

УДК 621.382.2

Сверхпроводниковый интегральный приемник со смесителем на эффекте электронного разогрева

Superconducting integrated receiver based on hot electron bolometer mixer

Кинев Н.В., Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Ожегов Р.В., Горшков К.Н., Гольцман Г.Н., Селезнев В.А.

Kinev N.V., Koshelets V.P., Filippenko L.V., Ozhegov R.V., Gorshkov K.N., Gol'tsman G.N., Seleznev V.A.

Представлены первые результаты исследования супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приемника, где в качестве смесителя использован болометр на эффекте разогрева электронного газа. В англо- и русскоязычной литературе такой болометр называют НЕВ (от англ. *Hot Electron Bolometer*). Сверхпроводниковый генератор гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода был интегрирован на одной микросхеме размером $4 \times 4 \text{ мм}^2$ вместе с НЕВ-смесителем, согласованным со щелевой антенной. Реализован диапазон принимаемых частот 450 - 620 ГГц, лучшая шумовая температура составила порядка 1000 К на частоте 600 ГГц, измерения проводились в полосе промежуточных частот НЕВ-смесителя 0-1 ГГц. Исследован прямой отклик смесителя на частотах до 2 ТГц, который фактически является характеристикой щелевой антенны в составе квазиоптической системы, интегрированной вместе с НЕВ (с учетом согласующих цепей подвода мощности гетеродина).

Ключевые слова: НЕВ-смеситель, интегральный приемник, сверхпроводниковый генератор гетеродина, субтерагерцовые частоты.

First implementation of the heterodyne superconducting integrated receiver based on hot electron bolometer (HEB) mixer is presented. The flux flow oscillator based on long Josephson junction is implemented on one chip (size $4 \times 4 \text{ mm}^2$) together with the HEB-mixer coupled to twin slot antenna. Frequency range of 450-620 GHz has been realized with noise temperature of about 1000 K at 600 GHz for intermediate frequency of HEB-mixer 0-1 GHz. Direct response of the mixer at frequencies up to 2 THz is measured being actually the twin slot antenna characteristics included in quasioptical system integrated with HEB (taking into account the matching circuits for the coupling of the local oscillator).

Keywords: HEB-mixer, integrated receiver, flux flow oscillator, subterahertz frequency range.

I. Введение

В настоящее время очень востребованы приемники терагерцового и субтерагерцового диапазона с высокой чувствительностью. Такие приемники находят всё большее применение не только в радиоастрономических задачах и миссиях по исследованию атмосферы [1-3], но также в медицине и безопасности [4]. До сих пор наиболее чувствительными в области до 1 ТГц являются смесители на основе джозефсоновских туннельных структур «сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник» (СИС) [5-6]. Однако рабочие частоты СИС-структур существенно ограничены «щелевым» напряжением в сверхпроводящих плёнках, образующих туннельный переход. При повышении частоты чувствительность СИС-смесителей существенно падает, и в области терагерцовых частот они резко уступают сверхпроводниковым болометрам на эффекте разогрева электронного газа (НЕВ). Шумовые характеристики НЕВ в достаточно широкой области терагерцового диапазона практически не зависят от частоты. В рабочем диапазоне 1-70 ТГц с ростом частоты шумовая температура приемников на основе НЕВ приближается к квантовому пределу $hf/2k$, т.е. определяется больше фундаментальными квантовыми шумами, чем шумовыми свойствами смесителя [7].

Разработка и исследование приемников на основе НЕВ ведутся в мире широким фронтом [1, 8-12], однако все эти приемники имеют в качестве гетеродина внешний источник. Таким внешним источником обычно является газовый лазер дальнего ИК-диапазона, лампа обратной волны либо диод Ганна, для повышения частоты используются твердотельные умножители. В данной работе впервые для накачки НЕВ использован генератор гетеродина на основе распределённого джозефсоновского перехода [13-14]. В англоязычной литературе такой гетеродин называют *flux flow oscillator (FFO)*, дословно означающий «генератор на вязком течении вихрей». В данной работе используется аббревиатура СГГ – сверхпроводниковый генератор гетеродина.

Концепция совмещения на одной микросхеме сверхпроводникового генератора гетеродина и смесителя на основе СИС-перехода была предложена учёными Института им. В.А. Котельникова РАН более 10 лет назад [15-17]. На данный момент интегральный СИС-приемник доведён до уровня реализации в миссиях по исследованию атмосферы Земли и уже совершил три успешных запуска на борту высотного аэростата (проект TELIS [3]). В результате полётов было собрано большое количество научной информации, зарегистрированы спектры газовых составляющих атмосферы в диапазоне высот 12 – 36 км.

В данной работе в качестве приемного элемента интегрального приемника использован болометр на эффекте разогрева электронного газа и проведены его лабораторные исследования. Во второй части описана конструкция интегрального приемника, обсуждены топология и особенности некоторых элементов схемы. Характеристики квазиоптической системы приемника, исследованные методом измерения прямого отклика при помощи Фурье-спектрометра, представлены в третьей части. Наконец, вольт-амперные характеристики и чувствительность приемника обсуждаются в четвертой части. В пятой части приведены выводы, а также описаны направления дальнейшей оптимизации приемника.

II. Конструкция интегрального приемника

Сверхпроводниковый интегральный приемник объединяет на одной микросхеме размером $4 \times 4 \text{ мм}^2$, смеситель на основе НЕВ с квазиоптической двойной щелевой антенной, сверхпроводниковый генератор гетеродина на потоке джозефсоновских вихрей, а также гармонический СИС-смеситель, использующийся в петле обратной связи гетеродина для частотной и фазовой стабилизации. Фотография центральной части микросхемы представлена на рис. 1.

НЕВ изготовлен из пленки нитрида ниобия, полученной методом реактивного магнетронного осаждения NbN на подложку из высокоомного кремния в атмосфере Ar, толщина пленки составляет 3-4 нм. Болометр имеет размеры $1 \times 0.1 \text{ мкм}$ и интегрирован с двойной щелевой планарной антенной и высокочастотным фильтром, предотвращающим утечку принимаемого сигнала в канал гетеродина и тракт промежуточных частот. Малые контакты болометра к антенне изготовлены методом взрывной электронной литографии. Антенна и фильтр были получены методом электронной литографии. Этим же методом формировалась защитная маска SiO, предотвращающая повреждение болометра при последующих процессах изготовления микросхемы [18-19].

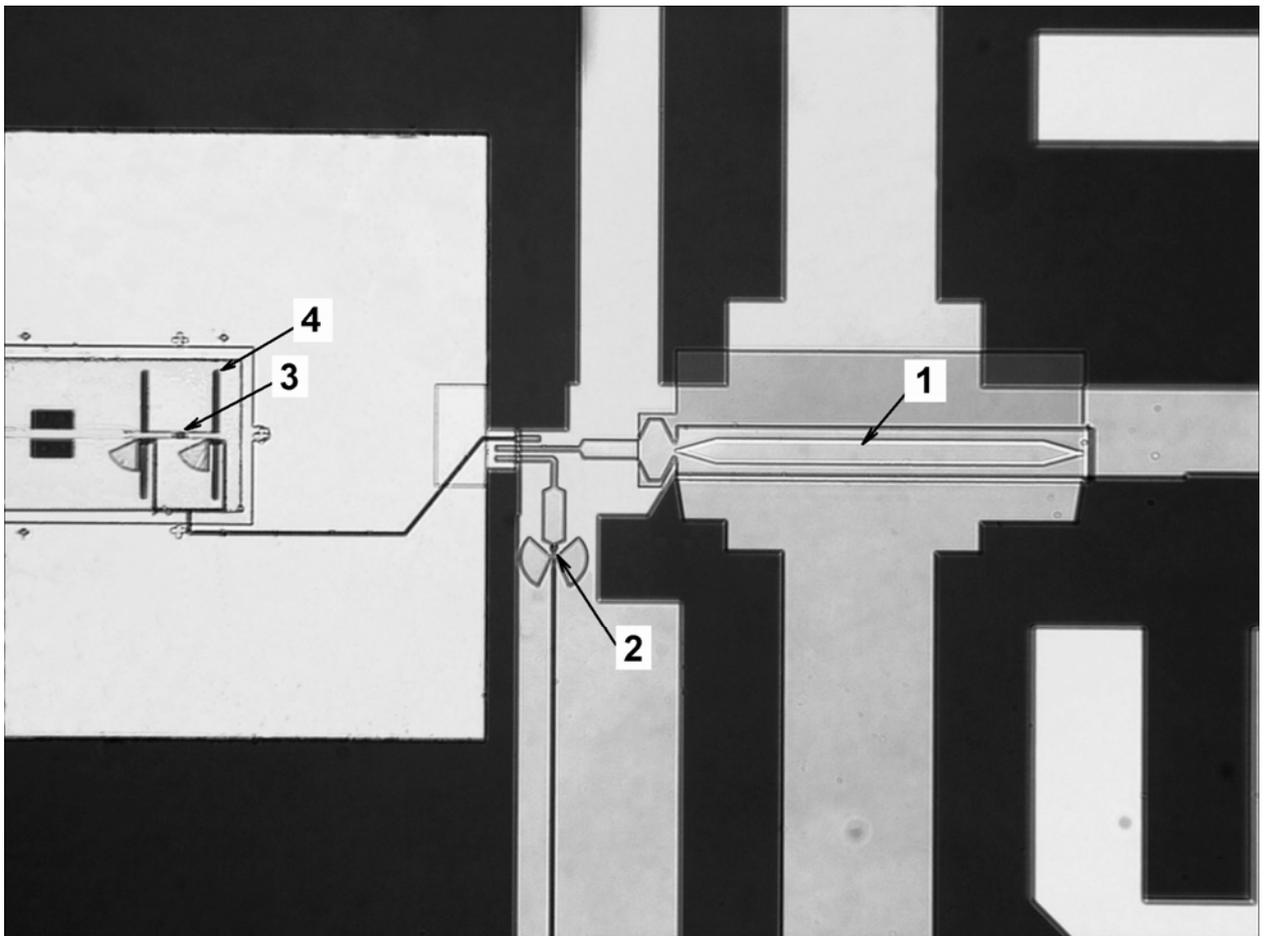


Рис.1. Фотография центральной части микросхемы с основными её элементами. 1 – сверхпроводниковый генератор гетеродина, 2 – гармонический СИС-смеситель для стабилизации гетеродина, 3 – НЕВ-смеситель, 4 – двойная щелевая антенна.

Принцип работы сверхпроводящего болометра на эффекте электронного разогрева основан на изменении температуры электронной подсистемы пленки NbN, находящейся в резистивном состоянии. Терагерцовое излучение непосредственно не может вызвать модуляцию температуры электронной подсистемы вследствие большого времени релаксации электронной подсистемы, однако при воздействии излучениями с близкими частотами возникают биения, модулирующие электронную температуру и, как следствие, импеданс болометра на разностной частоте [20]. Таким образом осуществляется инерционное нелинейное преобразование частоты.

СГГ представляет собой длинный джозефсоновский переход размерами 24 x 400 мкм, в котором создается однонаправленный поток квантов магнитного потока (флаксонов) [21-22]. Плотность и скорость потока могут независимо управляться соответственно приложенным к переходу магнитным полем и током смещения через переход. Именно

таким образом происходит настройка частоты и мощности излучаемого сигнала. Для стабилизации частоты гетеродина, а также синхронизации его мощности была разработана широкополосная система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ)[23-24]. Для работы системы ФАПЧ в петле обратной связи гетеродина используется СИС-переход размером порядка 1 мкм^2 , смешивающий сигнал СГГ с n-й гармоникой опорного синтезатора с регулируемой частотой порядка 20 ГГц [25]. Поэтому СИС-смеситель для стабилизации гетеродина называется гармоническим смесителем (ГС). Генератор гетеродина соединяется с НЕВ и ГС с помощью микрополосковой линии, содержащей согласующие структуры и развязки по постоянному току. Для ГС накачкой служит сигнал синтезатора, а мощность, приходящая от СГГ, является полезным сигналом. Поэтому уровень мощности СГГ, необходимой для работы ГС, с достаточно высоким отношением сигнал/шум не превышает 5-10% от «щелевого» скачка тока СИС-смесителя [24]. Значительное превышение этого уровня на некоторых частотах не является проблемой, поскольку ГС работает в сильно нелинейном режиме и информация содержится в частоте и фазе (а не в амплитуде) преобразованного сигнала. Как СГГ, так и ГС изготавливаются из высококачественных трёхслойных структур Nb/AlN/NbN [26]. Следует отметить, что СГГ крайне чувствителен к внешнему магнитному полю, поэтому смесительный блок с микросхемой СИП помещается внутрь экрана, состоящего из двух концентрических цилиндров. Внешний цилиндр изготовлен из криопермаллоя, внутренний – из меди, покрытой слоем гальванически осаждённого свинца толщиной 100 мкм, переходящим в сверхпроводящее состояние.

Принципиальная блок-схема интегрального приемника изображена на рис. 2. Микросхема СИП вместе с платой смещения (являющейся одновременно и смесительной платой) объединяются в смесительный блок. Соединение контактов платы с контактами микросхемы осуществляется при помощи алюминиевых проволок толщиной 25 мкм, устанавливаемых посредством ультразвуковой сварки. Криогенный модуль приемника, состоящий из смесительного блока и экрана, помещается внутрь заливного криостата, который наполняется жидким гелием ($T = 4,2 \text{ К}$). Измеряемый сигнал поступает через оптическое окно криостата на НЕВ, где смешивается с опорным сигналом гетеродина, после чего сигнал на промежуточной частоте (ПЧ) через ряд усилителей подается на окончательный спектрометр (анализатор спектра либо спектрометр на основе быстрого преобразования Фурье). При этом часть усилителей находится в криогенной системе при температуре 4,2 К, а часть – при комнатной. Охлаждаемые усилители в тракте ПЧ как НЕВ-, так и СИС-смесителя, выполнены из транзисторов на основе электронов с высокой

подвижностью (HEMT) и усиливают сигнал в диапазоне 0 – 1 ГГц с коэффициентом ~25 дБ. Их шумовая температура составляет порядка 5 К. Усилители, находящиеся при комнатной температуре, работают в том же частотном диапазоне, их усиление составляет порядка 60 дБ. Между усилителями установлен управляемый аттенюатор. Рабочие параметры большинства элементов СИП: опорного синтезатора, системы ФАПЧ, оконечного спектрометра, а также основных элементов микросхемы – управляются при помощи компьютера.

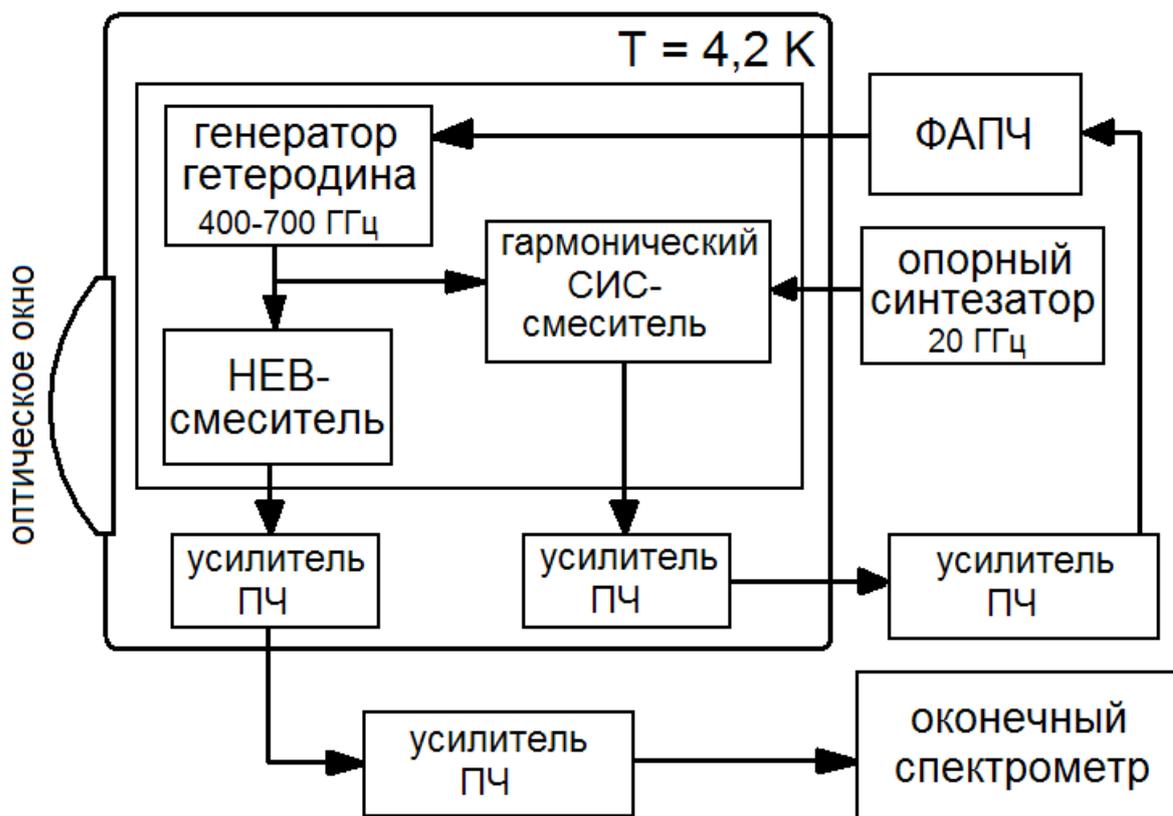


Рис. 2. Блок-схема сверхпроводникового интегрального приемника.

III. Характеристики квазиоптической системы

НЕВ-смеситель согласован с квазиоптической двойной щелевой антенной, рассчитанной на центральную частоту 600 ГГц. Антенна имеет следующие параметры: длина щелей L равняется $0,252 \lambda_0$, ширина $W = 0,016 \lambda_0$, расстояние между щелями $S = 0,136 \lambda_0$, где λ_0 – длина волны в вакууме (500 мкм для частоты 600 ГГц).

Микросхема интегрального приемника размещается на плоской задней поверхности кремниевой линзы, имеющей форму усеченного эллипса. Двойная щелевая антенна располагается на плоской поверхности в сечении дальнего фокуса, диаметр линзы в этом сечении составляет 10 мм. Размеры и форма линзы были оптимизированы для получения минимального размера пучка на расстоянии 100 мм от линзы для частот $550 \div 650$ ГГц, чтобы магнитный экран не обрезал принимаемый луч. При реальных применениях интегрального приемника для минимизации отражения на границе линзы применяются линзы с просветляющим покрытием. В данном лабораторном исследовании использована линза без просветляющего покрытия.

Частотная характеристика приемной антенны исследовалась методом измерения прямого отклика НЕВ при помощи Фурье-спектрометра. Основой данного спектрометра является интерферометр Майкельсона, схема эксперимента показана на рис. 3. Установка спроектирована и установлена на оптической скамье: при помощи источника (глобар) двух зеркал и полупрозрачной пластины (ПП), являющейся разделителем луча, в плоскости антенны создаётся интерференционная картина. Результат интерференции двух лучей в плечах интерферометра Майкельсона при помощи обтюлятора и синхронного усилителя регистрируется НЕВ-смесителем, работающим в режиме прямого детектора. В эксперименте была измерена величина сигнала приемника в зависимости от положения подвижного зеркала. Методом обратного преобразования Фурье полученной зависимости мощности, зарегистрированной НЕВ-смесителем и измеренной синхронным усилителем, от положения подвижного зеркала, строится частотная зависимость отклика системы «антенна + НЕВ». При этом частотное разрешение зависит от величины максимального смещения подвижного зеркала от его центрального положения (когда расстояния от зеркал до ПП одинаковы), а ширина исследуемого частотного диапазона зависит от мелкости шага подвижного зеркала. Проведённое исследование позволило получить характеристику отклика на частотах до 2 ТГц. Полученная частотная зависимость представлена на рис. 4 и фактически является характеристикой антенны (с учетом элементов подключения НЕВ к СГГ и тракту ПЧ), поскольку чувствительность самого НЕВ в широком диапазоне практически не зависит от частоты.

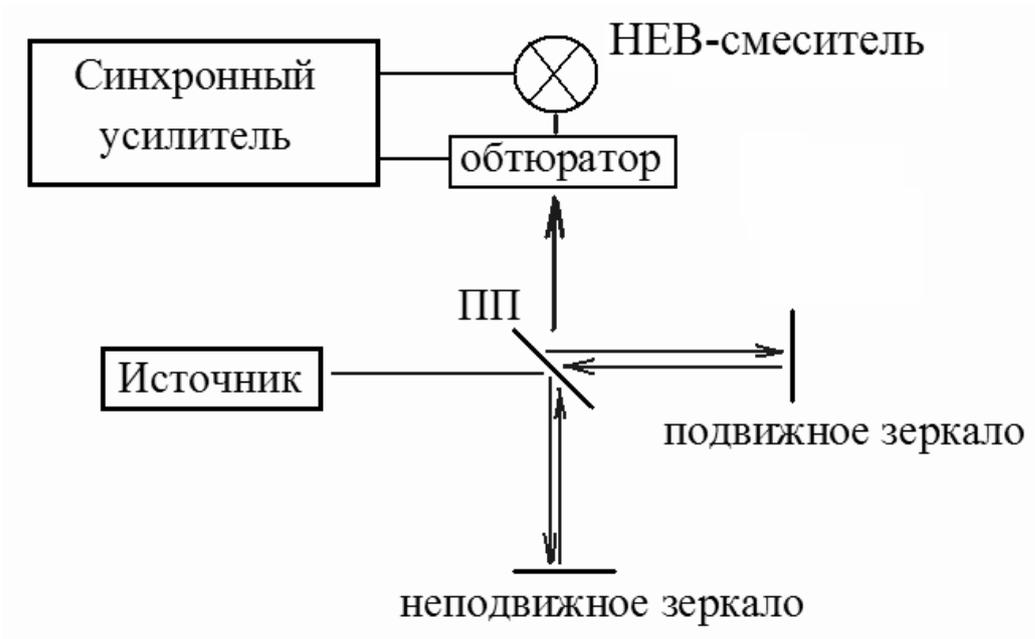


Рис. 3. Схема лабораторного Фурье-спектрометра для исследования частотной зависимости прямого отклика НЕВ-смесителя.

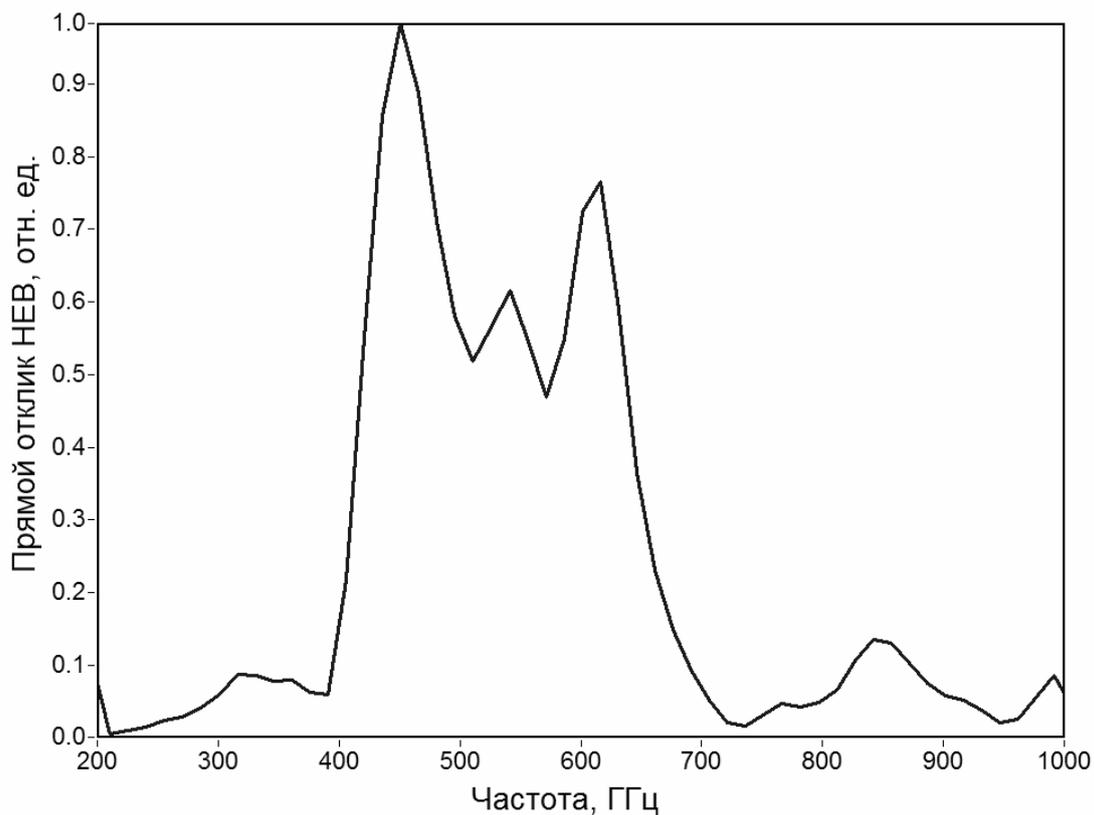


Рис. 4. Прямой отклик НЕВ в составе квазиоптической системы интегрального приемника, рассчитанной на центральную частоту 600 ГГц. Величина отклика нормирована на свою максимальную величину.

IV. Комплексное исследование характеристик приемника

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) НЕВ приведены на рис. 5а. На графике показана «автономная» ВАХ – в отсутствие мощности гетеродина, а также серия ВАХ с накачкой мощностью, поступающей от СГГ через согласующие структуры, на условно выбранной частоте 500 ГГц. Семейство «накачанных» ВАХ демонстрирует возможность настройки уровня накачки НЕВ в широком диапазоне: от близкой к «автономной» (минимальная накачка) до практически линейной характеристики (максимальная накачка). Как «автономная», так и «накачанные» ВАХ имеют характерные участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением ($R_d < 0$) и резкий скачок на ветвь с положительным R_d . Попытки объяснить такое поведение ВАХ приведены, например, в работе [XX8]. Известно, что функционирование НЕВ возможно лишь на положительной ветви, поскольку в области $R_d < 0$ сигнал ПЧ нестабилен. Кроме того, наилучшая чувствительность достигается вблизи «точки скачка» на ветвь, где $R_d > 0$. При этом напряжение «точки скачка» уменьшается с ростом мощности накачки. Наклонной рамкой 3 на рис 5а выделена оптимальная рабочая область НЕВ-смесителя.

На рис. 5б показано семейство ВАХ СГГ при различных значениях внешнего магнитного поля. Измерения проводились при рабочем напряжении на НЕВ 1 мВ, шкалой яркости обозначен уровень тока НЕВ-смесителя. Область наиболее тёмных кривых ВАХ, выделенная рамкой, – есть область эффективной накачки НЕВ-смесителя и составляет от 350 до 620 ГГц по частоте. Данный образец СГГ имеет ток возврата порядка 5 мА, а ток через переход при напряжении 1 мВ составляет величину порядка 8 мА при рабочих значениях тока через линию управления магнитным полем. Этот ток обусловлен особенностью на разностной щели туннельного перехода Nb/AlN/NbN. Такая особенность, тем не менее, не оказывает принципиального влияния на возможность функционирования интегрального приемника в целом.

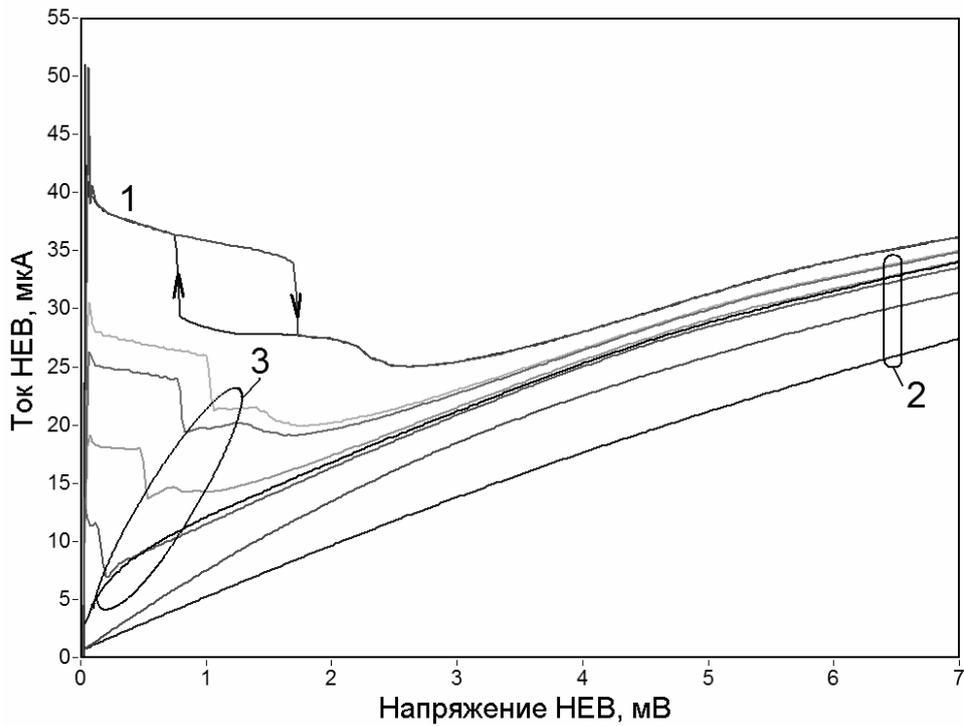


Рис. 5а. Семейство вольт-амперных характеристик НЕВ-смесителя. 1 – «автономная» ВАХ, имеющая гистерезис (направление обозначено стрелками); 2 – серия ВАХ с накачкой мощностью СГГ на частоте 500 ГГц; 3 – оптимальная по чувствительности рабочая область

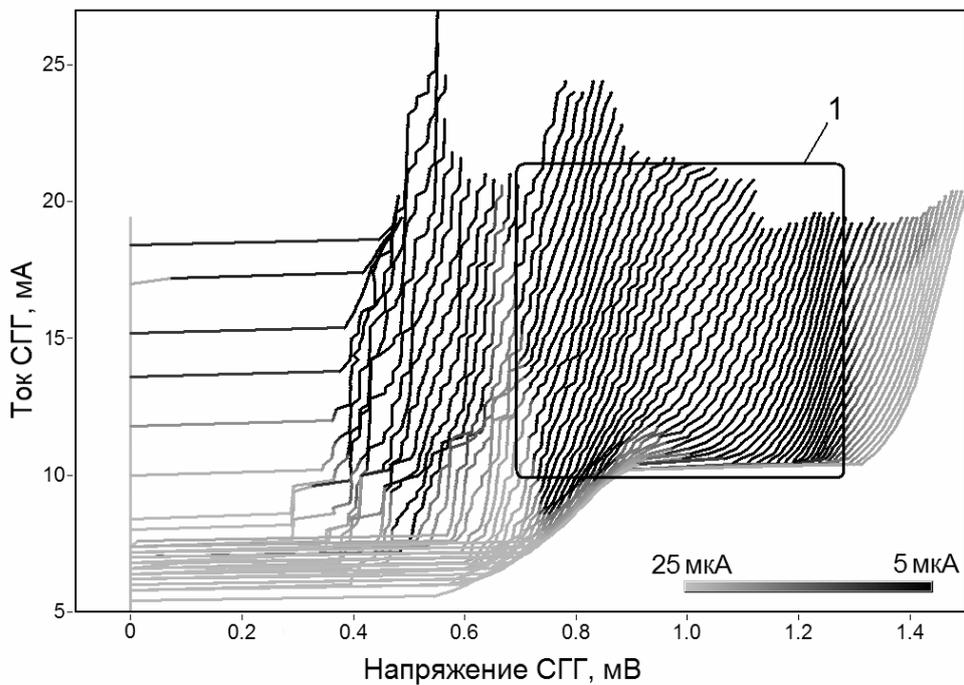


Рис. 5б. Семейство вольт-амперных характеристик сверхпроводникового генератора гетеродина, измеренных при различных внешних магнитных полях. Рамкой 1 выделена область эффективной накачки НЕВ-смесителя.

Исследование шумовой температуры приемника производилось при помощи стандартной методики измерения величины Y -factor – отношения мощности сигнала ПЧ на выходе НЕВ-смесителя, измеренного в режиме переключения «горячей» ($T = 295$ К) и «холодной» ($T = 80$ К) нагрузок. Для определения оптимальной по чувствительности рабочей точки на ВАХ НЕВ были измерены зависимости мощности сигнала ПЧ от напряжения. Форма такой зависимости сильно зависит не только от частоты гетеродина, но также и тока смещения, при котором происходит накачка НЕВ. На рис. 6а показана зависимость мощности сигнала ПЧ НЕВ-смесителя от напряжения при подаче различных нагрузок. Изображены пары кривых 1-3, измеренные при одинаковой частоте 600 ГГц, но различном уровне накачки НЕВ, регулируемом током смещения СГГ. Пара кривых 1 измерена при низком уровне накачки (форма ВАХ НЕВ близка к автономной, см. рис. 5а), пара 2 получена при среднем уровне накачки (критический ток НЕВ составляет порядка $\frac{1}{2}$ от значения без подачи мощности гетеродина), наконец, пара кривых 3 измерена при перекачке мощностью гетеродина (критический ток подавлен, форма ВАХ близка к линейной). Две кривые каждой пары 1-3 получены при подаче на НЕВ-смеситель «холодной» (нижняя кривая в паре) и «горячей» (верхняя кривая) нагрузок. Отношения сигналов (Y -factor) на частоте 600 ГГц изображены на рис. 6б кривыми 1-3 соответственно для каждой пары кривых 1-3 из рис. 6а. Таким образом, оптимальная рабочая точка по напряжению НЕВ сильно зависит от параметров гетеродина и составляет порядка 1,2 мВ для кривой 1, 0,4 мВ для кривой 2, и примерно 1 мВ для кривой 3. Следует отметить, что кривая 1 имеет два максимума, первый из которых находится при напряжении порядка 0,25 мВ и демонстрирует лучшую чувствительность приемника. Это происходит по причине более высокой нелинейности ВАХ НЕВ при низких напряжениях и слабых уровнях накачки, однако, в этой области намного хуже стабильность сигнала ПЧ [8]. Помимо высокой нестабильности сигнала в первом максимуме, он является более узким по напряжению, поэтому оптимальной рабочей точкой для кривой 1 является напряжение второго максимума.

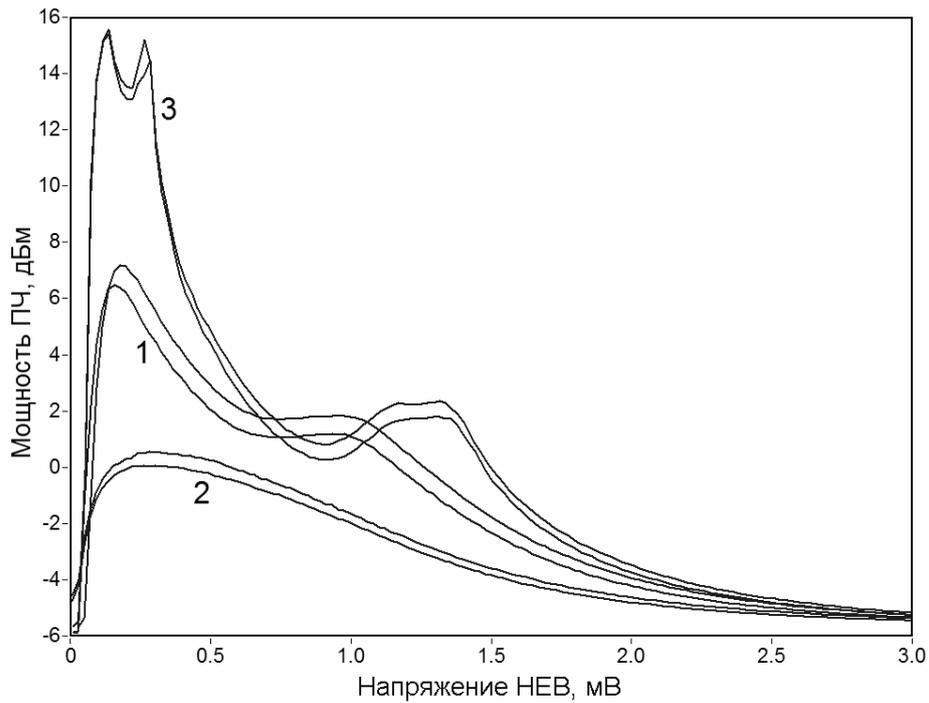


Рис. 6а. Мощность сигнала ПЧ НЕБ-смесителя в зависимости от напряжения, измеренная при частоте гетеродина 600 ГГц (напряжение 1,25 мВ) и различных токах смещения СГГ: 1 – 13,5 мА; 2 – 14,4 мА; 3 – 15,5 мА.

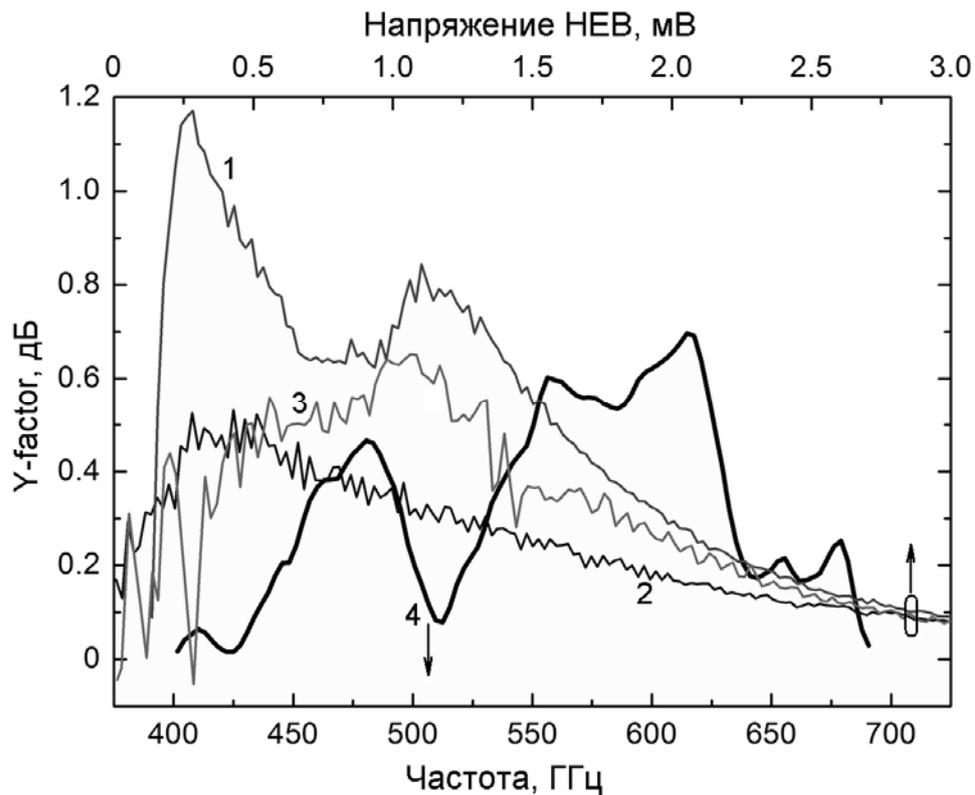


Рис. 6б. Отношения уровней ПЧ в режиме «горячей» и «холодной» нагрузок: кривые 1-3 – в зависимости от напряжения НЕВ-смесителя (частота 600 ГГц, пары кривых 1-3 из рис.6а); кривая 4 – в зависимости от частоты в рабочей точке 1 мВ.

Измерение величины Y-factor было проведено во всей рабочей частотной полосе приемника и широком диапазоне по току смещения СГГ, отвечающему за уровень накачки смесителя, в рабочей точке по напряжению НЕВ в 1 мВ. Значения наилучшей чувствительности для каждой частоты СГГ при напряжении НЕВ-смесителя 1 мВ обозначены кривой 4 на рис. 6б. Видно, что существуют более оптимальные точки по чувствительности при напряжениях НЕВ, отличных от 1 мВ (сравн. кривую 1 и кривую 4 по оси значений Y-factor), поэтому для оптимизации рабочей точки по шумовой температуре требуется проводить дополнительный цикл измерений в зависимости от напряжения смещения НЕВ-смесителя.

Зависимость шумовой температуры приёмника от частоты при напряжении НЕВ 1 мВ представлена на рис. 7 кривой 1 (пересчитанная кривая 4 из рис. 6б). На графике также обозначены некоторые более низкие значения шумовой температуры по сравнению с кривой 1, измеренные на отдельно выбранных частотах: точке 2-6 измерены при оптимальном напряжении НЕВ для каждой выбранной частоты.

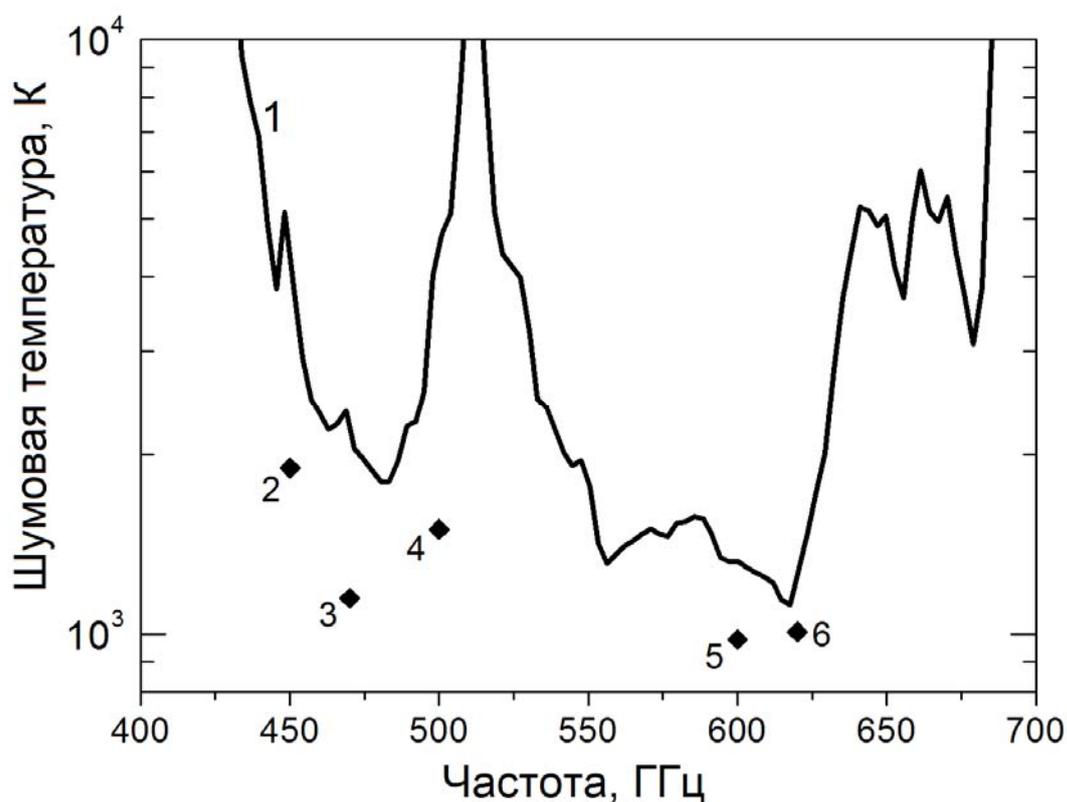


Рис.7. Шумовая температура приёмника, измеренная при фиксированном напряжении НЕВ-смесителя 1 мВ во всей рабочей области приемника (кривая 1). Отдельно измеренные точки: 2 – 1900 К при частоте 450 ГГц; 3 – 1150 К при 470 К, 4 – 1500 К при 500 ГГц, 5 – 980 К при 600 ГГц, 6 – 1010 К при 620 ГГц.

V. Заключение

В данной работе впервые представлены результаты исследования сверхпроводникового интегрального приемника со смесителем на эффекте электронного разогрева. Проведен широкий круг измерений параметров и характеристик приемника, включающий в себя частотную характеристику приемной антенны, вольт-амперные характеристики болометра на эффекте электронного разогрева, а также сверхпроводникового генератора гетеродина, характеристики приемника на промежуточной частоте, шумовая температура устройства. Исследована оптимальная по чувствительности рабочая область на вольт-амперной характеристике НЕВ. Показано, что положение наилучшей рабочей точки по напряжению НЕВ зависит не только от частоты, но и от уровня накачки, который регулируется величиной тока смещения через гетеродин. Реализован рабочий частотный диапазон 450-620 ГГц, наилучшая шумовая температура составила 980 К.

Безусловным преимуществом интегрального приемника перед аналогами с внешним гетеродином является не только компактность прибора, но также возможность работы в широком частотном диапазоне и простая перестройка рабочей частоты. Однако, в реализованной частотной полосе (до 700 ГГц) интегральный приемник на основе НЕВ-смесителя существенно уступает по чувствительности аналогу, где в качестве смесителя используется СИС-переход. Для повышения рабочих частот интегрального приемника на основе НЕВ и перехода в ту область, где НЕВ-смеситель будет превосходить по чувствительности СИС-смеситель, требуется разработка и интеграция более высокочастотного сверхпроводникового генератора гетеродина на основе NbTiN. Работы в данном направлении уже проводятся авторами статьи.

Работа поддержана грантами РФФИ (проекты 12-02-00882-а, 11-02-12195-офи_м, 11-02-12195-офи_м), Министерством образования и науки, грантом Президента России для ведущих научных школ НШ-2456.2012.2 и гос. контрактом № 02.740.11.0795.

Список литературы.

[1] J.W. Kooi. Advanced Receivers for Submillimeter and Far Infrared Astronomy. PhD thesis. The Netherlands, Enschede: PrintPartners Ipskamp B.V. 2008. 340 p.

- [2] В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, Л.В. Филиппенко, О.В. Корюкин, М.Ю. Торгашин, А.В. Худченко. // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2005. Т. XLVIII. № 10–11. С. 947-954.
- [3] Gert de Lange, Dick Boersma, Johannes Dercksen, Pavel Dmitriev, Andrey V. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Hans Golstein, Ruud W.M. Hoogeveen, Leo de Jong, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Bart van Kuik, Arno de Lange, Joris van Rantwijk, Alexander S. Sobolev, Mikhail Yu. Torgashin, Ed de Vries, Pavel A. Yagoubov, and Valery P. Koshelets. // Supercond. Sci. Technol. 2010. Vol. 23. P. 045016.
- [4] В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, К.В. Калашников, О.С. Киселев, Н.В. Кинев, Ю.С. Токпанов, М.Ю. Торгашин, Л.В. Филиппенко, А.В. Худченко, В.Л. Вакс, С.И. Приползин. // Труды XV международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». 2011. С. 11-14.
- [5] Шмидт В. В. Введение в физику сверхпроводников. М.: МЦНМО. 2000. 397 с.
- [6] Лихарев К. К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука. 1985. 320 с.
- [7] Maslennikov S. N., Finkel M. I., Antipov S. V. // Proc. 17-th ISSTT. 2006. P. 177-179.
- [8] A. D. Semenov, H.-W. Hubers, J. Schubert, G.N. Gol'tsman, A.I. Elantiev, B.M. Voronov, E.M. Gershenzon. // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. P. 6758.
- [9] M. Hajenius, J. J. Baselmans, A. Baryshev, J. R. Gao, T. M. Klapwijk, J. W. Kooi, W. Jellema, Z. Q. Yang. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100. P. 074507.
- [10] Третьяков И.В., Рябчун С.А., Каурова Н.С., Ларионов П.А., Лобастова А.А., Воронов Б.М., Финкель М.И., Гольцман Г.Н. // ПЖТФ. 2010. Т. 36. № 23. С. 78-84.
- [11] S.A. Ryabchun, I.V. Tretyakov, M.I. Finkel, S.N. Maslennikov, N.S. Kaurova, V.A. Seleznev, B.M. Voronov, G.N. Gol'tsman // Proc. 20th ISSTT. 2009. P. 151-154.
- [12] S.A. Ryabchun, I.V. Tretyakov, I.V. Pentin, N.S. Kaurova, V.A. Seleznev, B.M. Voronov, M.I. Finkel, S.N. Maslennikov, G. N. Gol'tsman // Journal Radiophysics and Quantum Electronics. 2009. Vol.52. № 8. P. 576-582.
- [13] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, W. Luinge, H. Golstein, H. van de Stadt, J.-R. Gao, T. de Graauw. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1997. Vol. 7. P. 2905–2908.
- [14] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.V. Shchukin, L.V. Filippenko, J. Mygind. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1997. Vol. 7. P. 3589–3592.

- [15] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.M. Baryshev, I.L. Lapytskaya, L.V. Filippenko, H. van de Stadt, J. Mess, H. Schaeffer and T. de Graauw T. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1995. Vol. 5. P. 3057.
- [16] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, H. Golstein, T. de Graauw, W. Luinge, H. Schaeffer, H. van de Stadt. // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68. P. 1273–1275.
- [17] V.P. Koshelets, S.V. Shitov. // Supercond. Sci. Technol. 2000. Vol. 13. P. R53-R59.
- [18] I. Tretyakov, S. Ryabchun, M. Finkel, A. Maslennikova, N. Kaurova, A. Lobastova, B. Voronov, G. Gol'tsman // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98 P. 033507.
- [19] S.A. Ryabchun, I.V. Tretyakov, M.I. Finkel, S.N. Maslennikov, N.S. Kaurova, V.A. Seleznev, B.M. Voronov, G.N. Goltsman // Proc. 19th ISSTT. 2008. P. 62–67.
- [20] М. Гершензон, Г.Н. Гольцман, И.Г. Гогидзе, Ю.П. Гусев, А.И. Елантьев, Б.С. Карасик, А.М. Люлькин, А.Д. Семенов. // СФХТ. 1990. Т. 3. Ч. 1. С. 2143–2160.
- [21] T. Nagatsuma, K. Enpuku, F. Iri, K. Yoshida. // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. P. 3302.
- [22] T. Nagatsuma, K. Enpuku, F. Iri, K. Yoshida. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. P. 3384.
- [23] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, V.L. Vaks, J. Mygind, A.B. Baryshev, W. Luinge, N. Whyborn. // Rev. of Sci. Instr. 2000. Vol. 71. № 1. P. 289-293.
- [24] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, V.V. Kurin, A.L. Pankratov, J. Mygind. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2005. Vol. 15. P. 964-967.
- [25] К.В. Калашников, А.В. Худченко, А.М. Барышев, В.П. Кошелец. // Радиотехника и Электроника. 2011. Т. 56. № 6. С. 751–759.
- [26] Mikhail Yu. Torgashin, Valery P. Koshelets, Pavel N. Dmitriev, Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, and Pavel A. Yagoubov. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2007. Vol. 17. № 2. P. 379–382.