

К. В. Смирнов^{1,2}, **Ю. Б. Вахтомин**^{1,2}, **А. В. Смирнов**^{1,2}, **Р. В. Ожегов**^{1,2},
И. В. Пентин^{1,2}, **А. В. Дивочий**^{1,2}, **Е. В. Сливинская**¹, **Г. Н. Гольцман**²

¹ ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии»
ул. Россолимо, 5/22, Москва, 119991, Россия
E-mail: smirnov@scontel.ru

² Московский педагогический государственный университет
ул. М. Пироговская, 1, Москва, 119991, Россия

ПРИЕМНИКИ ТЕРАГЕРЦОВОГО И ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ, ОСНОВАННЫЕ НА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

В работе представлены результаты разработки и создания чувствительных и ультрабыстрых приемников, основанных на тонкопленочных сверхпроводниковых наноструктурах: болометрах на эффекте электронного разогрева (HEB – hot-electron bolometer) и детекторах одиночных фотонов видимого и инфракрасного диапазонов волн (SSPD – superconducting single-photon detector). Представлены основные принципы работы сверхпроводниковых устройств, технология создания и конструкционные особенности приемников, их основные типы и характеристики. Достиженные рекордные значения параметров приемных систем позволяют использовать созданные приборы при решении различных научно-исследовательских задач в ближнем, среднем и дальнем ИК диапазонах волн.

Ключевые слова: терагерцовые болометры, эффект электронного разогрева, сверхпроводниковые NbN пленки, ИК однофотонные детекторы, наноструктуры.

**K. V. Smirnov, Yu. B. Vachtomin, A. V. Smirnov, R. V. Ozhegov, I. V. Pentin,
A. V. Divochii, E. V. Slivinskaya, G. N. Goltzman**

TERAHERTZ AND INFRARED RECEIVERS BASED ON THIN-FILM SUPERCONDUCTING NANOSTRUCTURES

This work presents the results of the development and fabrication of sensitive and ultrafast detectors based on thin-film superconducting nanostructures: hot-electron bolometers (HEBs) and visible and infrared superconducting single-photon detectors (SSPDs). The main operational principles of the superconducting devices are presented as well as the technology of fabrication of the detectors and their main types and parameters. The achieved record parameters of the detectors allow application of the fabricated devices to solution of various research problems in the near, middle and far IR ranges.

Keywords: terahertz bolometers, hot-electron effect, superconducting NbN films, IR single-photon counters, nanostructures.

Введение

Наблюдаемое в последнее время становление и интенсивное развитие сверхпроводниковой индустрии связано, прежде всего, с созданием новых перспективных сверхпроводящих материалов, применением передо-

вых достижений нанотехнологий, совершенствованием криогенной техники. Развитие сверхпроводниковой промышленности идет по двум основным направлениям: сильноточные приложения – индуктивные и кинетические накопители токов, токоограничители, генераторы, электрические ма-

шины, синхронные компенсаторы, трансформаторы, магнитные системы и пр.; слаботочные приложения – детекторы и приемные системы инфракрасного и терагерцового диапазона частот, СВЧ фильтры, чувствительные анализаторы спектра, сквиды, эталонные измерители и пр. В настоящей работе мы представляем приемные системы видимого, инфракрасного и терагерцового излучений, созданные в компании «Сверхпроводниковые нанотехнологии».

Открытие коллективом Учебно-научного радиофизического центра Московского педагогического государственного университета (УНРЦ МПГУ) эффекта электронного разогрева в сверхпроводящих пленках привело к созданию нового устройства – сверхпроводникового однофотонного детектора (SSPD – superconducting single photon detector), работающего в диапазоне от ультрафиолетовых до инфракрасных волн [1], а также рекордных по чувствительности и быстродействию смесителей и болометров миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов (HEB – hot electron bolometers) [2].

Указанные детекторы, а также созданные ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии» приемные системы на их основе в настоящее время уже нашли практическое применение в радиоастрономии терагерцового диапазона (исследование звездообразования в молекулярных облаках и пылевых туманностях) и в радиофизике (дистанционное зондирование верхних слоев атмосферы в субмиллиметровом диапазоне волн для мониторинга гетерогенных химических реакций и наличия примесей-катализаторов, предположительно отвечающих за состояние озонового слоя и глобальное потепление климата) [2; 3]; в электронике (разработка приборов для неразрушающей диагностики КМОП СБИС путем детектирования излучения горячих электронов в переключающихся полевых транзисторах) [4]; в квантово-криптографических линиях связи [5; 6] и в телекоммуникации [7]; в научных исследованиях (детектирование одиночных фотонов с высоким временным разрешением, исследование излучения из полупроводниковых квантовых точек, ближнеполевая спектроскопия терагерцового диапазона частот) [8–11].

Однофотонные приемники видимого и ИК диапазона

Перспективность использования сверхпроводниковых детекторов и приемных систем на их основе определяется прежде всего их рекордными характеристиками. SSPD способен регистрировать световые потоки от приблизительно одного фотона в минуту (собственный темновой счет может быть менее одного ложного срабатывания за 10 минут), до 10^9 – 10^{10} фотонов в секунду; его собственная нестабильность (jitter) не превышает 20 пс. Квантовая эффективность (QE) детектора составляет, например, в технологически важном диапазоне 0,85–1,5 мкм $QE = 30\%$.

Основу SSPD детекторов составляет пленка нитрида ниобия (NbN) толщиной в $4\div 4,5$ нм, критическая температура сверхпроводящего перехода которой $T_c \approx 10$ К. Существенная особенность в изготовлении SSPD детектора состоит в том, что из пленки формируется узкая (~ 100 нм) и длинная ($\sim 0,5$ мм) полоска в виде меандра, заполняющая приемную площадку размером $10\cdot 10$ мкм² (рис. 1). Приведенные характеристики детектора достигаются тогда, когда плотность критического тока при температуре детектора $T = 2\text{--}4,2$ К в любом сечении полоски близка к критическому току, $j_c \approx 10^7$ А/см². Указанное условие предполагает создание сверхпроводниковой полоски, ширина которой испытывает отклонения от ее среднего значения не более чем на 5 нм [12].

В рабочем состоянии при температуре гораздо ниже T_c детектор смещается постоянным током, близким к критическому. Поглощение фотона, и последующее электрон-электронное взаимодействие, сопровождающееся диффузией горячих электронов, образует горячее пятно, содержащее несколько сотен квазичастиц. Это подавляет сверхпроводимость в области пятна и выталкивает сверхток смещения на периферию, где его плотность становится больше критической. Все сечение сверхпроводниковой полоски переходит в нормальное состояние и возникает падение напряжения, которое может быть легко зарегистрировано. Фронт нарастания напряжения составляет единицы пикосекунд. Продолжающаяся

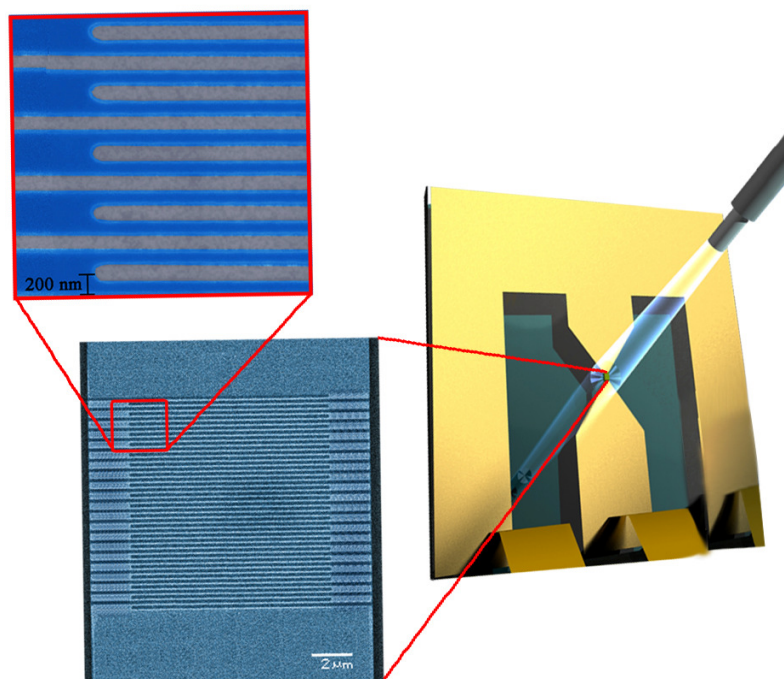


Рис. 1 Внешний вид и SEM фотография чувствительной области SSPD.
 Темные области – полоски сверхпроводника, светлые – области, где сверхпроводник удален

Таблица 1

Квантовая эффективность, приведенная к оптическому входу: на длине волны 0.85 мкм на длине волны 1.3 мкм на длине волны 1.55 мкм на длине волны 2 мкм	≥25% ≥12% ≥8% ≥2%
Уровень ложных срабатываний	≤1 с ⁻¹
Длительность выходного импульса напряжения	≤5 нс
jitter	≤40 пс

Таблица 2

Тип детектора	1/1a	2/2a	3/3a
Диапазон частот, ТГц	0.3-3	25-70	1-30
Эквивалентная мощность шума (NEP), Вт·Гц ^{-0.5}	5-7x10 ⁻¹⁴ / 3-5x10 ⁻¹³	1-2x10 ⁻¹² / 4-5x10 ⁻¹²	1-2x10 ⁻¹¹ / 6-8x10 ⁻¹¹
Время отклика, нс	1/0.05	1/0.05	1/0.05
Динамический диапазон, μВт	1	50	10 ⁵

диффузия горячих квазичастиц приводит к быстрому остыванию горячего пятна и возврату в сверхпроводящее состояние. Длительность импульса напряжения определяется кинетической индуктивностью сверхпроводниковой полоски и составляет около 1 нс.

На основе SSPD ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии» были реализованы приемники ИК излучения оптимизированные для телекоммуникационных и квантово-криптографических применений с использованием оптоволоконной техники¹. Основной решенной задачей при создании приемников являлась реализация эффективного оптического согласования используемого стандартного одномодового волокна (диаметр световедущей жилы около 9 мкм) с приемной площадкой SSPD размером 10·10 мкм². Табл. 1 содержит характеристики приемной системы, приведенные к оптическому входу. Приемники имеют один или два идентичных канала (в случае проведения корреляционных измерений) и выполнены в виде вставки в гелиевый транспортный сосуд Дьюара или на основе машины замкнутого цикла гелиевого уровня.

Болометры терагерцового диапазона частот

Основными характеристиками болометров терагерцового диапазона являются эквивалентная мощность шума (NEP – noise equivalent power), быстродействие, диапазон рабочих частот. В настоящее время сверхпроводниковые болометры, производимые ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии» охватывают диапазон частот от 300 ГГц до 70 ТГц (табл. 2), их быстродействие составляет более 3 ГГц, $NEP \sim 10^{-12} - 10^{-14}$ Вт·Гц^{-1/2}. Ближайшими конкурентами сверхпроводниковых болометров являются полупроводниковые детекторы на основе InSb и Ge² [14]. Оба этих болометра имеют $NEP \sim 10^{-12}$ Вт·Гц^{-1/2}, малое быстродействие (1 МГц и 200 Гц для InSb и Ge болометров соответственно), рабочий диапазон 60–500 GHz для InSb и 0,1–30 THz для Ge.

Как и в случае однофотонных детекторов, принцип действия НЕВ болометров основан на эффекте электронного разогрева в тонкой пленке сверхпроводника. При поглощении излучения сверхпроводником, находящимся при температуре сверхпроводящего перехода (или в точке на зависимости сопротивления сверхпроводника от температуры, характеризуемой максимальным значением dR/dT) сопротивление структуры изменяется, вследствие установления электронной температуры выше температуры решетки. В случае, если частота модуляции излучения меньше обратного времени остывания электронной подсистемы сверхпроводника (определяется в основном временем электрон-фононного взаимодействия и выходом неравновесных фононов из пленки в подложку), на концах структуры смещенной постоянным током возникает электрический сигнал, модулированный с частотой модуляции излучения. Для создания быстрых болометрических приемников необходим подбор сверхпроводниковых материалов с малым временем электрон-фононного взаимодействия, а также создание условий для уменьшения времени выхода неравновесных фононов в подложку. Последнее уменьшается с уменьшением толщины сверхпроводниковой пленки и при улучшении акустического согласования сверхпроводника и подложки. Для создания болометров нами используются тонкие пленки NbN и MoRe, время остывания электронной подсистемы в которых составляет 50 пс и 1 нс соответственно.

Геометрия болометра определяется частотным диапазоном и необходимостью эффективного согласования излучения с активной областью детектора, а также согласованием сопротивлений болометра и сигнального тракта. В диапазоне 0,3–3 ТГц чувствительная область имеет типичные размеры 0,1·1 мкм² и интегрирована с планарной широкополосной антенной (рис. 2). Для улучшения согласования с излучением нами используется кремниевая линза, фокусирующая исследуемое излучение на антенну. В диапазонах 1–30 и 25–70 ТГц чувствительный элемент болометра имеет планарные размеры в несколько десятков микрон; излучение фокусируется кремниевой линзой в диапазоне 1–30 ТГц и германиевой линзой в области больших частот. Детектор уста-

¹ См.: www.scontel.ru

² См.: www.terahertz.co.uk

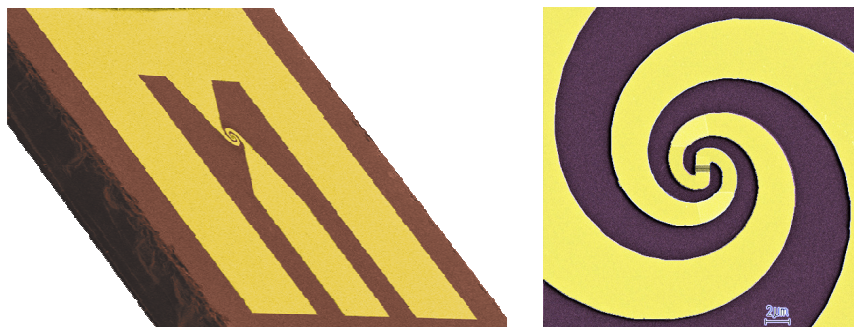


Рис. 2. Внешний вид сверхпроводникового НЕВ болометра (слева) и SEM фотография чувствительного элемента болометра (справа)

навливается в гелиевый оптический криостат и комплектуется блоком электроники, интегрируемым в среду LabView.

Таким образом, на основе сверхпроводниковых наноструктур нами созданы приемные системы видимого, инфракрасного и терагерцового излучений, обладающие рекордными значениями чувствительности и быстродействия.

Список литературы

1. G. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova et al. // *App. Phys. Lett.*, v. 79, p. 705–707, (2001).

2. Finkel, M. I.; Maslennikov, S. N.; Gol'tsman, G. N. // *Radiophysics and Quantum Electronics*, V.48, Issue 10–11, p. 859–864 (2005).

3. TELIS home page: <http://telis.af.op.dlr.de/>; HERSCHEL home page: <http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Herschel> SOFIA home page: <http://sofia.arc.nasa.gov/>

4. J. Zhang, N. Boiadjeva, G. Chulkova et al. // *Elect. Lett.* 39, 1086–1088. (2003).

5. H. Takesue, S. Nam, Q. Zhang et al. // *Nature Photonics*, vol. 1, 343–348 (2007).

6. D. Stucki, N. Walenta, F. Vannel et al. // *New Journal of Physics* 11 (2009) 075003.

7. I. Milostnaya, A. Korneev, I. Rubtsova et al. // *Journal of Physics: Conference Series* 43, 1334–1337 (2006).

8. A. J. Huber, F. Keilmann, J. Wittborn et al. // *Nano Lett.*, V. 8, N. 11, p.3766–3770, (2008).

9. R. Hosten, R. Braive, M. Larque et al. // *Appl. Phys. Lett.* 94, 123101 (2009).

10. A. Divochiy, F. Marsili, D. Bitauld et al. // *Nature Photonics*, V. 2, p. 302–306, (2008).

11. Matthaus Halder, Alexios Beveratos, Nicolas Gisin et al. // *Nature physics*, V. 3, (2007).

12. G. N. Gol'tsman, K. Smirnov, P. Kouminov et al. // *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, V. 13, no. 2, p.192–195, (2003).

25.09.2010