

УДК 538.9

*И.В. Пентин¹, К.В. Смирнов^{1,2}, Ю.Б. Вахтомин^{1,2}, А.В. Смирнов¹, Р.В. Ожегов²,
А.В. Дивочий¹, Г.Н. Гольцман¹*

¹ Московский педагогический государственный университет

² ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии»

Быстродействующий терагерцевый приемник и инфракрасный счетчик одиночных фотонов на эффекте разогрева электронов в сверхпроводниковых тонкопленочных наноструктурах

Представлены результаты создания приемных систем терагерцевого диапазона (0,3–70 ТГц), обладающих рекордным быстродействием (50 пс) и высокой чувствительностью (до 5×10^{-14} Вт/Гц^{1/2}), а также однофотонных приемных систем ближнего инфракрасного диапазона с квантовой эффективностью 25 %, уровнем темнового счета 10 с^{-1} , максимальной скоростью счета ~ 100 МГц и временным разрешением до 50 пс.

Ключевые слова: электронный разогрев, тонкие пленки, сверхпроводимость, болометр, детектор терагерцевого диапазона, счетчик одиночных фотонов ИК-диапазона.

I. Введение

Открытие коллективом Учебно-научного радиофизического центра Московского педагогического государственного университета (УНРЦ МПГУ) эффекта электронного разогрева в сверхпроводящих пленках [1] привело к созданию новых устройств — сверхпроводникового однофотонного детектора (SSPD — superconducting single photon detector), работающего в диапазоне от ультрафиолетовых до инфракрасных волн [2], а также рекордных по чувствительности и быстродействию смесителей и болометров миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов (HEB-hot electron bolometer) [3].

Указанные детекторы, а также созданные ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии» приемные системы на их основе в настоящее время уже нашли практическое применение в радиоастрономии терагерцевого 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) [3, 4]; в электронике (разработка приборов для неразрушающей диагностики КМОП СБИС путем детектирования излучения горячих электронов в переключающихся полевых транзисторах) [5]; в квантово-криптографических линиях связи [6, 7] и в телекоммуникации [8]; в научных исследованиях (детектирование одиночных фотонов с высоким временным разрешением, исследование излучения из полупроводниковых квантовых точек, ближнеполевая спектроскопия терагерцевого диапазона частот) [9–12].

Несомненно, что область перспективного применения сверхпроводниковых однофотонных детекторов видимого и инфракрасного излучения, а также болометров терагерцевого излучения значительно шире рассмотренной выше. Они могут быть использованы для создания систем всепогодной навигации, систем охраны и контроля — для детектирования спрятанных металлических и неметаллических объектов, в медицинской технике, пожарной охране, магистральных волоконно-оптических линиях связи и пр.

II. Однофотонные приемники видимого и ИК-диапазонов

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 до 10^9 – 10^{10} фотонов в секунду.

ду; его собственная нестабильность (jitter) не превышает 20 пс. Квантовая эффективность (QE) детектора составляет, например, в технологически важном диапазоне 0,85–1,5 мкм $QE = 30\%$.

Сравнение SSPD с другими существующими быстрыми счетчиками ИК-фотонов показывает, что по совокупности технических характеристик он существенно их превосходит. Так, на длине волны 1,3 мкм лучшие электровакуумные фотоумножители, например фотоумножители фирмы Hamamatsu, при максимальной скорости счета $9 \cdot 10^6$ (jitter ~ 150 пс) имеют квантовую эффективность не более 0,1 % и темновой счет порядка $200 \cdot \text{с}^{-1}$. Полупроводниковые лавинные диоды из InGaAs (фирмы Fujitsu) хотя и демонстрируют большую квантовую эффективность $QE = 16\%$, но значительно уступают как по скорости счета 5×10^6 (jitter ~ 200 пс), так и по уровню ложных срабатываний ($\sim 500 \text{ с}^{-1}$).

Основу SSPD детекторов составляет пленка нитрида ниобия (NbN) толщиной в $4 \div 4,5$ нм ($\sim 8 \div 10$ атомных слоев), 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 10×10 мкм² (рис. 1). Приведенные выше характеристики детектора достигаются тогда, когда плотность тока при рабочей 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 не более чем на 5 нм [14].

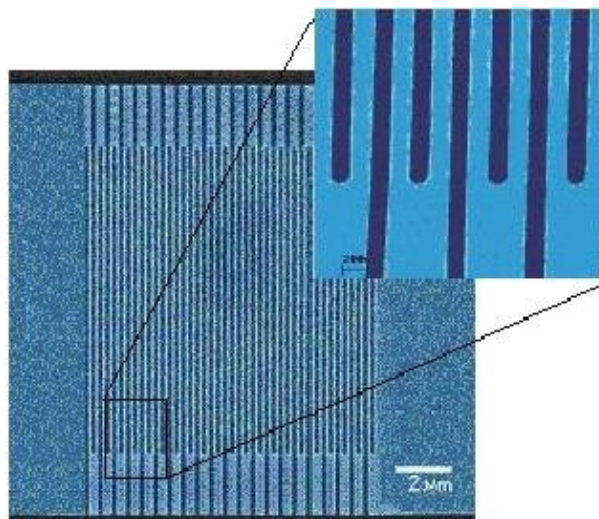


Рис. 1. Фотография чувствительной области SSPD, полученная на сканирующем электронном микроскопе. Светлые участки — полосы сверхпроводника, темные — участки, где сверхпроводник удален

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, образуют горячее пятно, содержащее квазичастицы. 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 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 нами были реализованы приемники ИК-излучения, оптимизированные для телекоммуникационных и квантово-криптографических применений с использованием оптоволоконной техники. Основной решенной задачей при создании приемников являлась реализация

эффективного оптического согласования используемого стандартного одномодового волокна (диаметр светонесущей жилы ~ 9 мкм) с приемной площадкой SSPD размером 10×10 мкм². В табл. 1 представлены 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 крио-рефрижератора замкнутого цикла.

Т а б л и ц а 1

Квантовая эффективность, приведенная к оптическому входу (отношение количества импульсов напряжения на выходе системы к количеству фотонов на входе):	
на длине волны 0,85 мкм	25 %
на длине волны 1,3 мкм	20 %
на длине волны 1,55 мкм	15 %
на длине волны 2 мкм	2 %
Уровень ложных срабатываний (количество импульсов напряжения на выходе системы при отсутствии излучения на входе)	10 с^{-1}
Длительность выходного импульса напряжения	5 нс
Временная нестабильность переднего фронта выходного импульса напряжения	$\leq 50 \text{ пс}^*$

* Ограничено предельным разрешением регистрируемой аппаратуры.

III. Болометры терагерцового диапазона

Основными характеристиками болометров терагерцового диапазона являются эквивалентная мощность шума (NEP — noise equivalent power), быстродействие, диапазон рабочих частот. Созданные нами сверхпроводниковые болометрические приемные системы охватывают диапазон частот от 300 ГГц до 70 ТГц (табл. 2), максимальное быстродействие — 50 пс, NEP $\sim 10^{-12}$ – 10^{-14} Вт \cdot Гц^{-1/2}. Ближайшими конкурентами сверхпроводниковых болометров являются полупроводниковые детекторы на основе InSb и Ge [15]. Оба типа болометра имеют NEP $\sim 10^{-12}$ Вт \cdot 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.

Т а б л и ц а 2

Тип детектора	1/1 а	2/2 а	3/3 а
Диапазон частот, ТГц	0.3–3	25–70	1–30
Эквивалентная мощность шума (NEP), Вт \cdot Гц ^{-0,5}	$5\text{--}7 \times 10^{-14}$ / $3\text{--}5 \times 10^{-13}$	$1\text{--}2 \times 10^{-12}$ / $4\text{--}5 \times 10^{-12}$	$1\text{--}2 \times 10^{-11}$ / $6\text{--}8 \times 10^{-11}$
Время отклика, нс	1/0,05	1/0,05	1/0,05
Динамический диапазон, μ Вт	1	50	10^5

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 (в точке с 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 толщи-

ны 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 $0,1 \times 1 \text{ мкм}^2$ 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 ТГц 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 устанавливается в гелиевый оптический криостат и комплектуется блоком электроники, интегрируемым в среду LabView.

Представленные в настоящей работе приемные системы видимого, инфракрасного и терагерцевого диапазонов являются продукцией компании ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии» [16].

Поисковая научно-исследовательская работа проведена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., ГК 02.740.11.0228; 17.09.10; 17.09.10; 111267; П1287 и поддержана грантом Президента НШ-3265.2010.2.

Литература

1. Гершензон Е.М., Гершензон М.Е., Гольцман Г.Н. [и др.] Разогрев квазичастиц в сверхпроводящей пленке, находящейся в резистивном состоянии // Письма в ЖЭТФ. — 1981. — Т. 34, вып. 5. — С. 281–285.
2. Gol'tsman G., Okunev O., Chulkova G. et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector // App. Phys. Lett. — 2001. — V. 79. — P. 705–707.
3. Финкель М.И., Масленников С.Н., Гольцман Г.Н. Супергетеродинные терагерцевые приёмники со сверхпроводниковым смесителем на электронном разогреве // Известия вузов. Радиофизика. — 2005. — Т. 48, №. 10–11. — С. 964.
4. 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/>
5. Zhang J., Boiadjeva N., Chulkova G. [et al.] Non-invasive CMOS circuit testing with NbN superconducting single-photon detectors // Elect. Lett. — 2003. — V. 39. — С. 1086–1088.
6. Takesue H., Nam S., Zhang Q. [et al.] Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors // Nature Photonics. — 2007. — V. 1. — P. 343–348.
7. Stucki D., Walenta N., Vannel F. et al. High rate, long-distance quantum key distribution over 250km of ultra low loss fibres // New Journal of Physics. — 2009. — V. 11, 075003.
8. Milostnaya I., Korneev A., Rubtsova I. [et al.] Superconducting single-photon detectors designed for operation at 1.55-mm telecommunication wavelength // Journal of Physics: Conference Series. — 2006. — V. 43. — P. 1334–1337.



Рис. 2. Фотография чувствительного элемента сверхпроводникового НЕВ болометра, интегрированного с планарной спиральной антенной

9. *Huber A., Keilmann F., Wittborn J. [et al.]* Terahertz Near-Field Nanoscopy of Mobile Carriers in Single Semiconductor Nanodevices // *Nano Lett.* — 2008. — V. 8, N. 11. — P. 3766–3770.
10. *Hostein R., Braive R., Larque M. [et al.]* Room temperature spontaneous emission enhancement from quantum dots in photonic crystal slab cavities in the telecommunications C band // *Appl. Phys. Lett.* — 2009. — V. 94, 123101.
11. *Divochiy A., Marsili F., Bitauld D. [et al.]* Superconducting nanowire photon number resolving detector at telecom wavelength // *Nature Photonics.* — 2008. — V. 2. — P. 302–306.
12. *Halder M., Beveratos A., Gisin N. [et al.]* Entangling independent photons by time measurement // *Nature physics.* — 2007. — V. 3.
13. www.idquantique.com, www.perkinelmer.com
14. *Gol'tsman G., Smirnov K., Kouminov P. [et al.]* Fabrication of Nanostructured Superconducting Single-Photon Detectors // *IEEE Trans. Appl. Supercon.* — 2003. — V. 13, N. 2. — P. 192–195.
15. www.terahertz.co.uk
16. www.scontel.ru

Поступила в редакцию 27.04.2011.