

УДК 538.915

*Р. А. Юсупов<sup>1,2</sup>, М. А. Тарасов<sup>2</sup>, М. Ю. Фоминский<sup>2</sup>, В. С. Эдельман<sup>3</sup>*<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН<sup>3</sup>Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН

## Оптический отклик болометра на основе структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл с подвешенным мостиком из нормального металла

Исследован новый тип болометров на основе структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС структура), в которой мостик из нормального металла подвешивается между двумя сверхпроводниковыми электродами. Отсутствие непосредственного контакта нормального металла (абсорбера) и подложки позволяет снизить утечки тепла в подложку. Исследованы болометры, интегрированные в двойную щелевую и в логопериодическую антенны, в терагерцовом диапазоне частот. В качестве сверхпроводника использовался алюминий, в качестве нормального металла исследованы различные материалы, такие как палладий, гафний, медь. Образцы измерены в криостате растворения в диапазоне температур 75–480 мК. Электрический отклик составил более  $10^9$  В/Вт при нагреве структуры постоянным током через дополнительную пару контактов в специальной структуре. Оптический отклик, измеренный на частоте 350 ГГц при температуре 100 мК, составил более  $2 \cdot 10^8$  В/Вт. Токовый отклик при той же мощности излучения составил  $1,1 \cdot 10^4$  А/Вт, квантовая эффективность достигает 15 электронов на квант.

**Ключевые слова:** СИН-переход, болометр, изготовление подвешенных структур, оптический отклик, черное тело.

*R. A. Yusupov<sup>1,2</sup>, M. A. Tarasov<sup>2</sup>, M. Yu. Fominsky<sup>2</sup>, V. S. Edelman<sup>3</sup>*<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University)<sup>1</sup>V. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS<sup>2</sup>P. Kapitza Institute for Physical Problems RAS

## Optical response of a bolometer based on a superconductor–insulator–normal metal structure with a normal metal suspended bridge

The new type of a bolometer with a suspended normal metal thin film bridges between superconducting aluminum electrodes with tunnel barriers forming a SINIS structure are studied. A lack of the direct contact of a normal metal (absorber) and the substrate reduces heat loss to the substrate. The studied bolometers are integrated in dual slot and log periodic antennas in the terahertz frequency range. The aluminum is used as a superconductor, various materials such as palladium hafnium and copper are studied as a normal metal. Samples are measured in a cryostat at temperatures 75–480 mK. The electrical response is higher than  $10^9$  V/W at heating by direct current through an additional pair of contacts in special structure. The optical response is measured at a frequency of 350 GHz at a temperature 100 mK, it is higher than  $2 \cdot 10^8$  V/W. The current response with the same power of radiation is  $1.1 \cdot 10^4$  A/W, the quantum efficiency is up to 15 electrons at the quantum.

**Key words:** NIS junction, bolometer, manufacturing suspended structures, optical response, black body.

## 1. Введение

Ранее болометры на основе структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС) изготавливались с поглотителем из тонкой пленки алюминия, с подслоем окиси хрома или железа для подавления сверхпроводимости. Поглотитель в такой конструкции лежал непосредственно на подложке [1], что влекло за собой большие утечки тепла и в подложку, и в электроды. Предлагается новый тип СИНИС болометра, в котором мостик из нормального металла подвешивается между двумя сверхпроводниковыми электродами. Структуры на основе переходов сверхпроводник–изолятор–нормальный металл (СИН) известны как высокочувствительные приемники терагерцового излучения. В качестве болометров используют симметричную структуру: два СИН-перехода с общим нормальным металлом (СИНИС). Поглощение терагерцового излучения в таких структурах вызывает разогрев абсорбера, который может быть зарегистрирован по увеличению туннельного тока. Обычно для оценки чувствительности считают, что энергия поглощённого излучения эквивалентна нагреву постоянным током. Предполагается, что электронная система перегревается до некоторой повышенной электронной температуры  $T_e$ . В случае довольно высокой энергии фотона  $hf \gg kT$  распределение энергии электронов сложным образом зависит от электрон–электронных, электрон–фононных, фонон–электронных, фонон–фононных взаимодействий и туннелирования возбужденных электронов через СИН-переход. Функция распределения электронов в таком случае может существенно отличаться от функции распределения Ферми. Если снизить утечку тепла через фононную систему в подложку и электроды путем оптимального проектирования абсорбера, то квантовый отклик детектора может быть улучшен вплоть до величины  $hf/kT$  вследствие увеличения числа возбужденных электронов [2].

## 2. Конструкция

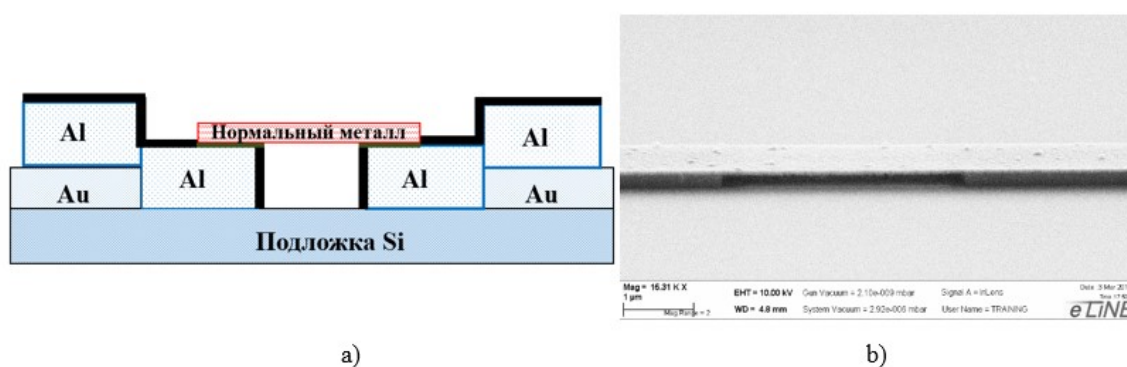


Рис. 1. а – схематическое изображение предлагаемой конструкции болометра, б – СЭМ-изображение изготовленной СИНИС-структуры, снятое под углом 60 градусов. Толщины слоев: Al – 80 нм,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 1 нм, Hf – 20 нм

В данной работе предлагается оригинальный дизайн СИНИС болометров (рис. 1а), процесс изготовления которых несколько проще по сравнению с ранее используемой техникой теневого напыления. Пленки могут быть нанесены различными способами, такими как термическое испарение, электронно-лучевое испарение или магнетронное распыление. Структура обоих слоев может быть сформирована с использованием простого процесса «взрывной» литографии. В первую очередь мы наносим TiAuPd-разводку и контактные площадки, далее в едином вакуумном цикле напыления наносится трехслойная структура алюминий–оксид–нормальный металл. В конце мы избирательно протравливаем слой алюминия под абсорбером в области, определяемой окном в резисте [3]. Алюминий под мостиком полностью удаляется травлением в слабом основании, результаты этого

травления хорошо видны в сканирующем электронном микроскопе (рис. 1b). В дальнейшем был добавлен еще один шаг: травление верхнего слоя нормального металла, который позволил решить нам сразу несколько проблем. Основная проблема изначального варианта была связана с подавлением сверхпроводимости нормальным металлом на границах СИН-переходов. Также с помощью травления абсорбера можно легко менять размеры области СИН-перехода и получать переходы субмикронных размеров.

### 3. Измерения

Болометры, интегрированные в двойную щелевую антенну и в логопериодическую антенну, исследованы в терагерцовом диапазоне частот. В качестве сверхпроводника использовался алюминий, в качестве нормального металла исследованы различные материалы, такие как палладий, гафний, медь. Образцы измерены в криостате растворения в диапазоне температур 75–480 мК. Электрический отклик составил более  $10^9$  В/Вт при нагреве структуры постоянным током через дополнительную пару контактов в специальной структуре. Далее проводились непосредственно измерения отклика на внешнее излучение болометров, интегрированных в двойную щелевую антенну и логопериодическую антенну.

Оптическая схема эксперимента приведена на рис. 2а. Источником излучения было черное тело, расположенное на ступени криостата с температурой 4 К, из широкого спектра которого вырезалась необходимая полоса с помощью фильтров с центральной частотой 350 ГГц. Оптический отклик, измеренный на частоте 350 ГГц при температуре 100 мК, составил более  $2 \cdot 10^8$  В/Вт (рис. 2b). Отклик по току на такой же температуре составил 0,7 нА, что советует чувствительности по току  $1,1 \cdot 10^4$  А/Вт. Ток 0,7 нА – это  $4,3 \cdot 10^9$  электронов в секунду, а мощность 0,6 пВт соответствует  $2,8 \cdot 10^8$  квантов с частотой 350 ГГц в секунду, следовательно, квантовая эффективность достигла 15 электронов на квант. Достигнутая эффективность заметно выше значений 1–2 электрона на квант в традиционных СИНИС-болометрах и приближается к теоретическим оценкам в статье [1].

Также для практических применений важно оценить шумы в системе. Мы оцениваем низкочастотные шумы на уровне  $20$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$  в нашей системе (складываются из собственных шумов усилителя и внешних наводок). Для измеренной вольт-ваттной чувствительности более  $2 \cdot 10^8$  В/Вт получим значение МЭШ =  $2 \cdot 10^{-8} / 2 \cdot 10^8 = 10^{-16}$  Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Кроме того, полезно оценить температурную чувствительность, которая представляет интерес для практической астрономии. При нагреве черного тела с 4,7 К до 5,8 К значение отклика 14 мкВ, т.е.  $dV/dT = 14,7$  мкВ/К. Взяв шумы  $20$  нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , получаем эквивалентную шуму температуру NET =  $2 \cdot 10^{-8} / 14,72 \cdot 10^{-6} = 1,57 \cdot 10^{-3}$  К/ $\sqrt{\text{Гц}}$ .

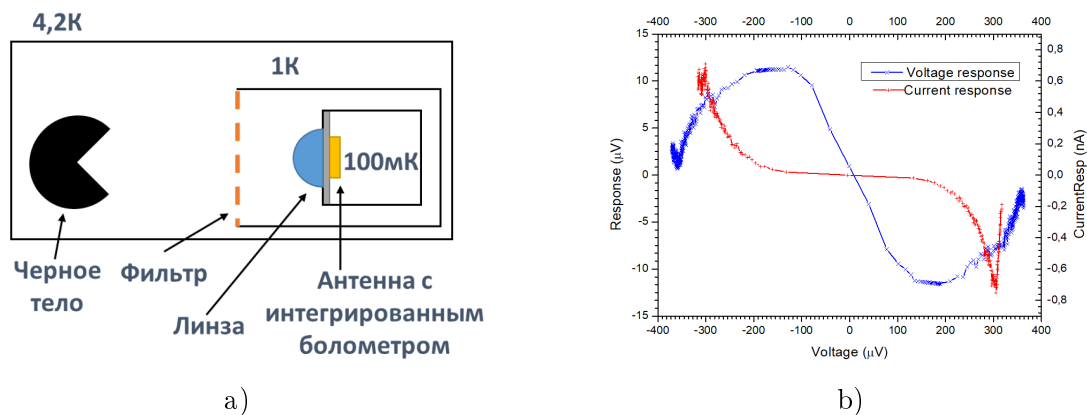


Рис. 2. а – оптическая схема измерений в криостате, б – оптический отклик по напряжению и току болометра с медным абсорбером в логопериодической антенне на температуру черного тела 4,5 К

#### 4. Моделирование

Также было проведено численное моделирование основных характеристик двойных щелевых антенн с «неизлучающей» щелью (рис. 3а), использованных в наших работах. Приведенные ниже расчеты были проведены для оценки согласования используемых планарных антенн с изготовленными болометрами. Моделировалась планарная антенна из золота толщиной 1 мкм на кремниевой подложке толщиной 300 мкм.

Данная антенна изначально проектировалась на центральную частоту около 350 ГГц. Был произведен расчет импеданса как используемой конструкции, так и классической без дополнительных щелей. По результатам нашего численного моделирования (рис. 3б) первый резонанс был на низких частотах около 150 ГГц, который для нас является паразитным, так как он очень узкополосный и высокоомный. Мы стремимся получить согласование как можно в более широкой полосе и с умеренным сопротивлением нагрузки, что и реализуется на искомым 350 ГГц. На искомой частоте мы хотим получить действительный импеданс, который согласуется с нагрузкой и мнимая часть которого сводится к минимуму. Соответственно действительная часть на этой частоте составляет 100 Ом. Типичное сопротивление абсорбера шириной 1 мкм для нашего болометра составляет порядка 10–20 Ом для медных мостиков и до 50 Ом для образцов, где в качестве нормального материала использовался гафний.

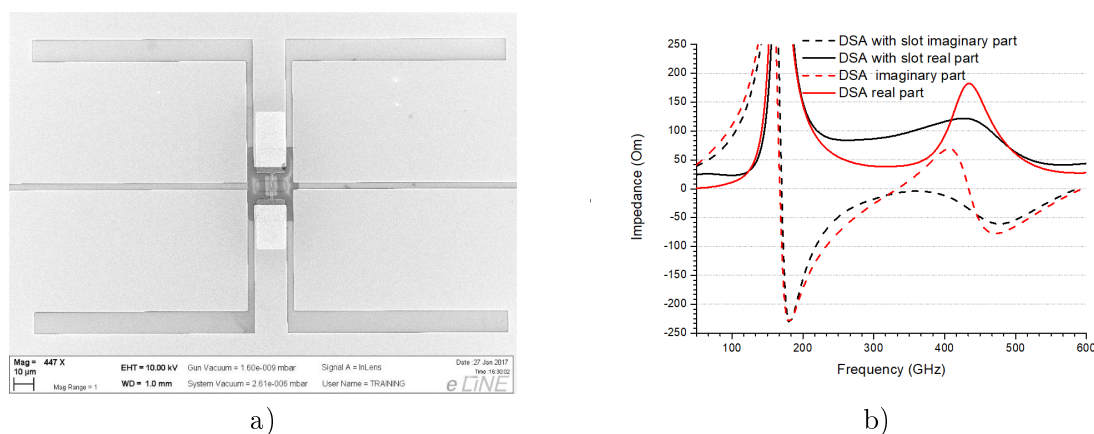


Рис. 3. а – вид используемой двойной щелевой антенны, б – расчет действительной и мнимой частей импеданса используемой двойной щелевой антенны

#### 5. Заключение

Для использования СИНИС-структур в качестве болометров целесообразно уменьшить объем абсорбера и увеличить его электрическое сопротивление для лучшего согласования с импедансом планарной антенны. С помощью вышеописанной методики были изготовлены СИНИС-структуры с лучшим отношением сопротивлений туннельных переходов ( $R_d/R_n$ ) порядка  $10^4$  при температурах 100 мК и сопротивлением абсорбера 10–50 Ом. Структуры с такими параметрами подходят для криогенных болометров терагерцового диапазона, интегрированных с планарными антеннами, при этом техника изготовления проще по сравнению с традиционной технологией теневого напыления. Была исследована температурная зависимость дифференциального сопротивления и продемонстрировано наличие эффекта андреевского отражения при температурах ниже 150 мК. Был измерен отклик на нагрев постоянным током в тестовых структурах, он составил более  $10^9$  В/Вт. Далее был измерен отклик на излучение черного тела на частоте 350 ГГц. Он составил  $2 \cdot 10^8$  В/Вт, при этом отклик составил 12 мкВ при температуре черного тела 4,7 К. МЭШ составила менее  $10^{-16}$  Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , а  $\text{NET} = 1,57 \cdot 10^{-3}$  К/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Точковый отклик в той же структуре достигает  $1,1 \cdot 10^4$  А/Вт при мощности падающего излучения 0,6 пВт. Достигнута

квантовая эффективность более 15 электронов на квант. Различие электрического и оптического откликов связано с рассогласованием в структурах и измерениях. Один из важных факторов – несогласованность импедансов антенны и нагрузки. Как было показано в ходе численного моделирования, оптимальная нагрузка используемой антенны составляет 100 Ом. Импеданс наших болометров на частоте 350 ГГц определяется в основном активной частью сопротивления – сопротивлением абсорбера, которое в зависимости от материала составляло 10–50 Ом.

---

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 32 «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологии». Проект «ПРИЗ».

## Литература

1. *Tarasov M.A., Kuzmin L.S., and Kaurova N.S.* Thin multilayer aluminum structures for superconducting devices // *Instruments and Experimental Techn. El.* 2009. V. 52, N 6. P. 877–881.
2. *Devyatov I.A., Kupriyanov M.Y.* High-sensitivity microwave detector based on a Josephson heterostructure // *JETP Letters.* 2009. V. 89, N 9. P. 451–456.
3. *Nguyen H.Q., Pascal L.M.A., Peng Z.H., Buisson O.* Etching suspended superconducting tunnel junctions from multilayer // *Appl. Phys. Lett.* 2012. P. 100. 252602.

## References

1. *Tarasov M.A., Kuzmin L.S., and Kaurova N.S.* Thin multilayer aluminum structures for superconducting devices. *Instruments and Experimental Techn. El.* 2009. V. 52, N 6. P. 877–881.
2. *Devyatov I.A., Kupriyanov M.Y.* High-sensitivity microwave detector based on a Josephson heterostructure. *JETP Letters.* 2009. V. 89, N 9. P. 451–456.
3. *Nguyen H.Q., Pascal L.M.A., Peng Z.H., Buisson O.* Etching suspended superconducting tunnel junctions from multilayer. *Appl. Phys. Lett.* 2012. P. 100. 252602.

Поступила в редакцию 15.03.2018