiver with a 4.7-THz quantum cascade laser as a local oscillator // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102. P. 011123.
30. Karasik B. S., McKitterick C. B., Reck T. J., Prober D. E. Normal-metal Hot-Electron nanobolometer with Johnson noise thermometry readout // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2014. Vol. 5, no. 1. Pp. 16–21.
31. Hayton D. J., Kloosterman J. L., Ren Y. et al. A 4.7 THz heterodyne receiver for a balloon borne telescope // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9153. P. 91531R.
32. Seliverstov S., Maslennikov S., Ryabchun S. et al. Fast and sensitive terahertz direct detector based on superconducting antenna-coupled Hot Electron Bolometer // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. Vol. 25, no. 3. P. 6963299.
33. Pals J. A., et al. // Phys. Rep. 1982. Vol. 89, no. 4. Pp. 323–390.
34. Schklovski V. A. Hot Electrons in metals at low temperatures // J. Low Temp. Phys. 1980. Vol. 41, no. 3/4. Pp. 375–396.
35. Al'tshuler B. L., Aronov A. G. Influence of electron-electron correlations

- on the resistivity of dirty metals // JETP Lett. 1978. Vol. 27, no. 12. Pp. 662–664.
36. Geshenzon E. M., Gershenson M. E., Gol'tsman G. N. et al. Heating of quasiparticles in a superconducting film in the resistive state // JETP Lett. 1981. Vol. 34, no. 5. Pp. 268–271.
 37. Gershenson E. M., Gershenson M. E., Gol'tsman G. N. et al. Nonselective effect of electromagnetic radiation on a superconducting film in the resistive state // JETP Lett. 1982. Vol. 36, no. 7. Pp. 296–299.
 38. Geshenzon E. M., Gershenson M. E., Gol'tsman G. N. et al. Heating of electrons in a superconductor in the resistive state by electromagnetic radiation // Sov. Phys. JETP. 1984. Vol. 59. P. 442.
 39. Gershenson E. M., et al. Intense EM radiation heating of electrons of a superconductor in the resistive state // Fiz. Nizk. Temp. 1988. Vol. 14. Pp. 753–73.
 40. Elant'ev A. I., Karasik B. S. Effect of high frequency current on Nb superconducting film in the resistive state // Sov. J. Low Temp. Phys. 1989. Vol. 15. Pp. 379–383.
 41. Gol'tsman G. N., Karasik B. S., Okunev O. V. et al. NbN Hot Electron superconducting mixers for 100 GHz Operation // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1995. Vol. 5, no. 2. Pp. 3065–3068.
 42. Gershenson E. M., Gol'tsman G. N., Gogidze I. G. et al. Millimeter and submillimeter range mixer based on electronic heating of superconducting films in the resistive state // Sov. Phys. Supercond. 1990. Vol. 3, no. 10. P. 1582.

43. Kawamura J., et al. Superconductive NbN Hot Electron Bolometric mixer performance at 250 Ghz // Proc. of the 7th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1996. Pp. 331–336.
44. Kawamura J., et al. Terahertz-frequency waveguide NbN Hot Electron Bolometer mixer // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001. Vol. 11. Pp. 952–954.
45. Goltsman G. Hot Electron Bolometric mixers: new terahertz technology // Infrared Phys. Technol. 1999. Vol. 40. Pp. 199–206.
46. Yagoubov P., Kroug M., Merkel H. et al. Noise temperature and local oscillator power requirement of NbN phonon-cooled Hot Electron Bolometric mixers at terahertz frequencies // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 73, no. 19.
47. Filipovic D. F., Gearhart S. S., Rebeiz G. M. Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1993. Vol. 41, no. 10. Pp. 1738–1749.
48. Focardi P., McGrath W., Neto A. Design guidelines for terahertz mixers and detectors // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2005. Vol. 53, no. 5. Pp. 1653–1661.
49. Semenov A. D., Richter H., Hubers H.-W. et al. Terahertz performance of integrated lens antennas with a Hot Electron Bolometer // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2007. Vol. 55. Pp. 239–247.
50. Gousev Y. P., Gol'tsman G. N., Karasik B. S. et al. Quasioptical superconducting Hot Electron Bolometer for submillimeter waves // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1996. Vol. 17, no. 2. Pp. 317–331.

51. Karasik B. S., Gaidis M. C., McGrath W. R. et al. Low noise in a diffusion-cooled Hot Electron mixer at 2.5 THz // *Appl. Phys. Lett.* 1997. Vol. 71, no. 11. P. 1567.
52. Gershenzon E. M., Gol'tsman G. N., Gousev Y. P. et al. Electromagnetic radiation mixer based on electron heating in resistive state of superconductive Nb and YBaCuO films // *IEEE Trans. Magn.* 1991. Vol. 27, no. 2. Pp. 1317–1320.
53. Perrin N., Vanneste C. Response of superconducting films to a periodic optical irradiation // *Phys. Rev. B.* 1983. Vol. 28, no. 9. P. 5150.
54. Prober D. E. Superconducting terahertz mixer using a transition-edge microbolometer // *Appl. Phys. Lett.* 1993. Vol. 62. P. 2119.
55. Gershenzon E. M., Gol'tsman G. N., Gousev Y. P. et al. Electromagnetic radiation mixer based on electron heating in resistive state of superconductive Nb and YBaCuO films // *IEEE Trans. Magn.* 1991. Vol. MAG-27, no. 2. Pp. 1317–1320.
56. Karasik B. S., Pechen E. V., Krasnosvobodtsev S. I. Diffusion cooling mechanism in a Hot Electron NbN microbolometer // *Appl. Phys. Lett.* 1996. Vol. 68, no. 16. P. 2285.
57. Karasik B. S., Gaidis M. C., McGrath W. R. et al. A lownoise 2.5 THz superconductive Nb Hot Electron mixer // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1997. Vol. 7, no. 2. P. 3580.
58. Burke P. J., Schoelkopf R. J., Prober D. E. et al. Length scaling of bandwidth and noise in Hot-Electron superconducting mixers // *Appl. Phys. Lett.* 1996. Vol. 68, no. 23. P. 3344.

59. Burke P. J., Schoelkopf R. J., Siddiqi I., Prober D. E. Noise performance of diffusion cooled Hot Electron Bolometers: theory vs. experiment // Proc. of the 9th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1998. Pp. 17–33.
60. Floet D. W., Baselmans J. J., Gao J. R., Klapwijk T. M. Resistive behaviour of Nb diffusion-cooled Hot Electron Bolometers // Proc. of the 9th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1998. Pp. 63–72.
61. Skalare A., McGrath W. R., Bumble B. et al. Large bandwidth and low noise in a diffusion-cooled Hot Electron Bolometer mixer // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68, no. 11. P. 1558.
62. Skalare A., McGrath W. R., Bumble B., LeDuc H. G. Measurements with a diffusion-cooled Nb Hot Electron bolometer mixer at 1100 GHz // Proc. of the 9th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1998. Pp. 115–120.
63. Wyss R. A., Karasik B. S., McGrath W. R. et al. Noise and bandwidth measurements of diffusion-cooled Nb Hot Electron Bolometer mixers at frequencies above the superconductive energy gap // Proc. of the 10th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1999. Pp. 215–228.
64. Skalare A., McGrath W. R., Echternach P. M. et al. Aluminum Hot-Electron Bolometer mixers at submillimeter wavelengths // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001. Vol. 11, no. 1. Pp. 641–644.
65. Ryabchun S. A., Tretyakov I. V., Finkel M. I. et al. Fabrication and characterisation of NbN HEB mixers with in situ gold contacts // Proc. of the 19th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2008. Pp. 62–67.
66. Tretyakov I., Maslennikov S., Lobanov Y. et al. Controlling the IF Bandwidth of superconducting hot-electron bolometer mixers by the bath temperature. to be published in 2015.

67. Nahum M R. P. L., A M. C. Design analysis of a novel Hot Electron microbolometer // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1993. Vol. 3, no. 1. Pp. 2124–2127.
68. Karasik B. S., Elantev A. I. Analysis of the noise performance of a Hot-Electron superconducting Bolometer mixer // Proc. of the 6th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1995. Pp. 229–246.
69. Floet D. W., Miedema E., Klapwijk T. M., Gao J. R. Hotspot mixing: a framework of heterodyne mixing in superconducting Hot-Electron Bolometers // APL. 1999. Vol. 74, no. 3. Pp. 433–435.
70. Merkel H., Khosropanah P., Yagoubov P., Kollberg E. A hot spot mixer model for superconducting phonon-cooled HEB far above the quasiparticle bandgap // Proc. of the 10th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1999. Pp. 592–606.
71. Zhuang Y., Yngvesson K. S. Negative resistance effects in NbN HEB devices // Proc. of the 12th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2001. Pp. 131–140.
72. Gurevich A. V., Mints R. G. Self-heating in normal metals and superconductors // Rev. Mod. Phys. 1987. Vol. 59, no. 4. Pp. 941–1000.
73. Zhuang Y., Yngvesson K. S. Detection and interpretation of bistability effects in NbN HEB devices // Proc. of the 13th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2002. Pp. 463–472.
74. Stekly Z. J. J., Zar J. L. Stable superconducting coils // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1965. Vol. 12. P. 367.

75. Zhuang Y., Yngvesson K. S. Bistability in NbN HEB mixer devices // Proc. of the 14th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2003. Pp. 290–298.
76. Svechnikov S., Verevkin A., Voronov B. et al. Quasioptical phonon-cooled NbN Hot Electron Bolometer mixers at 0.5-1.1 THz // Proc. of the 9th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1998. Pp. 45–51.
77. Vachtomin Y. B., Antipov S., Maslennikov S. N. et al. Noise temperature measurements of NbN phonon-cooled Hot Electron Bolometer mixer at 2.5 and 3.8 THz // Proc. of the 15th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2004. Pp. 236–241.
78. Baselmans J. J. A., et al. Direct detection effect in small volume Hot Electron Bolometer mixers // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. P. 163503.
79. Baselmans J. J. A., Hajenius M., Gao J. R. et al. NbN Hot Electron Bolometer mixers: sensitivity and LO Power and direct detection and stability // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2005. Vol. 15, no. 2. Pp. 484–489.
80. Baselmans J. J. A., et al. Influence of the direct response on the heterodyne sensitivity of Hot Electron Bolometer mixers // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. P. 084510.
81. Cherednichenko S., et al. The direct detection effect in the Hot-Electron Bolometer mixer sensitivity calibration // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2007. Vol. 55, no. 3. Pp. 504–510.
82. Ossenkopf V. The stability of spectroscopic instruments: a unified Allan variance computation scheme // A & A. 2008. Vol. 479. Pp. 915–926.
83. Gogue G. P., Stupak J. J. Magnetizing fixture provides 3D flux-flow // Proc. of the 16th Int. Intelligent Motion Conference. 1989. Vol. 16.

84. Ryabchun S. A., Tong C.-Y. E., Blundell R. et al. Stabilisation of a terahertz Hot-Electron Bolometer mixer with microwave feedback control // Proc. of the 18th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2007. Pp. 193–198.
85. Ryabchun S., Tong E., Blundell R., Goltsman G. Stabilization scheme for Hot-Electron Bolometer receivers using microwave radiation // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2009. Vol. 19, no. 1. Pp. 14–19.
86. Gerstenberg D., Hall P. M. Superconducting Thin Films of Niobium and Tantalum and Tantalum Nitride and Tantalum Carbide and Niobium Nitride // Electrochem. Soc. 1964. Vol. 111. Pp. 936–942.
87. Gershenzon M. E., Koshelets V. P. Superconducting properties of Nb and NbN films synthesized by RF cathode sputtering // Sov. Phys. - Tech. Phys. 1980. Vol. 25, no. 3. Pp. 343–346.
88. Liu X., Babcock J., Lane M. et al. Plasma-assisted MOCVD growth of superconducting NbN thin films using Nb dialkylamide and Nb alkylimide precursors // Chem. Vap. Deposition. 2001. Vol. 7, no. 1.
89. Cappuccio G., Gambardella U., Morone A. et al. Pulsed laser ablation of NbN/MgO/NbN multilayers // Appl. Surf. Sci. 1997. Vol. 109/110. Pp. 399–402.
90. Inumaru K., Okamoto H., Yamanaka S. Preparation of superconducting epitaxial thin films of transition metal nitrides on silicon wafers by molecular beam epitaxy // J. Crys. Growth. 2002. Vol. 237-239. Pp. 2050–2054.
91. Ziegler M., Fritsch L., Day J. et al. Superconducting niobium nitride thin films deposited by metal organic plasma-enhanced atomic layer deposition // Supercond. Sci. Technol. 2013. Vol. 26. P. 025008.

92. Baba K., Hatada R., Udoh K., Yasuda K. Structure and properties of NbN and TaN films prepared by ion beam assisted deposition // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1997. Vol. 127/128. Pp. 841–845.
93. Kaplan S. B. // Low Temp. Phys. 1979. Vol. 37. P. 343.
94. Meledin D., Tong C.-Y. E., Blundell R. et al. Study of the IF bandwidth of NbN HEB mixers based on crystalline quartz substrate with an MgO buffer layer // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2003. Vol. 13, no. 2. Pp. 164–167.
95. Dzardanov A., Ekstrom H., Gershenson E. et al. Hot-Electron superconducting mixers for 20-500 GHz operation // Proc. of SPIE. 1994. Vol. 2250. Pp. 276–278.
96. Kawamura J., Blundell R., Tong C.-Y. E. et al. NbN Hot-Electron mixer measurements at 200 GHz // Proc. of the 6th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1995. Pp. 254–261.
97. Okunev O., Dzardranov A., Gol'tsman G., Gershenson E. Performances of Hot Electron superconducting mixer for frequencies less than the gap energy: NbN mixer for 100 GHz operation // Proc. of the 6th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1995. Pp. 247–253.
98. Finkel M. I., Maslennikov S. N., Vachtomin Y. B. et al. Hot Electron Bolometer mixer for 20 - 40 THz frequency range // Proc. of the 16th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2005. Pp. 393–397.
99. Maslennikov S. N., et al. Spiral antenna coupled and directly coupled NbN HEB mixers in the frequency range from 1 to 70 THz // Proc. of the 17th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2006. Pp. 177–179.

100. Kawakami A., Saito S., Hyodo M. Fabrication of nano-antennas for superconducting infrared detectors // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. Vol. 21. Pp. 632–635.
101. Kawakami A., Horikawa J., Hyodo M. et al. Fabrication of superconducting mid-infrared photo-detectors with dipole nano-antennas // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. Vol. 25, no. 3.
102. Horikawa J., Kawakami A., Hyodo M. et al. Study of midinfrared superconducting detector with phased-array nanoslot antenna // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. Vol. 25, no. 3. P. 2301005.
103. Klapwijk T. M., Barends R., Gao J. R. et al. Improved superconducting HEB devices for the THz range // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5498. Pp. 129–139.
104. Meledin D., Pavolotsky A., Desmaris V. et al. A 1.3 THz balanced waveguide HEB mixer for the APEX telescope // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. 2009. Vol. 57. Pp. 89–98.
105. Tretyakov I., Ryabchun S., Finkel M. et al. Low noise and wide bandwidth of NbN Hot Electron Bolometer mixers // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98, no. 3. P. 033507.
106. Khosropanah P., Gao J. R., Laauwen W. M. et al. Low noise NbN Hot Electron Bolometer mixer at 4.3 THz // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91. P. 221111.
107. Zhang W., Khosropanah P., Gao J. R. et al. Quantum noise in a terahertz Hot Electron Bolometer mixer // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96. P. 111113.
108. TCBT-14+, Mini-Circuits.
109. AFS3-00 1 00800-30-20P-4, Miteq.

110. Allan D. Statistics of atomic frequency standards // Proc. of the IEEE. 1966. Vol. 54, no. 2.
111. Ryabchun S., Tong E., Blundell R. et al. Effect of microwave radiation on the stability of terahertz hot-electron bolometer mixers // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6373.
112. Zhang C., Wang Y., Wang D. et al. Suppression of superconductivity in epitaxial MgB2 ultrathin films // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 114. P. 023903.
113. Модель PT403-RM, Cryomech Inc.
114. Bradley P. E., Gerecht E., Radebaugh R., Garaway I. Development of 4 K stirling-type pulse tube cryocooler for a mobile terahertz detection system // AIP Conf. Proc. 2010. Vol. 1218. Pp. 1593–1600.
115. Bradley P. E., Radebaugh R., Garaway I., Gerecht E. Progress in the development and performance of a high frequency 4K Stirling-type Pulse Tube cryocooler // Proc. of the 16th Int. Cryocooler Conf. 2008. Pp. 27–33.
116. М. Борн . . . Основы оптики. Пер. с англ., под ред. Мотулевич Г. П. Издание 2-е. Исправленное изд. Москва: Москва, 1973.
117. Grischkovsky D., Keiding S., van Exter M., Fattinger C. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors // J. Opt. Soc. Am. B. 1990. Vol. 7, no. 10. Pp. 2006–2015.
118. Lamb J. W. Miscellaneous data on materials for millimetre and submillimetre optics // Int. J. Infrared Millimeter Waves. 1996. Vol. 17, no. 12. Pp. 1997–2034.
119. Benford D. J., Gaidis M. C., Kooi J. W. Transmission properties of Zitex

- in the infrared to submillimeter // Proc. of the 10th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1999. Pp. 405–413.
120. Marquardt E., Le J., Radebaugh R. Cryogenic material properties database // 11th Int. Cryocooler Conf. Keystone, Co: 2000. — June.
 121. Ekstrom H., Karasik B. Electron temperature fluctuation noise in Hot-Electron superconducting mixers // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 66, no. 23. P. 3212.
 122. Khosropanah P., Merkel H., Yngvesson S. et al. A distributed device model for phonon-cooled HEB mixers predicting IV characteristics and gain and noise and IF bandwidth // Proc. of the 11th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2000.
 123. Nebosis R. S., Semenov A. D., Gousev Y. P., Renk K. F. Rigorous analysis of a superconducting Hot Electron Bolometer mixer: theory and comparison with experiment // Proc. of the 7th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 1996. Pp. 601–613.
 124. Lobanov Y. V., Tong C.-Y. E., Hedden A. S. et al. Direct measurement of the gain and noise bandwidth of HEB mixers // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. Vol. 21. P. 645–648.
 125. Ren Y., Miao W., Yao Q.-J. et al. Terahertz direct detection characteristics of a superconducting NbN bolometer // Chin. Phys. Lett. 2011. Vol. 28, no. 1. P. 010702.
 126. Zhang W., Miao W., Zhou K. M. et al. Heterodyne mixing and direct detection performance of a superconducting NbN hot electron bolometer // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. Vol. 21, no. 3. P. 624–627.