

На правах рукописи



Шураков Александр Сергеевич

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

Специальность – 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Институте физики, технологии и информационных систем ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет».

Научный руководитель: **Гольцман Григорий Наумович**,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Карпов Александр Владимирович**,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
«Сверхпроводящие метаматериалы» ФГА-
ОУ ВО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Розанов Сергей Борисович,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Отдела спектро-
скопии Отделения оптики ФГБУН «Физиче-
ский институт им. П.Н. Лебедева Российской
академии наук»

Ведущая организация: ФГБНУ «Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной физики Россий-
ской академии наук»

Защита диссертации состоится «26» апреля 2019 г., в 10-00, на заседании диссертационного совета Д002.231.02 на базе ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук» (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), расположенном по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН: <http://cplire.ru/rus/dissertations/Shurakov/index.html>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук


Копылов
Юрий Леонидович

Общая характеристика работы

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 отграничения 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 научную значимость.

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 гетеродина могут приводить к заметным осцилляциям рабочей точки смещения детектора по постоянному току. Последнее, в свою очередь, приводит к нестабильности выходного сигнала детектора в силу наличия корреляции между рабочим током смещения и выходной мощностью [1].

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), занимающейся 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) [2]. 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 [3]. На сегодняшний день, было предложено несколько способов устранения негативного вклада флуктуаций мощности гетеродина в системную стабильность приемника [4–6]. Существующие методы и технические решения позволяют получить максимальное значение инте-

грального 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.

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 терагерцовой гетеродинной приемной системы и терагерцового 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 оригинальные научно-технические решения.

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.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Различие распределения токов в микромостиках и параллельных струк-

турах 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.

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]. Общий объем опубликованных по теме диссертации работ составил 7 печ.л.

Личный вклад автора. Работы, опубликованные в ходе выполнения диссертационного исследования, были выполнены в соавторстве с членами научных групп Учебно-Научного Радиофизического Центра Московского Педагогического Государственного Университета и Лаборатории приемных систем Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики. 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.

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.

Содержание работы

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

Во второй главе представлены результаты изучения вклада неустойчивостей узлов гетеродинного НЕВ-приемника в системную стабильность. Пред-

ложены 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 [А1, А2, А4, А7, А8, А9].

В первом разделе главы описана технология изготовления экспериментальных образцов. Используемые в работе НЕВ-устройства были изготовлены из пленки нитрида ниобия толщиной 3-4 нм, осаждаемой на подложку из высокоомного кремния (квазиоптические НЕВ-устройства) или кристаллического кварца (волноводные НЕВ-устройства).

Во втором разделе главы описаны методики измерения основных технических характеристик НЕВ-смесителя. При измерении шумовой температуры и коэффициента преобразования НЕВ-смесителя используется метод Y-фактора. 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. Кривые дисперсии Аллана измеряются для тока смещения и выходной мощности НЕВ-смесителя. Продолжительность одного измерения составляет около 250 с. Выбранная конфигурация экспериментальной установки и порядок проведения измерений позволяют производить надежный расчет дисперсии Аллана в диапазоне времен интегрирования 0,01–25 с.

В третьем разделе главы описана методика реализации отрицательной обратной связи по току смещения НЕВ-смесителя. При измерении корреляции тока смещения и выходной мощности НЕВ-смесителя последний 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})

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

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

Для повышения временной стабильности выходной мощности НЕВ-смесителя используется экспериментальная установка, аналогичная представленной на рисунке 1. 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 соединенный 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.

В четвертом разделе главы проанализирован вклад структурных узлов гетеродинного НЕВ-приемника в системную стабильность. Зависимость выходной мощности гетеродинного НЕВ-приемника на ПЧ от времени, типичная для использованных в эксперименте образцов, показана на рисунке 2, на рисунке также представлена соответствующая ей кривая дисперсии Аллана.

Флуктуации выходной мощности гетеродинного НЕВ-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}).

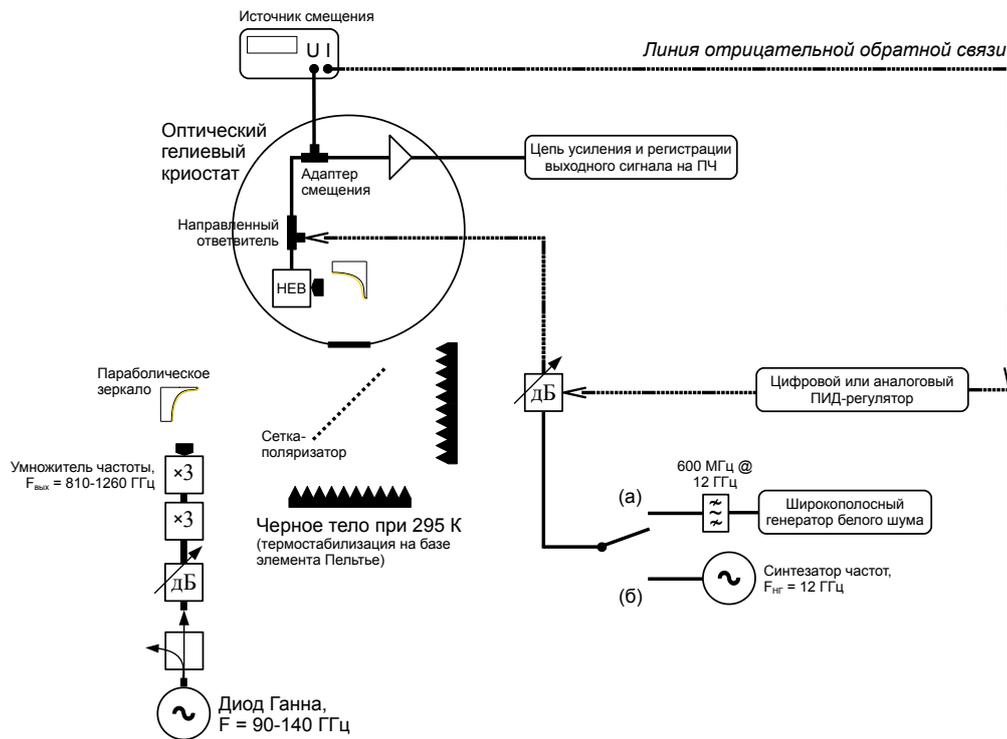


Рис. 1. Экспериментальная установка для реализации отрицательной обратной связи по току смещения НЕВ-смесителя.

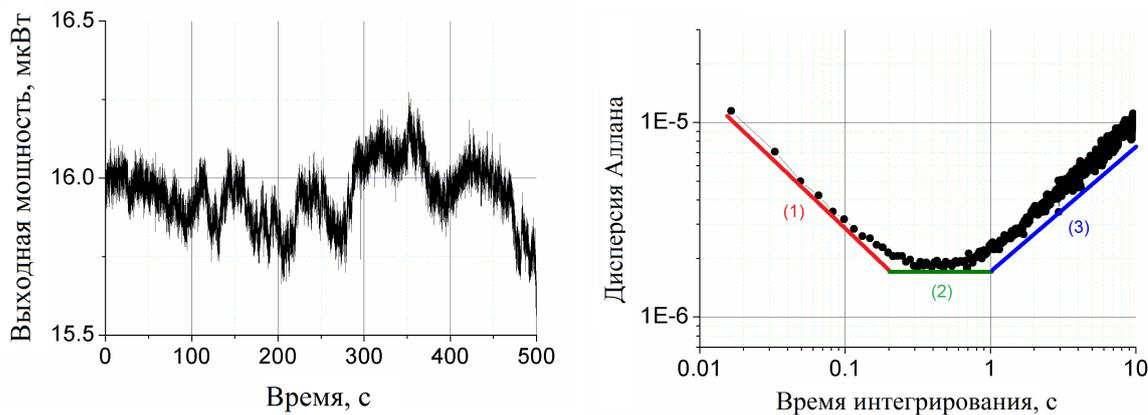


Рис. 2. Слева: Зависимость выходной мощности НЕВ-приемника (образец 1300/1/1-7) на ПЧ от времени. Справа: График дисперсии Аллана для выходной мощности НЕВ-приемника (образец 1300/1/1-7) на ПЧ: (1) – компонента, соответствующая белому шуму, (2) – компонента, соответствующая $1/f$ -шуму, (3) – компонента,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

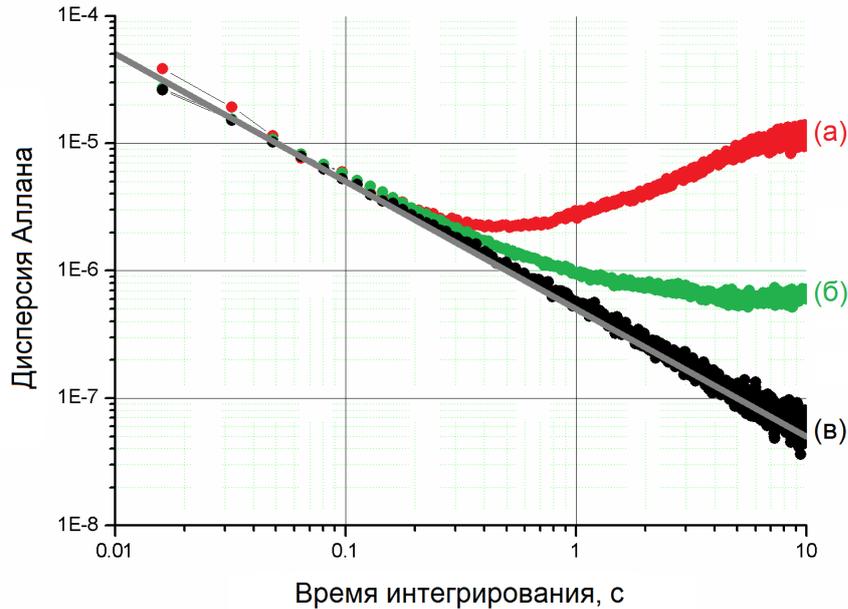


Рис. 3. Нормированный график дисперсии Аллана для выходной мощности НЕВ-приемника (образец 1300/1/1-7) на ПЧ при использовании цепи обратной связи (б) и без нее (а). Также на рисунке представлена кривая дисперсии Аллана для цепи усиления сигнала ПЧ (в), совпадающая с уравнением радиометра при временах интегрирования 20 мс – 10 с.

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

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

Для количественной оценки вклада каждого источника нестабильности в системную стабильность был создан гетеродинный приемник на базе НЕВ-смесителя с размером чувствительного элемента $0,15 \times 1,5$ мкм². Результаты измерения системной дисперсии Аллана для выходной мощности гетеродинного НЕВ-приемника представлены на рисунке 3. 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 $\sim 15,6$ мкВт и времени интегрирования 1 с при выключенной системе автоподстройки $\Delta P_{tot} = 27$ нВт, а при включенной – 16 нВт. Экспериментальные значения ΔP_{bias} и ΔP_{lo} составили 12 пВт и 20 нВт соответственно. Измеренное значение дрейфа температуры чернотельной нагрузки при времени интегрирования 1 с $\Delta T_{amb} = 1,8$ мК позволяет пренебречь вкладом слагаемого ΔP_{load} в нестабильность выходной мощности НЕВ-приемника.

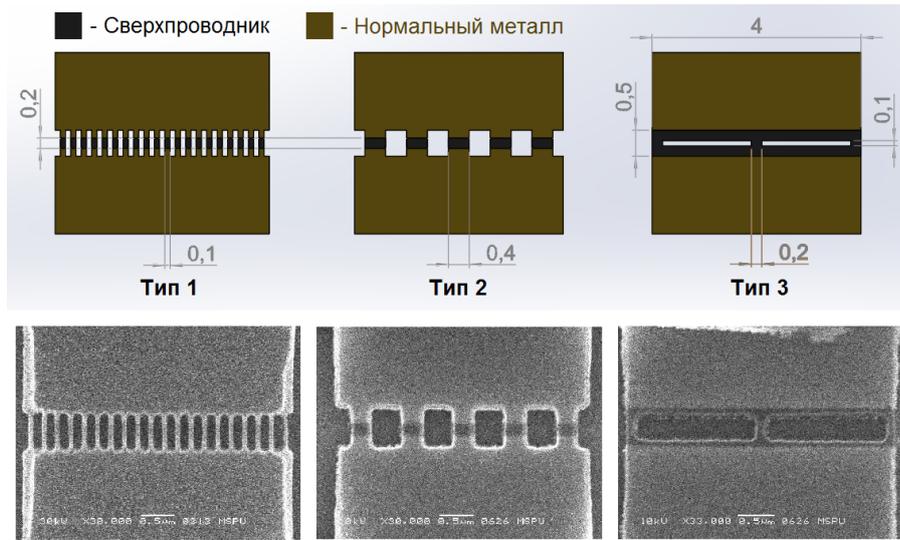


Рис. 4. Эскизы (сверху) и снимки с электронного микроскопа (снизу) топологий НЕВ-образцов, используемых в рамках эксперимента. Все размеры приведены в микронах.

Принимая во внимание описанные выше результаты измерений вклада структурных узлов НЕВ-приемника в системную стабильность и уравнение 2, 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. При этом полученное в результате экспериментальной оценки корреляции тока смещения и выходной мощности смесителя на ПЧ значение коэффициента корреляции Пирсона составило ~ 94 % при временном окне 1 с и 200000 элементах в каждой выборке.

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 4), измерены их чувствительность и временная стабильность. В таблице 1 приведены основные геометрические параметры образцов, а также представлены результаты измерений их шумовой температуры и кривой дисперсии Аллана.

Рабочая температура НЕВ-смесителя не должна превышать половины критической температуры его перехода в сверхпроводящее состояние [7], 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 становятся наиболее оп-

№ 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 1. 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.

тимальным выбором в случае полевых измерений в удаленных локациях в силу сложности и дороговизны поставки расходных материалов.

Мы выбрали охладитель на пульсирующих трубках (*англ.* pulse-tube cryocooler) с разнесенным от криостата мотором [8] и 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. 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. 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 –

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. Параметры лабораторного макета гетеродинной приемной системы на базе НЕВ-смесителя в охладителе на пульсирующих трубках. Здесь T_c – критическая температура НЕВ-устройства, I_c – критический ток НЕВ-устройства, F_{bw} – диапазон входных рабочих частот приемной системы и T_{heb} – шумовая температура НЕВ-смесителя.

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. Результаты измерений технических характеристик приемной системы и НЕВ-смесителя приведены в таблице 2.

В третьей 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 [А3, А5, А6, А10].

В первом разделе главы представлена методика регистрации выходного сигнала прямого НЕВ-детектора при помощи СВЧ рефлектометра. Подвод СВЧ излучения к образцу осуществляется через четырехпортовое устройство (рисунок 5), представленное широкополосным направленным ответвителем с переходным ослаблением 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 детек-

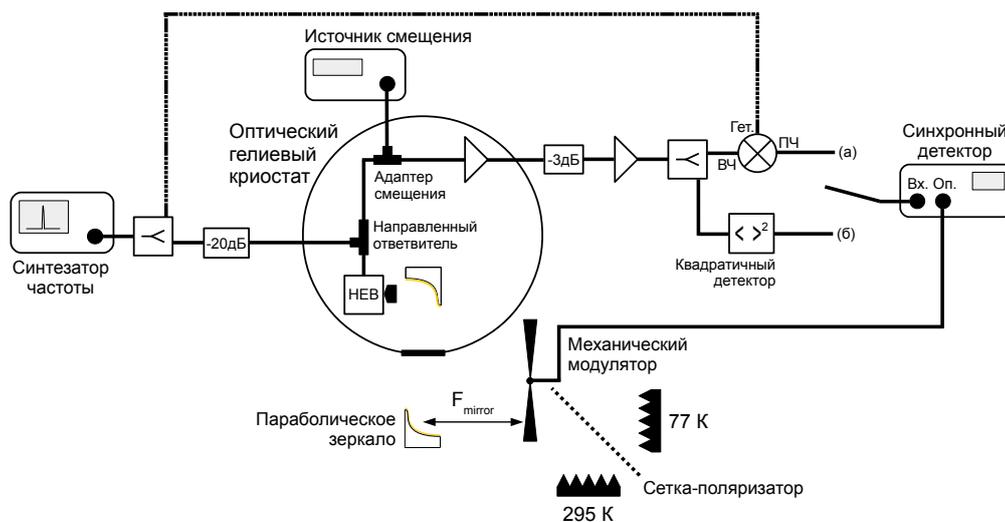


Рис. 5. Экспериментальная установка для регистрации выходного сигнала прямого НЕВ-детектора при помощи СВЧ рефлектометра.

тора с комнатным фоном, обладающим температурой 295 К, на вход ответвителя 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 ДС-усилителем. В связи с тем что экспериментальная установка изначально предназначена для реализации гетеродинного детектирования, ДС-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.

При измерении эквивалентной мощности шума (ЭМШ) 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 чернотельных нагрузок и модулятора и без него. В последнем случае на оптический вход болометра между окном криостата и лопастью модулятора устанавливается чернотельная 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

$$NEP_o = \frac{\Delta P_{bb}}{SNR\sqrt{B_{res}}}, \quad (3)$$

где ΔP_{bb} – изменение подаваемой на оптический вход болометра мощности при смене нагрузок, спектр излучения которых ограничивается полосой пропускания криогенного сеточного резонансного фильтра.

При измерении импеданса и эффективности электронного разогрева ВЧ разъем держателя, 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 малощумящую 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 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

$$\Gamma_i = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma'_i}{1 - S_{22}\Gamma'_i} \quad (4)$$

В выражении 4 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} , 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 болометра. Эффективность электронного разогрева переменным током (C_{rf}) по определению есть отношение изменений импеданса НЕВ-устройства и мощности терагерцового сигнала. Значение C_{rf} рассчитывается на основе двух последовательных измерений импеданса болометра при наличии черного тела комнатной температуры и температуры жидкого азота на его оптическом входе.

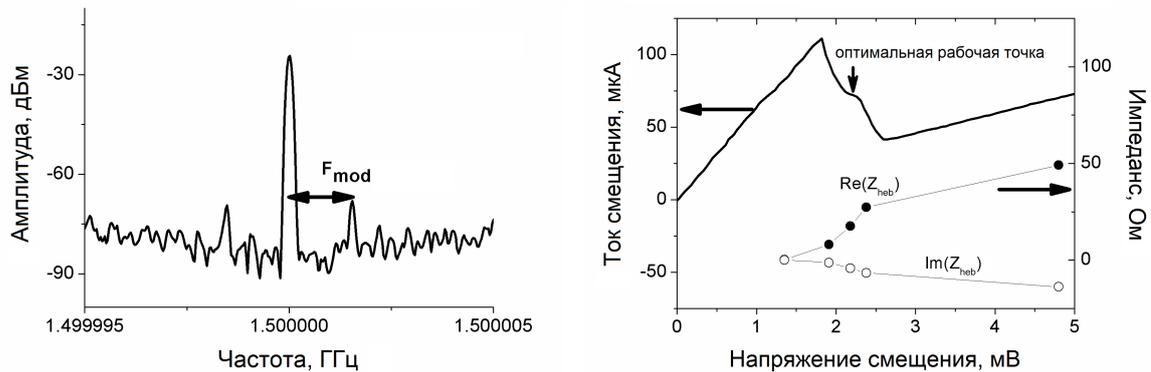


Рис. 6. Слева: Спектр выходного сигнала прямого НЕВ-детектора. Справа: ВАХ НЕВ-устройства под действием СВЧ излучения с частотой 1,5 ГГц и мощностью 1,5 мкВт (сплошная линия). Действительная и мнимая части импеданса НЕВ-устройства на частоте СВЧ излучения в зависимости от напряжения смещения (закрашенные и незакрашенные кружки соответственно).

Во втором разделе главы рассмотрены технические характеристики НЕВ-приемника прямого детектирования со схемой регистрации отклика на базе СВЧ рефлектометра. Рисунок 6 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 чернотельных 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 результате этого коэффициент отражения устройства также изменяется, что приводит к модуляции отраженного сигнала на несущей частоте.

На рисунке 6 также 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 выразился в частичном подавлении критического тока: с 250 до 110 мкА. Кроме того, наблюдался небольшой участок выполаживания крутизны ВАХ в ее бистабильной области (локальное увеличение 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: значение оптической ЭМШ составило $3,3 \times 10^{-12}$ Вт/Гц^{0,5} на частоте сигнала 830 ГГц. 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 отношение сигнал/шум (ОСШ) улучшается, что указывает на время Аллана не менее нескольких секунд.

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 килогерц. В целях изучения быстрой модуляции на частотах за пределами возможностей механического модулятора мы протестировали прямой НЕВ-детектор при помощи АМ терагерцового источника излучения непрерывной генерации (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 [9], а частотная зависимость выходного импеданса смесителя имеет точку перегиба в окрестности данного значения ПЧ [9, 10].

При гомодинной демодуляции выходного сигнала прямого НЕВ-детектора выход LNA подключался к ВЧ входу комнатного СВЧ смесителя (рисунок 5, 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.

В метастабильной области ВАХ, в которую смещалось НЕВ-устройство при помощи зондирующего СВЧ сигнала и напряжения смещения по постоянному току, в выходном спектре болометра присутствовали релаксационные колебания (рисунок 7). Полученная по итогам измерений и представленная на рисунке 7 температурная зависимость частоты колебаний при фиксирован-

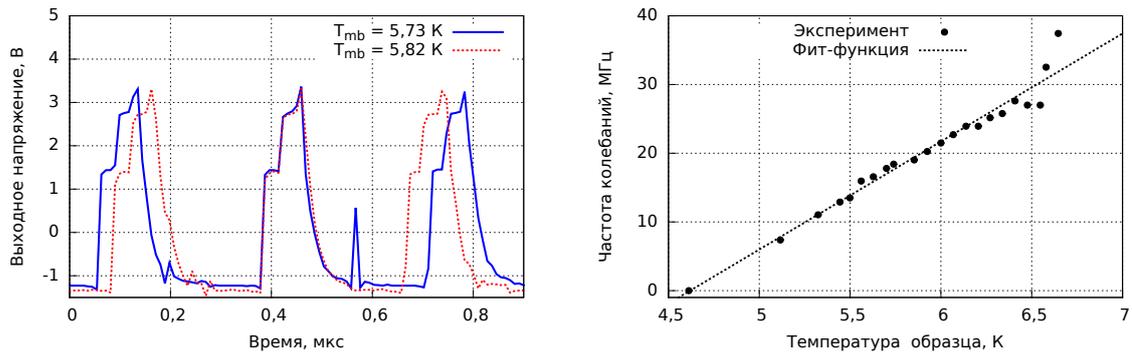


Рис. 7. Слева: Выходной сигнал прямого НЕВ-детектора, зарегистрированный быстрым цифровым осциллографом. Справа: Зависимость частоты релаксационных колебаний НЕВ-устройства, возникающих при работе в метастабильной области ВАХ, от его физической температуры.

ной мощности СВЧ излучения подчиняется линейному закону в интервале температур болометра 4,6–6,4 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 $0,004 \times 0,5 \times 5 \text{ мкм}^3$.

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. Стабильность выходного сигнала прямого НЕВ-детектора под действием зондирующего СВЧ сигнала подтверждается успешным измерением спектра линий N_2O в лабораторных условиях (рисунок 8).

При дальнейшем увеличении мощности зондирующего СВЧ сигнала критический ток на ветви ВАХ, полученной при развертке напряжения смещения в сторону понижения, исчезал (рисунок 8). 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 рабочей точке с нулевым смещением по постоянному току прямой НЕВ-детектор обладал $NEP_o = 10^{-12} \text{ Вт/Гц}^{0,5}$ на частоте сигнала 830 ГГц при гомодинной демодуляции выходного сигнала. Улучшение чувствительности по сравнению со случаем смещения болометра в метастабильную область ВАХ в

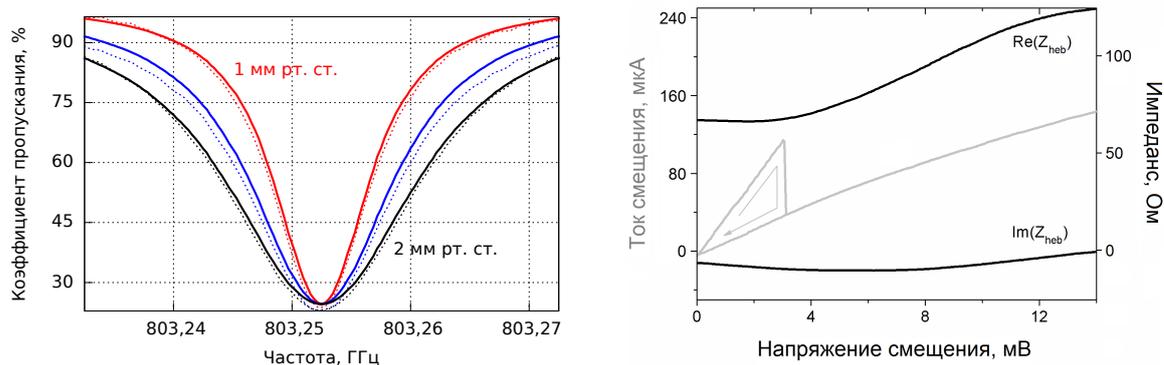


Рис. 8. Слева: Линии N_2O , измеренные при помощи смещенного в гистерезисную область ВАХ прямого НЕВ-детектора (сплошные кривые) и теоретически предсказанные для заданных значений температуры и давления газа в кювете (штриховые линии). Справа: ВАХ (серая кривая) и импеданс (черные кривые) НЕВ-устройства под действием сильного зондирующего СВЧ сигнала.

1,5-2 раза связано с возрастанием вклада реактивного сопротивления в формирование отклика на сигнальное терагерцовое излучение. Измеренные значения C_{rf} составили $310 - 780i$ и $310 - 310i$ Ом/мкВт для случая нулевого смещения и при смещении болометра в метастабильную область ВАХ соответственно.

В заключении представлены основные полученные в ходе диссертационного исследования результаты. 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.

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 прием-

ной 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 спектра линий N₂O.
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.

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. Авторский вклад 70%.
- A2. **Shurakov A.**, Tong C.-Y. E., Blundell R. et al. Microwave stabilization of a НЕВ mixer in a pulse-tube cryocooler // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2013. Vol. 23, no. 3. P. 1501504. Авторский вклад 70%.
- 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. Авторский вклад 30%.
- 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. Авторский вклад 10%.
- 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. Авторский вклад 70%.
- 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. Авторский вклад 70%.
- 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. Авторский вклад 80%.
- A8. **Shurakov A.**, Tong E., Blundell R., Gol'tsman G. Microwave stabilization of HEB mixer by a microchip controller // IEEE MTTTS Int. Microw. Symp. 2012. Pp. 1-3. Авторский вклад 70%.
- A9. **Shurakov A.**, Tong C. E., Blundell R., Gol'tsman G. A Microwave Pumped HEB Direct Detector Using a Homodyne Readout Scheme // 25th International Symposium on Space Terahertz Technology / Higher School of Economics. Moscow, Russia: 2014. – April 27-30. P. 129. Авторский вклад 70%.
- A10. **Shurakov A.**, Maslennikov S., Tong C. E., Gol'tsman G. Performance of an HEB Direct Detector Utilizing a Microwave Reflection Readout Scheme // 26th International Symposium on Space Terahertz Technology / Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Cambridge, MA, USA: 2015. – March 16-18. Pp. P-36. Авторский вклад 80%.

Цитированная литература

1. 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.
2. Blundell R. Invited talk: The Greenland Telescope // Proc. of the 25th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. 2014. Pp. 72–75.

3. Kooi J. W., et al. Stability of heterodyne receivers // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. P. 64904.
4. 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.
5. Chen J., et al. Stability of superconducting Hot Electron Bolometer receivers // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. Vol. 21, no. 3. Pp. 667-670.
6. Hayton D. J., et al. Stabilized Hot Electron Bolometer heterodyne receiver at 2.5 THz // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. P. 081102.
7. Zhang C., Wang Y., Wang D. et al. Suppression of superconductivity in epitaxial MgB2 ultrathin films // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 114. P. 023903.
8. Модель PT403-RM, Cryomech Inc.
9. 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.
10. 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.