

## ГЕТЕРОДИННЫЙ ПРИЕМНИК СО СВЕРХПРОВОДНИКОВЫМ СМЕСИТЕЛЕМ НА ЭФФЕКТЕ ЭЛЕКТРОННОГО РАЗОГРЕВА ДЛЯ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

И. В. Пентин<sup>1</sup>, Ю. Б. Вахтомин<sup>1</sup>, К. В. Смирнов<sup>1,2</sup>, Н. С. Каурова<sup>1</sup>, Г. Н. Гольцман<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Московский педагогический государственный университет,  
118435, Москва, ул. Малая Пироговская, 29

<sup>2</sup> Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета Высшая школа экономики, 109028, Москва

Статья поступила в редакцию 11 октября 2017 г., после доработки – 27 октября 2017 г.

**Аннотация.** В работе представлены результаты по созданию гетеродинного приемника на основе сверхпроводникового смесителя на эффекте электронного разогрева (*Hot Electron Bolometer (HEB) mixer*), в котором реализовано прямое согласование излучения среднего инфракрасного диапазона с чувствительным NbN элементом НЕВ-смесителя, без использования планарной металлической антенны. Без рассмотрения оптических и электрических потерь в сигнальном тракте гетеродинного приемника были проведены исследования шумовых характеристик NbN НЕВ-смесителя на частоте гетеродина 28.4 ТГц ( $\lambda = 10.6$  мкм), в качестве которого был использован газоразрядный CO<sub>2</sub> лазер непрерывной генерации. Температура шума NbN НЕВ-смесителя с размером чувствительного элемента 10 мкм × 10 мкм, определенная методом измерения Y-фактора и с учетом члена, описывающим флуктуации нулевых колебаний, в соответствии с диссипативной теоремой Каллена-Вельтона, составила 2 320 К ( $\sim 1.5h\nu/k_B$ ) на частоте гетеродина 28.4 ТГц. Изотермическим методом проведена оценка поглощенной мощности излучения гетеродинного источника в оптимальной по температуре шума рабочей точке для указанного NbN НЕВ-смесителя, которая составила 9 мкВт.

**Ключевые слова:** NbN пленка, эффект электронного разогрева в сверхпроводниках, приемники электромагнитного излучения.

**Abstract.** The work presents the result of development of the NbN superconducting hot-electron-bolometer (HEB) mixer. The sensitive element of the mixer is directly coupled to mid-IR radiation, and doesn't have planar metallic antenna. Investigations

of noise characteristics of NbN HEB mixer were performed at the frequency 28.4 THz ( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ) by using gas-discharge CW CO<sub>2</sub>-laser without consideration of optical and electrical losses in the heterodyne receiver. The noise temperature of NbN HEB mixer with the size of the sensitive element  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  was 2320 K ( $\sim 1.5h\nu/k_B$ ) at the heterodyne frequency of 28.4 THz. The noise temperature was determined by measuring the Y-factor taking into account the term which describes fluctuations of zero-point oscillations in accordance with the fluctuation-dissipation theorem of Callen-Welton. Isothermal method was used to estimate the absorbed heterodyne radiation power which was  $9 \mu\text{W}$  at the optimal operating point for the minimum noise temperature of NbN HEB mixer.

**Keywords:** NbN film, hot-electron effect in superconducting, receivers of electromagnetic radiation.

Инфракрасная спектроскопия высокого разрешения ( $\nu/\Delta\nu \approx 10^5 \div 10^6$ ) на сегодняшний день стала мощным инструментом для проведения различных астрономических и атмосферных исследований, диагностики биологических материалов в медицине, исследований молекулярного состава органических соединений в химии и др [1, 2]. Например, дальний и средний инфракрасный диапазоны частот  $\nu \approx 10 \div 100$  ТГц ( $\lambda \approx 3 \div 30$  мкм), в котором располагаются важнейшие «окна» прозрачности земной атмосферы ( $\lambda \approx 3 \div 5$  мкм,  $8 \div 14$  мкм,  $16 \div 26$  мкм), характеризуется наличием линий поглощения и рассеяния колебательных переходов сложноорганических и озоноразрушающих загрязнителей атмосферы, таких как, CFC, HCFC, HFC и других соединений содержащих C-H, C-N, N-O связи, что может быть использовано для целей дистанционного мониторинга целостности и причин разрушения озонового слоя, глобального потепления и контроля загрязнения земной атмосферы.

Наибольшее распространение среди приемных систем среднего IR-диапазона, получили гетеродинные приемники со смесителями на основе узкозонных HgCdTe-резисторов и на основе монокристаллических HgCdTe-фотодиодов, работающими в режиме смещения отрицательным постоянным

напряжением [3]. Подобные приемные устройства обладают некоторыми недостатками. Так, например, полоса преобразования для смесителей на основе HgCdTe-резисторов не превосходит 20 МГц, что может ограничивать круг их практического применения. Несмотря на то, что температура шума смесителей на основе HgCdTe-фотодиодов может составлять несколько квантовых пределов, их применение на частотах меньших  $\sim 30$  ТГц затруднено, так как спектральная плотность шума HgCdTe-фотодиодов резко возрастает с понижением частоты, ввиду нелинейного по напряженности электрического поля туннельного эффекта в фотопроводниках с малой величиной энергетической щели [5].

Итак, анализ существующих HgCdTe-приемников среднего IR-диапазона, показывает, что они имеют ограниченный спектральный диапазон по принимаемому излучению и недостаточную, для большинства практических применений, полосу преобразования промежуточных частот.

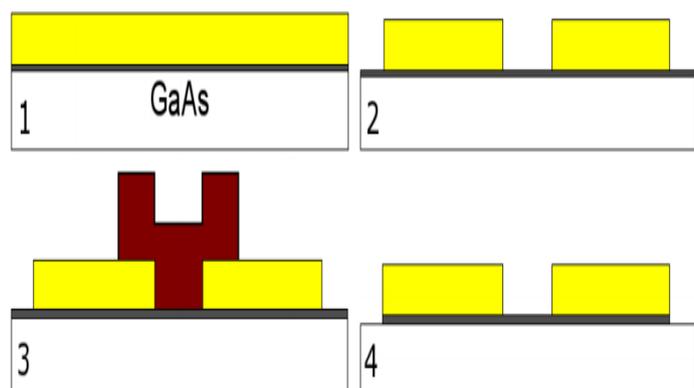
Весьма привлекательными и обнадёживающими приемниками ИК-диапазона могут выступать малозумящие и высокочувствительные гетеродинные устройства на основе эффекта электронного разогрева в тонкой сверхпроводниковой NbN пленке. В настоящий момент подобные устройства в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот достигли значительных успехов [6-8].

Однако, информация об их использовании в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне частот в настоящее время немногочисленна [9]. Основной трудностью препятствующей продвижению работы NbN НЕВ-смесителя и устройств на его основе в область высоких частот (свыше  $\sim 8$  ТГц), является возрастающий характер потерь в контактных областях между берегами планарной металлической антенны и чувствительным элементом смесителя с увеличением частоты гетеродина [10]. Так, масштабирование ТГц-планарной металлической антенны, например, в область среднего ИК-диапазона, приводит к необходимости изготовления антенны и чувствительного элемента смесителя с характерными размерами в несколько десятков нанометров, что не всегда доступно технологически [11]. Также, с увеличением частоты гетеродина и

соответствующим уменьшением характерного размера антенны, потери в контактных областях могут возрастать еще и из-за сопутствующего уменьшения размеров самих контактных областей. Кроме того, малость размеров чувствительного элемента смесителя и, как следствие, его объема, неизбежно ведет к снижению динамического диапазона мощности в полосе преобразования промежуточных частот (ПЧ) такого смесителя.

Таким образом, задача по разработке приемного устройства среднего IR-диапазона, имеющего предельную чувствительность при одновременном высоком спектральном разрешении ( $\nu/\Delta\nu \approx 10^5 \div 10^6$ ), а также более широкую спектральную полосу по принимаемому излучению в сочетании с широкой полосой ПЧ является весьма актуальной.

Смеситель на эффекте электронного разогрева в тонкой сверхпроводниковой NbN пленке, обладает рядом принципиальных особенностей, которые делают его весьма подходящим и перспективным для реализации высокочувствительного и



**Рис. 1.** Технологический маршрут изготовления НЕВ-смесителя с прямым согласованием излучения с NbN пленкой. 1. Нанесение двухслойной системы NbN-Au. 2. Формирование контактных золотых площадок. 3. Формирование чувствительного элемента из NbN пленки. 4. Удаление NbN пленки по всей поверхности кроме участка, занимаемого чувствительным элементом.

широкополосного гетеродинного приемника, в том числе и в среднем IR-диапазоне. Во-первых, в разупорядоченной пленке с малой длиной свободного пробега, какой является сверхпроводниковая NbN пленка, находящейся в резистивном состоянии, характеристическое время неупругого рассеяния электронов (*время электрон-электронного взаимодействия*) очень мало и поглощение излучения не зависит от частоты в широком частотном диапазоне – от миллиметрового до оптического [12-13]. Высокая чувствительность к излучению при этом достигается не за счет зависимости подвижности

носителей заряда от температуры, как, например, в полупроводниках, а за счет гораздо более сильной температурной зависимости сопротивления ( $\frac{\partial R}{\partial T}$ ) в области перехода в сверхпроводящее состояние NbN структуры. Во-вторых, время энергетической релаксации электронной температуры (*время электрон-фононного взаимодействия*) в тонкой ( $< 10$  нм) NbN пленке достигает значения  $\sim 10$  пс при температуре перехода в сверхпроводящее состояние, что теоретически позволяет создать смеситель с полосой преобразования ПЧ около 10 ГГц [14].

В настоящее время, рекордная температура шума волноводного NbN НЕВ-смесителя составляет 700 К на частоте 1.9 ТГц ( $7h\nu/k_B$ ) [15], квазиоптического, интегрированного с планарной металлической антенной, – 600 К на частоте 2.5 ТГц ( $5h\nu/k_B$ ) [6], 1300 К на частоте 4.3 ТГц ( $6h\nu/k_B$ ) [7], 1520 К на частоте 5.25 ТГц ( $6h\nu/k_B$ ) [8], а его полоса преобразования достигает значения свыше 6 ГГц [6].

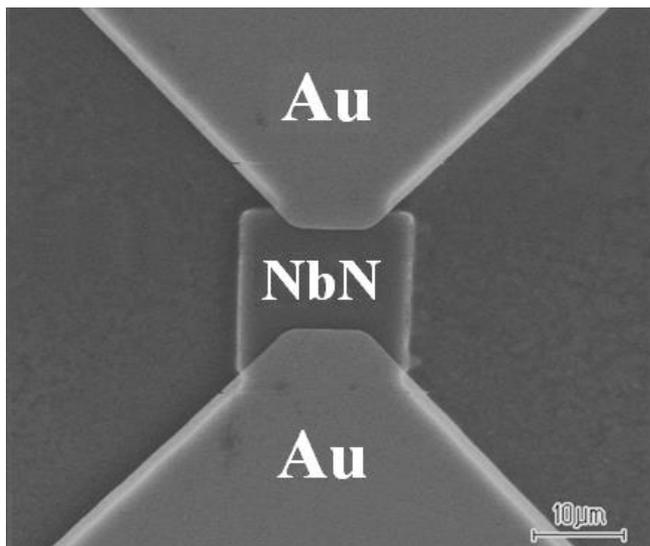
Вместе с тем, представленные данные демонстрируют, что с увеличением частоты, чувствительность квазиоптического смесителя, интегрированного с планарной металлической антенной падает, что связано, как уже отмечалось, с ростом потерь в контактных областях между чувствительным NbN элементом и берегами металлической планарной антенны, возрастающими потерями в самой антенне, ограничением ее спектральной полосы по принимаемому излучению и деструкцией диаграммы направленности. Так, верхняя частота эффективного приема наиболее широкополосной спиральной антенны, описанной в литературе, не превосходит 8 ТГц [16]. Разработка более высокочастотных антенн, а, следовательно, меньшего размера, представляет собой довольно трудоемкую и нетривиальную технологическую задачу.

В данной работе мы представляем альтернативный подход к созданию чувствительного NbN НЕВ-смесителя, в котором реализовано прямое согласование принимаемого электромагнитного излучения с чувствительным элементом смесителя, выполненным из NbN пленки и расположенным в фокальной плоскости гиперполусферической германиевой (Ge) линзы.

Возможность реализации предлагаемого способа согласования, без использования планарной металлической антенны в среднем ИК-диапазоне обусловлена несколькими причинами. Во-первых, уход в высокочастотную область спектра позволяет сфокусировать принимаемое излучение в пятно, диаметр которого, в соответствии с распределением Эйри, ограничен лишь дифракционным пределом, зависящим от длины волны в материале используемой линзы. Так, для германия, с показателем преломления  $n = 4$  из которого изготовлена фокусирующая линза и на частоте 28.4 ТГц, размер дифракционно ограниченной области пятна поглощения излучения составляет  $\sim 5$  мкм. Данная величина позволяет задать характерные размеры чувствительного элемента будущего NbN НЕВ-смесителя, которые должны быть чуть больше, либо сравнимы с размером пятна. Однако, следует отметить, что в области частот до  $\sim 6$  ТГц, где общепринятой и оправданной схемой согласования принимаемого излучения с чувствительным элементом приемника, является использование интегрированного в планарную антенну NbN НЕВ-смесителя, реализация предлагаемого подхода означало бы изготовление смесителя с характерными размерами в несколько десятков  $\mu\text{m}$ , что неизбежно привело бы к резкому ухудшению его чувствительности и неминуемому уменьшению полосы преобразования ПЧ. Во-вторых, наличие прямого согласования излучения с чувствительным NbN элементом, обеспечивает отсутствие у такого смесителя увеличивающихся с ростом частоты потерь в планарной металлической антенне, а также потерь в контактных областях между чувствительным NbN элементом и металлическими берегами антенны [10]. В-третьих, динамический диапазон рассматриваемого смесителя заведомо выше динамического диапазона смесителя интегрированного с планарной антенной. В-четвертых, рассматриваемый способ согласования, позволяет улучшить диаграмму направленности будущего приемника, что особенно важно в решении целого ряда практических задач.

Исследуемый НЕВ-смеситель был сформирован на основе двухслойной системы NbN-Au, осажденной на эпитолерованную сторону диэлектрической подложки из арсенида-галлия (GaAs). Выбор GaAs в качестве материала подложки обусловлен высокой прозрачностью в ИР-диапазоне и коэффициентом преломления близким к коэффициенту преломления фокусирующей Ge линзы.

Ультратонкая сверхпроводящая NbN пленка толщиной 4-5 nm, осаждалась реактивным магнетронным распылением на постоянном токе Nb мишени в атмосфере газовой смеси Ar и N<sub>2</sub> в установке распыления Leybold Heraeus Z-400. Остаточное давление составляло 5×10<sup>-7</sup> мБар. На протяжении всего процесса нанесения NbN пленки температура подложки поддерживалась на уровне 350°C, что позволило заведомо избежать дегазации As из GaAs-соединения и соответствующего ей изменения в стехиометрическом составе самой подложки. Парциальные давления Ar и N<sub>2</sub> составляли 5×10<sup>-3</sup> мБар и 10<sup>-4</sup> мБар, соответственно. Ток разряда 300 мА и напряжение разряда 300 В. После осаждения пленки NbN, без нарушения вакуума (*in-situ*), методом магнетронного распыления осуществлялось нанесение пленки Au толщиной 100 нм при температуре 100°C. После формирования контактных золотых



**Рис. 2.** Фотография NbN НЕВ-смесителя для среднего ИР-диапазона. В центре обозначен чувствительный элемент (область) НЕВ-смесителя – сверхпроводниковая пленка NbN. Сверху и снизу от NbN пленки, изображены золотые контактные площадки.

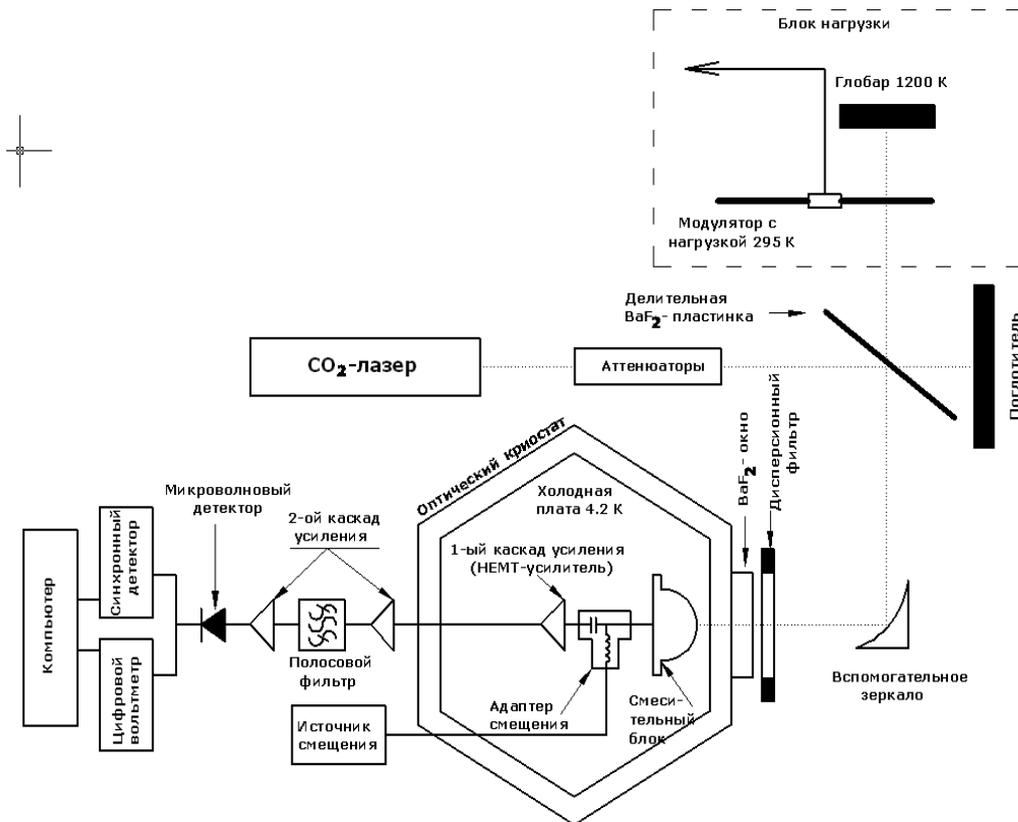
площадок, методом фотолитографии (установка Karl Suss MA 56), формировался NbN чувствительный элемент – сверхпроводниковая площадка размером 10 мкм × 10 мкм. На заключительном этапе GaAs подложка разделялась на чипы размером 3 мм × 3 мм методом скрайбирования.

Схематический процесс изготовления чипа NbN НЕВ-

смесителя показан на *Рис. 1*, а его микрофотография – на *Рис. 2*.

Изготовленный смеситель имел следующие характеристики: критическая температура сверхпроводящего перехода ( $T_c$ ) – 8.6 К, ширина сверхпроводящего перехода ( $\Delta T_c$ ) – 0.45 К, плотность критического тока ( $j_c$ ) –  $\sim 5 \times 10^6$  А/см<sup>2</sup> при 4.2 К и отношение  $R_{300}/R_{20} = 0.4$ .

Экспериментальная установка для исследования шумовых характеристик смесителей, Блок-схема которой, представлена на *Рис. 3*, включала гетеродинный приемник со сверхпроводниковым NbN НЕВ-смесителем, оснащенный гетеродином на 28.4 ТГц (10.6 мкм) и блок шумовой нагрузки. Температура шума NbN НЕВ-смесителя ( $T_{noise}$ ) в гетеродинном приемнике определялась по стандартной методике, основанной на измерении Y-фактора, численно равного отношению выходной мощности шума приемника при теплой нагрузке к выходной мощности при холодной нагрузке на входе приемника.



**Рис. 3.** Экспериментальная установка для исследований шумовых характеристик NbN НЕВ-смесителя с прямым согласованием излучения на частоте гетеродина 28.4 THz.

В качестве гетеродинного источника нами был использован высокостабилизированный газоразрядный  $\text{CO}_2$  лазер с линией одномодовой непрерывной генерации на частоте 28.4 THz. Для пространственного совмещения излучений от гетеродинного и сигнального источников, использовался делитель луча, в виде плоскопараллельной фторид-бариевой ( $\text{BaF}_2$ ) пластинки толщиной 0.8 mm и коэффициентом пропускания  $\sim 0.95$  на частоте 28.4 ТГц. Совмещенное излучение, пройдя через вспомогательное внеосевое параболическое зеркало и входное окно криостата, изготовленное из  $\text{BaF}_2$ , поступало на смесительный блок. Смесительный блок устанавливался на охлаждаемой до 4.2 К плате оптического гелиевого криостата. Дальнейшая фокусировка излучения в область чувствительного элемента NbN НЕВ-смесителя, происходила посредством гиперполусферической германиевой (Ge) линзы диаметром  $D \sim 12$  мм и вытяжением  $\sim 1/6D$ , закрепленной в смесительном блоке. Для уменьшения потерь на отражение от Ge линзы, на ее сферическую поверхность было нанесено многослойное антиотражающее покрытие, оптимизированное для работы в интервале частот  $\sim 25-37$  ТГц.

Сигнал на ПЧ с NbN НЕВ-смесителя, пройдя через Т-образный адаптер смещения по постоянному току (DC), поступал на вход криогенного НЕМТ (*High Electron Mobility Transistor*)-усилителя с коэффициентом усиления 35 дБ и полосой 1.35-1.75 ГГц. В целях предотвращения возникновения в тракте ПЧ отраженной волны, усилитель оснащался циркулятором. Усиленный на ПЧ сигнал, через коаксиальный кабель поступал на вход второго каскада усиления, состоящего из цепочки усилителей с шумовой температурой 77 К в полосе усиления 0.1-2 ГГц и общим коэффициентом усиления 55 дБ. Цепочка усилителей была разделена перестраиваемым фильтром с полосой пропускания 40 МГц и ослаблением, на центральной частоте, не более 1 дБ. Сигнал на ПЧ детектировался широкополосным микроволновым детектором.

В качестве источника сигнального излучения был использован глобар с радиояркой температурой  $T_{hot} = 1200$  К. Излучение глобара модулировалось механическим модулятором с эффективной температурой

лопастей  $T_{cold} = 295$  К. Частота смены (модуляции) температур  $T_{hot}$  и  $T_{cold}$  могла перестраиваться в интервале частот 20-160 Гц и по форме близка к меандру. Соответствующее пространственное расположение глобара и модулятора в экспериментальной установке, позволили заведомо перекрыть входную диаграмму направленности NbN НЭВ-приемника.

При вычислении Y-фактора и соответствующих ему значений температуры шума вблизи квантового предела, нельзя пренебречь членом, описывающим флуктуации нулевых колебаний, поскольку их энергия становится сравнимой с энергией используемых в работе нагрузок с температурами 1200 К и 295 К. С учетом наличия квантового шума, уравнение, позволяющее найти температуру шума приемника  $T_{noise}$  на частоте 28.4 ТГц, принимает следующий вид [17]:

$$T_{noise} = \frac{1}{k} \cdot \frac{D_f(\omega_{LO}, T_{hot}) - Y \cdot D_f(\omega_{LO}, T_{cold})}{Y - 1} - \frac{\hbar \omega_{LO}}{2k} \quad (1),$$

где

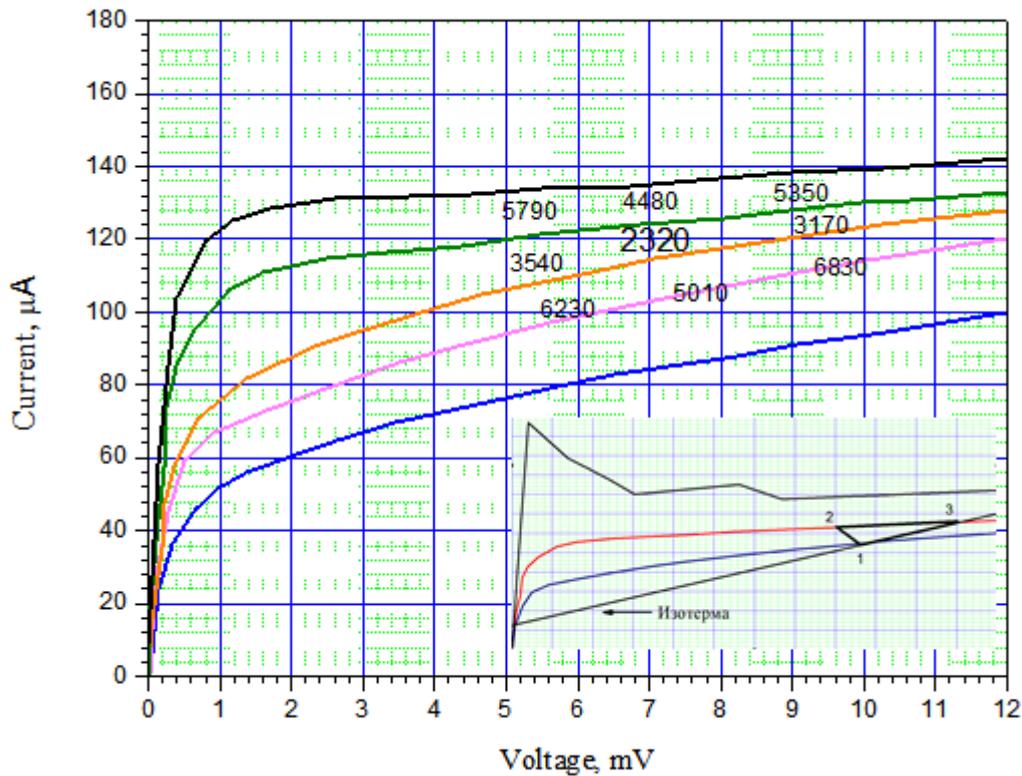
$$D_f(\omega, T) = \frac{\hbar \omega}{e^{kT} - 1} \quad (2)$$

– спектральная плотность излучения абсолютно черного тела с температурой  $T$  на частоте  $\omega$ ,  $T_{noise}$  – температура шума,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T_{hot}$  и  $T_{cold}$  – радиояркие температуры горячей и холодной нагрузок, соответственно,  $\omega = 2\pi\nu_{LO}$ ,  $\nu_{LO} = 28.4$  ТГц – частота излучения гетеродина.

В приведенных соотношениях, при вычислении значения температуры шума приемника, в соответствии с флуктуационно-диссипативной теоремой Каллена-Вельтона, учтен член, описывающий квантовый шум (флуктуации нулевых колебаний), спектральная плотность которого равна  $\frac{\hbar \omega_{LO}}{2}$  и который, не является собственным шумом приемника.

Во избежание эффекта прямого детектирования или изменения рабочей точки гетеродинного приемника при смене нагрузок с различной температурой, которое может приводить к значительному искажению Y-фактора, входное окно криостата было оборудовано полосовым пропускающим дисперсионным

фильтром, существенно сужающим входную полосу детектирования [18]. Используемый нами фильтр, имел центральную длину волны близкую к частоте 28.4 ТГц, отношение  $\lambda/\Delta\lambda$  равным 7. Применение указанного фильтра, позволило существенно уменьшить вклад прямого детектирования в измеряемую величину шумовой температуры смесителя, не превысив значения 5%.



**Рис. 4.** Семейство вольтамперных характеристик NbN НЕВ-смесителя для различных уровней мощности излучения гетеродинного источника. Цифрами обозначены значения температуры шума в соответствующих рабочих точка после вычитания нулевых квантовых флуктуаций. На вставке изображена линия равных сопротивлений (изотерма) и пояснен изотермический метод определения поглощенной NbN НЕВ-смесителем мощности гетеродинного источника.

На *Рис. 4* представлено семейство вольтамперных характеристик NbN НЕВ-смесителя для различных уровней мощности гетеродинного источника. Нижняя кривая соответствует бóльшей поглощенной мощности гетеродинного источника. На рисунке также представлены значения измеренной температуры шума NbN НЕВ-смесителя без учета вклада в температуру шума отдельных оптических элементов и элементов цепи промежуточных частот сигнального тракта. Наибольшее значение Y-фактора получено при напряжении смещения

на смесителе  $U = 7.9$  мВ и транспортном токе  $I = 127$  мкА. Соответствующая этой рабочей точке температура шума NbN НЕВ-смесителя составила  $T_{noise} = 2\,320 (\pm 70)$  К.

Для оценки значения оптимальной мощности гетеродина поглощенной NbN НЕВ-смесителем, применен изотермический метод [19], который основан на условии равного воздействия мощности гетеродина  $P_{LO}$  и джоулевой мощности  $UI$  на сопротивление смесителя  $R_0$  по постоянному току (вставка на Рис. 4). Так, в точках равного сопротивления – точки 1 и 3, вследствие равенства электронных температур, должно выполняться равенство (3):

$$P_{LO_1} + U_1 I_1 = P_{LO_3} + U_3 I_3 \quad (3)$$

где  $P_{LO_1}$  и  $P_{LO_3}$  – поглощенная смесителем мощность гетеродина в точках 1 и 3,  $U_1$  и  $U_3$  – напряжение смещения на смесителе в точках 1 и 3,  $I_1$  и  $I_3$  – транспортный ток в точках 1 и 3, соответственно.

Переход из точки 1 в точку 3 можно осуществить через точку 2, путем последовательной аттенюации мощности гетеродина в известное  $\alpha$  раз (участок 1→2) и последующего изменения напряжения смещения на смесителе (участок 2→3). Для двух вольт-амперных характеристик, также можно записать приближенное равенство (4):

$$P_{LO_1} = \alpha \cdot P_{LO_2} \cong \alpha \cdot P_{LO_3} \quad (4)$$

Объединяя между собой уравнения (3) и (4), а также зная измеренные в точка 1 и 3 значения напряжения смещения  $U$  и транспортного тока  $I$ , легко установить искомую величину  $P_{LO_1}$ . В оптимальной рабочей точке, то есть в точке с максимальным значением Y-фактора, расчет поглощенной смесителем мощности изотермическим методом дает величину  $P = 9$  мкВт.

Полученные результаты измерения оптимальной поглощенной мощности гетеродинного источника для исследуемого типа смесителя требуют некоторых комментариев. Во-первых, в работе [9] было произведено измерение поглощенной мощности для NbN НЕВ-смесителя с размером чувствительного элемента  $20$  мкм  $\times$   $30$  мкм, которая составила  $16$  мкВт на частоте  $28.4$  ТГц, что

лишь в  $\sim 1.7$  раза превышает значение поглощенной мощности для исследуемого в работе смесителя, в то время, как их объемы, при равенстве толщин NbN пленки, отличаются в 6 раз. Факт экспериментального несоответствия линейной зависимости поглощенной мощности от объема NbN НЕВ-смесителя в среднем ИК-диапазоне частот, по-видимому, может быть связано со способом согласования чувствительного элемента с излучением. В НЕВ-смесителях с прямым согласованием с излучением, размер гетеродинного пятна поглощения ограничен лишь дифракционным пределом, зависящим только от длины волны в материале линзы. Данное обстоятельство не позволяет уменьшить требуемое значение оптимальной поглощенной мощности путем соответствующего уменьшения планарных размеров чувствительного элемента смесителя, как это, например, достигается для NbN НЕВ-смесителей ТГц-диапазона частот. Во-вторых, значение поглощенной мощности для NbN НЕВ-смесителя на частоте 28.4 ТГц, на несколько порядков величины превышает значение поглощенной мощности, характерное для ТГц-смесителей микронных и субмикронных размеров, интегрированных с планарными антеннами. Например, в работе [20] было показано, что поглощенная мощность гетеродинного источника для NbN НЕВ-смесителей с размером чувствительного элемента  $2 \text{ мкм} \times 0.2 \text{ мкм}$  в ТГц-диапазоне частот, не превосходит значения 100-200 нВт. Столь существенное, в  $\sim 45$  раз, повышение требуемой мощности гетеродина для работы NbN НЕВ-смесителей среднего ИК-диапазона, вызвано увеличением характерных размеров чувствительного элемента смесителя и, соответственно, его объема.

Отметим, что сегодня, когда разработана мощная инструментальная база, начиная от компактных и мощных газоразрядных  $\text{CO}_2$ -лазеров, полупроводниковых с распределенной обратной связью лазеров (DFB Laser) и заканчивая квантово-каскадными лазерами (QCL), требование к повышению оптимальной мощности гетеродина для работы одиночных NbN НЕВ-смесителей среднего ИК-диапазона легко выполняется. Например, современные квантово-каскадные лазеры успешно работают в диапазоне частот 12-75 ТГц, а

их выходная мощность излучения при комнатной температуре составляет десятки мВт в режиме непрерывной генерации и единиц Вт в импульсном режиме [21]. Высокая выходная мощность излучения, одномодовая генерация и малая ширина линии генерации, характерные для квантово-каскадных лазеров, делает их особенно привлекательными для использования в гетеродинном приемнике с NbN НЕВ-смесителем среднего ИК-диапазона.

Таким образом, результаты проведенных и представленных в настоящей работе исследований подтверждают перспективность разработки NbN НЕВ-смесителя с прямым согласованием излучения в среднем ИК-диапазоне. Значение температуры шума на частоте гетеродина 28.4 ТГц, измеренное для этого типа смесителя, составило 2 320 К, что соответствует лишь трем квантовым пределам ( $\sim 1.5h\nu/k_B$ ). Дальнейшее повышение чувствительности NbN НЕВ-смесителя может быть достигнуто путем улучшения эффективности поглощения излучения NbN пленкой. Для NbN НЕВ-смесителя с размерами чувствительного элемента 10 мкм  $\times$  10 мкм, величина оптимальной поглощенной мощности гетеродина составила 9 мкВт. Достигнутые рекордные характеристики NbN НЕВ-смесителя среднего ИК-диапазона, открывают новые возможности его использования, прежде всего, в радиоастрономии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00579 мол\_а.

### Литература

- [1] Sonnabend G, Wirtz D, Schieder R., et al. // Appl. Opt. 2002, 41, 2978–2984.
- [2] ESA's Infrared Space Observatory (ISO) // [Электронный ресурс]. URL: <http://sci.esa.int/iso/>
- [3] A. Betz, R. Boreiko, S. Sivananthan, et al. // Proc. 12<sup>th</sup> international symposium on spase terahertz technology. 2001.
- [4] M.Mumma, T.Kostiuk, S.Cohen, et al. // Space Science Reviews. 1975, Vol. 17, No. 5, 661-667.
- [5] Kostiuk T., Spears D. // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1987, Vol. 8, No.10, 1269-1279.

- [6] I. Tretyakov, S. Ryabchun, M. Finkel, et al. // Appl. Phys. Lett. 2011, 98, 033507.
- [7] P. Khosropanah, J.R. Gao, W.M. Laauwen, et al. // Appl. Phys. Lett. 2007, 91, 221111.
- [8] W. Zhang, P. Khosropanah, J.R. Gao, et al. // Appl. Phys. Lett. 2010, 99, 111113.
- [9] Maslennikov S., Finkel M., Vachtomin Y., et al. // Proc. 16th international symposium on space terahertz technology. 2005.
- [10] J.J.A. Baselmans, J M. Hajenius, R. Gao, et al. // Appl. Phys. Lett. 2004, 84, 1958.
- [11] Michael Shcherbatenko, Yury Lobanov, Oleg Benderov, et al. // 26 th International Symposium on Space Terahertz Technology. 2015.
- [12] Gershenzon E., Gol'tsman G., Gogidze I., et al. // Sov. Superconductivity. 1990, V. 3, No.10, 2143.
- [13] Gershenzon E., Gol'tsman, Elantiev A., et al. // IEEE Trans Magn. 1991, 27, 1317-1320.
- [14] Yu.Gousev, G.N.Gol'tsman, A.D.Semenov, et al. // Appl. Phys. Lett. 1994, 75(7), 3695-3697.
- [15] P. Putz, D. Btichel, K. Jacobs, et al. // 26 th International Symposium on Space Terahertz Technology, Cambridge. 2015.
- [16] Alexander Shurakov, Sergey Seliverstov, Natalia Kaurova, et al. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2012, Vol. 2, No. 4.
- [17] A. Kerr, M. Feldman, and S.-K. Pan // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Space Terahertz Technology. 1997.
- [18] J. Baselmans, A. Baryshev, S. Reker, et al. // Appl. Phys. Lett. 2005, Vol. 86, 163503.
- [19] H. Ekstrom, E. Kollberg, P. Yagoubov, et al. // Applied Physics Letters. 1997, Vol. 70, 3296-3298.
- [20] S. A. Ryabchun, I. V. Tret'yakov, I. V. Pentin, et al. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2009, Vol. 52, No. 8.
- [21] A. Wittmann, Y. Bonetti, M. Fischer, et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2009, 21(12), 814–816.

**Ссылка на статью:**

И. В. Пентин, Ю. Б. Вахтомин, К. В. Смирнов, Н. С. Каурова, Г. Н. Гольцман. Гетеродинный приемник со сверхпроводниковым смесителем на эффекте электронного разогрева для среднего инфракрасного диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/9/text.pdf>