

02,13,19

Квантовый отклик болометра на основе структуры СИНИС с подвешенным абсорбером

© Р.А. Юсупов¹, А.А. Гунбина^{2,3}, А.М. Чекушкин¹, Д.В. Нагирная¹, С.А. Лемзяков^{4,5},
В.С. Эдельман⁴, М.А. Тарасов¹

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

²Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия

³Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Россия

⁴Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН,
Москва, Россия

⁵Московский физико-технический институт,
Долгопрудный, Московская обл., Россия

E-mail: yusupovrenat@hitech.cplire.ru

Поступила в Редакцию 26 марта 2020 г.

В окончательной редакции 26 марта 2020 г.

Принята к публикации 2 апреля 2020 г.

Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы в THz диапазоне частот болометры на основе структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник с подвешенным над подложкой поглотителем (абсорбером). В таких структурах, в отличие от ранее исследуемых болометров с абсорбером, находящимся непосредственно на подложке, реализуется болометрический режим работы приемника, т.е. возбуждается более одного электрона на один квант излучения (квантовая эффективность больше 1). В исследуемых болометрах удалось достичь квантовой эффективности 15 электронов на квант излучения с частотой 350 GHz.

Ключевые слова: болометр, болометр на холодных электронах, болометр на основе СИНИС структуры, квантовая эффективность, флукуационная чувствительность.

DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49761.11H

1. Введение

Концепция болометра на основе сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС) структуры появилась как развитие идеи андреевского болометра [1], в котором для преодоления его частотных ограничений было предложено заменить контакты сверхпроводник–нормальный металл (СН) на туннельные переходы сверхпроводник–изолятор–нормальный металл (СИН) [2]. Традиционно такие болометры изготавливались при помощи теневого напыления, где первый слой — абсорбер напылялся непосредственно на подложку. Так же важным преимуществом считалась возможность прямого электронного охлаждения в таких структурах, из-за которого они также получили название болометр на холодных электронах (БХЭ). Также как наследие от андреевских приемников для описания работы болометра на основе СИНИС структуры используется теоретическая модель на основе уравнения теплового баланса [3], которая применима только для оценок чувствительности на постоянном токе. Расчет чувствительности через уравнение теплового баланса для СИНИС структур (БХЭ) не учитывает квантовый характер поглощения, фоновый

электронный обмен, снижение квантовой эффективности за счет выноса высокоэнергичных электронов.

2. Режимы работы СИНИС болометра

Реальная картина поглощения THz излучения в СИНИС структурах оказывается существенно более сложной [4]. При поглощении электроном фотона с энергией сильно выше тепловой, энергия электрона будет соответствовать электронной температуре $hf = kT_e$ около 17 K для 350 GHz. Время электрон–электронных взаимодействий $t_{ee} \sim 1/T^2$ (1 ns) при этой температуре значительно больше времен электрон–фононных $t_{eph} \sim 1/T^4$ (0.1 ns) взаимодействий [5]. В результате рождается высокоэнергетичный фонон. У него есть три пути: уйти в подложку, уйти в сверхпроводящие электроды или провзаимодействовать с электронной системой. При передаче энергии электронной подсистеме рождается пара: возбужденный электрон и возбужденная дырка с энергией $hf/2$. Возбужденный электрон $hf/2$ рождает фонон, с энергией $hf/2$, соответствует электронной температуре 8.4 K. Фонон рождает пару электрон–дырка, с энергией $hf/4$, которая соответствует электронной температуре 4.2 K, аналогичный процесс происходит и

для дырки с энергией $hf/2$ с рождением пары электрон-дырка с энергией $hf/4$.

Времена электрон-фононных взаимодействий сравниваются со временами электрон-электронных примерно при электронных температурах 3.7 К. Для упрощения, будем считать, что уже при 4.2 К эффективно электрон-электронное взаимодействие с рождением двух электронов и дырки с энергией $hf/12$ от исходной, теперь уже электрон-электронные взаимодействия вступают в силу, происходит эффективное размножение оставшихся возбуждений. Схематично данный процесс изображен на рис. 1.

Наш подход к оценке чувствительности опирается на неравновесные электронные и фононные функции распределения и механизмы квантового поглощения излучения. Оценивается квантовая эффективность, которая равна количеству возбужденных электронов на один фотон, и может достигать значения $n = hf/kT$. Однако, если вблизи щели присутствует достаточно сильный эффект электронного охлаждения, который оперативно удаляет возбуждения из абсорбера, то возбужденные электроны не успевают размножиться, и квантовая эффективность не превышает единицы. Соответственно выделяют 2 режима работы болометра на основе СИНИС структуры: фотонный счетчик и болометрический режим. Ампер-ваттная чувствительность составляет от $dI/dP = e/hf$ в первом режиме и до e/kT в болометрическом режиме. То есть с ростом частоты эффективность в режиме фотонного счетчика сильно падает. В болометрическом режиме отклик по току, $R_{\text{esp}}I = e/2kT = 2.2 \cdot 10^4$ А/Вт; на половине щели отклик по току $R_{\text{esp}}I = e/0.5\Delta = 5 \cdot 10^4$ А/Вт; а в режиме фотонного счетчика отклик по току ($R_{\text{esp}}I = e/hf$) составляет 762 А/Вт на 350 GHz.

Основные параметры режимов представлены в виде таблицы для частоты сигнала 350 GHz и температуры 280 mK (таблица). Максимум отклика по напряжению взят на половине щели при дифференциальном сопротивлении 35 kΩ для болометра с нормальным сопротивлением в 1 kΩ. Для практического болометра размно-

Отклики по напряжению и току для различных режимов работы СИНИС-болометра

Режим работы	Токовый отклик	dI/dP (А/Вт)	dV/dP (В/Вт)
Фотонный счетчик с эл. охлаждением	e/hf	762	$2.6 \cdot 10^7$
Практический болометр на пол щели $R_d = 35$ kΩ	$2/V_\Delta$	$5 \cdot 10^3$	$1.75 \cdot 10^8$
Квантовый болометр вблизи щели $R_d = 2$ kΩ	$e/2kT$	$2.2 \cdot 10^4$	$4.4 \cdot 10^7$
Электрический болометр на постоянном токе	$2k/(R_{de}\Sigma T^4)$	$3.7 \cdot 10^5$	$1.3 \cdot 10^{10}$

жение горячих электронов идет только до уровня половины щели, где со стороны сверхпроводника находится расходящаяся плотность состояний и все возбужденные электроны туннелируют в систему считывания.

Болометрический режим с высокой квантовой эффективностью можно реализовать с использованием подвешенного абсорбера из тяжелых металлов, в котором велико сопротивление Капицы на границе с алюминиевыми электродами и слабое электрон-фононное взаимодействие. Дополнительно, оптимальное значение сопротивления переходов для реализации квантового режима составляет 5 kΩ, тогда как в образцах с электронным охлаждением сопротивление СИН перехода обычно составляет около 0.5 kΩ.

3. Болометр на основе структуры СИНИС с подвешенным абсорбером

Разработано несколько конструкций и технологий изготовления болометров с подвешенным над подложкой абсорбером из разных материалов (гафний, медь, палладий). Первые образцы СИНИС-болометров с подвешенными абсорберами изготавливались по простой технологии с гафниевым абсорбером и одним жидкостным травлением алюминия под абсорбером. Такие образцы имели ряд недостатков, в том числе отрицательное влияние близко расположенного нормального металла разводки на сверхпроводимость алюминиевых электродов. Следующая конструкция включала уже два травления, первое в кислоте для удаления меди вблизи контактов с антенной и второе в щелочи для травления алюминия под абсорбером [6]. Такая технология позволяет избавиться от частичного подавления сверхпроводимости, но не позволяет использовать благородные металлы для абсорбера, так как их сложно травить в кислоте. Схематичное изображение структуры такого болометра и вид в электронном микроскопе приведено на рис. 2.

Вместо дополнительного травления верхнего слоя нормального металла в последних сериях образцов

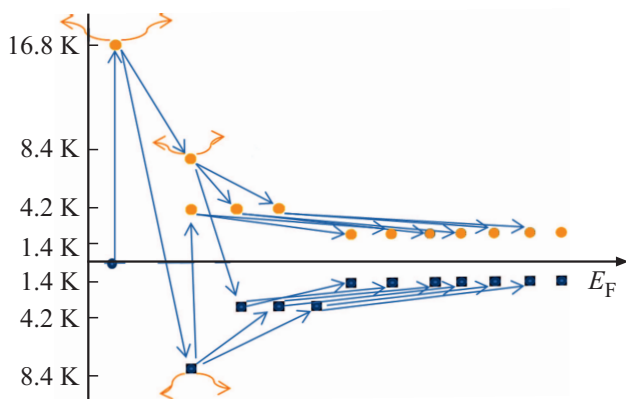


Рис. 1. Схематичное изображение процесса термализации кванта излучения с частотой 350 GHz.

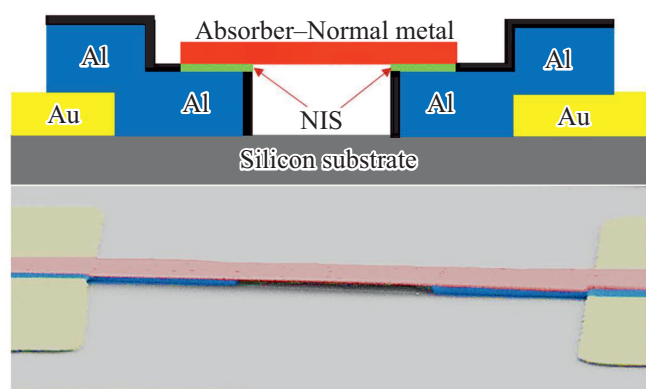


Рис. 2. Схематическое изображение болометра на основе СИНИС структуры и изображение изготовленной структуры в электронном микроскопе.

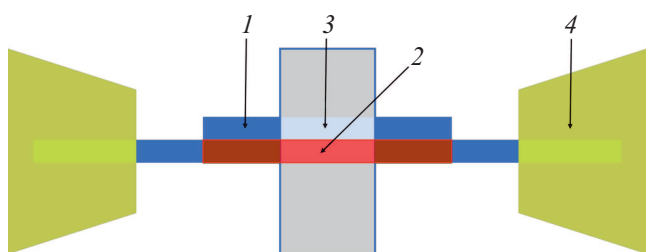


Рис. 3. Схема изготовления СИНИС-болометра с напылением абсорбера под углом.

напыление абсорбера проводилось под углом, чтобы сформировать слой нормального металла только в определенной области. На рис. 3 приведена схема изготовления такой СИНИС структуры: 1 — сначала напыляется золотая разводка и антенны, 2 — через маску резиста под прямым углом напыляется слой Al и проводится окисление для создания барьера, 3 — через эту же маску, но под углом происходит напыление нормального металла (например, Pd), который напыляется только в области „широкого“ окна резиста, 4 — проводится избирательное травление нижнего слоя Al.

Отклик болометров на внешнее излучение на частоте 350 GHz, интегрированных в двойную щелевую антенну или логопериодическую антенну, измерен при температурах 100–500 mK в криостате растворения [7] с использованием черного тела (ЧТ) в качестве источника излучения. Источник представляет собой пленку нихрома на сапфировой подложке. Для устранения фоновой засветки образца между источником и сапфировой линзой, на которой размещался чип, дополнительно помещали диафрагму и полосно-пропускающий фильтр с центральной частотой 350 GHz [8] (рис. 4).

Были измерены отклики по напряжению и току при различных температурах черного тела (различных мощностях излучения, приходящих на антенну с болометром) (рис. 5). Их этих измерений рассчитанная флуктуационная чувствительность составила $1.6 \text{ mK}/\sqrt{\text{Hz}}$, но она ограничена довольно простой системой считывания

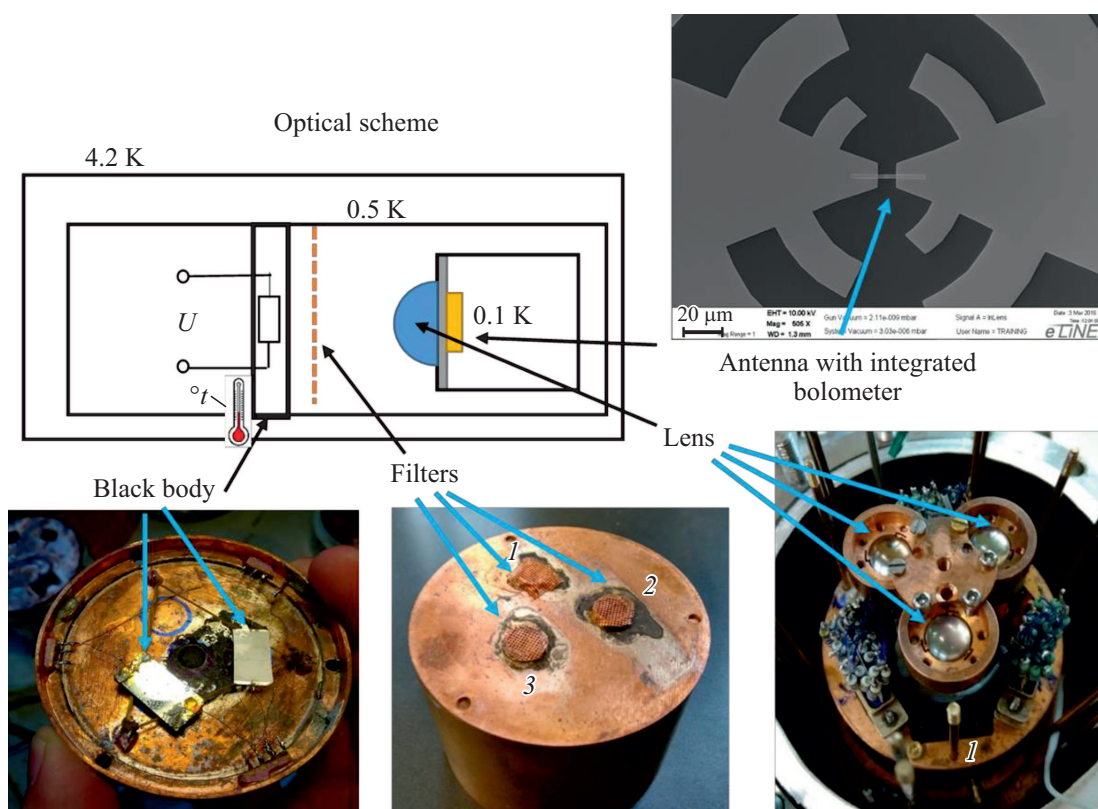


Рис. 4. Оптическая схема измерения отклика на внешнее излучение.

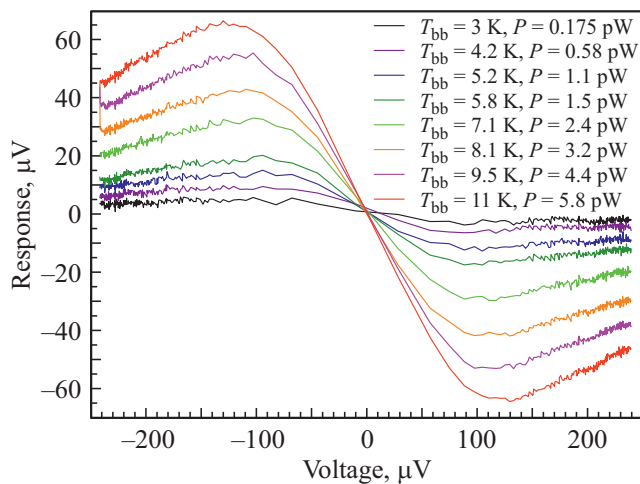


Рис. 5. Отклики по напряжению при температуре 120 мК на излучение ЧТ разной мощности.

на постоянном токе и „теплыми“ усилителями. Отклик по току для болометра с медным абсорбером составил 0.7 нА при рассчитанной мощности излучения 0.06 пВт, что соответствует отклику по току $1.1 \cdot 10^4$ А/Вт. Ток 0.7 нА соответствует $4.3 \cdot 10^9$ электронов в секунду. А мощность 0.06 пВт соответствует $2.8 \cdot 10^8$ квантов с частотой 350 ГГц в секунду. Квантовая эффективность составила более 15 электронов на квант излучения на частоте 350 ГГц.

Наши измерения СИНИС-болометров с подвешенным абсорбером из меди, гафния, палладия подтвердили модель квантового поглощения на частоте 350 ГГц и продемонстрировали высокую квантовую эффективность, достигающую 15 электронов на квант излучения, т.е. в таких СИНИС-болометрах реализуется болометрический режим с высокой квантовой эффективностью.

4. Заключение

Разработаны и исследованы болометры на основе СИНИС структуры с подвешенным абсорбером с амперватной чувствительностью более 10^4 А/Вт на частоте излучения 350 ГГц. Флуктуационная чувствительность составила 1.6 мК/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и ограничивается системой считывания. Измерения СИНИС-болометров с подвешенным абсорбером из меди, гафния, палладия подтвердили модель квантового поглощения на частоте 350 ГГц и продемонстрировали высокую квантовую эффективность, достигающую 15 электронов на квант излучения, т.е. в таких СИНИС болометрах реализуется болометрический режим с высокой квантовой эффективностью.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ РАН (№ 0030-2019-0003). Изготовление и

исследование образцов произведено с использованием уникальной научной установки (УНУ № 352529).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Nahum, J.M. Martinis. Appl. Phys. Lett. **63**, 3075 (1993).
- [2] L.S. Kuzmin. Physica B: Condens. Matter **284**, 2129 (2000).
- [3] L. Kuzmin, D. Golubev. Physica C **372**, 378 (2002).
- [4] И.А. Девятков, П.А. Крутицкий, М.Ю. Куприянов. Письма в ЖЭТФ **84**, 61 (2006).
- [5] M.A. Tarasov, V.S. Edelman, A.B. Ermakov, S. Mahashabde, L.S. Kuzmin. IEEE Transact. Terahertz Sci. Technology **5**, 1, 44 (2014).
- [6] M. Tarasov, V. Edelman, S. Mahashabde, M. Fominsky, S. Lemzyakov, A. Chekushkin, R. Yusupov, D. Winkler, A. Yurgens. Appl. Phys. Lett. **110**, 242601 (2017).
- [7] В.С. Эдельман. Приборы и техника эксперимента **2**, 159 (2009).
- [8] M.A. Tarasov, V.D. Gromov, G.D. Bogomolov, E.A. Otto, L.S. Kuzmin. Instrum. Exp. Techniques **52**, 74 (2009).

Редактор Д.В. Жуманов