

## БОЛОМЕТР НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ СВЕРХПРОВОДНИК-ИЗОЛЯТОР-НОРМАЛЬНЫЙ МЕТАЛЛ С ПОДВЕШЕННЫМ МОСТИКОМ ИЗ НОРМАЛЬНОГО МЕТАЛЛА

Р. А. Юсупов<sup>1,2</sup>, М. Ю. Фоминский<sup>1</sup>, В. С. Эдельман<sup>3</sup>, М. А. Тарасов<sup>1,3,4</sup>, А. А. Юргенс<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет),  
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

<sup>3</sup> Институт физических проблем им. П.Л.Капицы РАН,  
117334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2,

<sup>4</sup> Чалмерский технологический университет, 41296, Гётеборг, Швеция

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2017 г., после доработки – 7 марта 2017 г.

**Аннотация:** 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 антенну и в логопериодическую антенну, в терагерцовом диапазоне частот. В качестве сверхпроводника использовался алюминий, в качестве нормального металла исследованы различные варианты, 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.

**Abstract.** New type of bolometer with a suspended normal-metal thin film bridges between superconducting aluminum electrodes with tunnel barriers forming a SINIS

structure was studied. The lack of direct contact of a normal metal (absorber) and the substrate reduce heat loss to the substrate. Studied bolometers were integrated in dual slot and log-periodic antenna in the terahertz frequency range. The aluminum was used as the superconductor, various options, such as palladium, hafnium and copper studied as a normal metal. Samples were measured in a cryostat at temperatures 75-480 mK. Electric response was more than  $10^9$  V/W by heated direct current through an additional pair of contacts in a special structure. Optical response was measured at a frequency of 350 GHz at a temperature of 100 mK, it was more than  $2 \cdot 10^8$  V/W. The current response at the same power of radiation was  $1.1 \cdot 10^4$  A/W, the quantum efficiency was up to 15 electrons at the quantum.

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

## 1. Введение

Структуры на основе переходов сверхпроводник - изолятор - нормальный металл (СИН) могут быть использованы как высокочувствительные приемники терагерцового излучения. Традиционно в качестве болометров используют симметричную структуру - два 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, фононных-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, квантовый отклик детектора может быть улучшен вплоть до величины  $hf/kT$  вследствие увеличения числа возбужденных электронов [1].

Например, снижение потерь тепла из абсорбера может быть достигнуто традиционным способом – при помощи SiN мембраны, которая крепится тонкими металлическими полосками к подложке [2]. При такой конструкции объем и теплоемкость поглотителя вместе с мембраной уменьшается по сравнению с абсорбером на толстой кремниевой подложке [3]. Дальнейшее улучшение может быть достигнуто, если поглотитель подвешивается без какой-либо поддерживающей мембраны или подложки.

Попытки изготовления подвешенных мостов или нано-механических пучков предпринимались и ранее. В качестве примера можно упомянуть статью [4], где подвешивалась медная нанопроволока  $10 \times 0,3 \times 0,03$  мкм<sup>3</sup> над большой SiN мембраной, и было продемонстрировано эффективное электронное охлаждение по сравнению с обычными конструкциями. Другим примером является подвешенный мост AuPd толщиной 50 нм [5]. Существуют также подвесные одноэлектронные транзисторы [6], изготовленные с помощью реактивного ионного травления кремниевой подложки под 100 нм островом. Другой метод был использован в [7], в котором подвесной мост получался посредством сухого травления нижнего слоя органического полимера в кислородной плазме. Наконец, отметим успешное химическое травление 100 нм алюминиевого слоя, покрытого 100 нм слоем меди [8]. В качестве альтернативы технике SiN мембраны можно также упомянуть подвесные конструкции, которые поддерживаются снизу слоем оксида кремния, оставшегося после травления с обратной стороны в плазме SF<sub>6</sub> [9].

Для электрона, который поглощает фотон с частотой 350 ГГц, время электрон-фононного и электрон-электронного взаимодействия составляет около 0,2 и 1 нс соответственно при электронной температуре более 3 К. Возбужденный электрон создает высокоэнергичные фононы, которые могут легко покинуть абсорбер, если он помещен на подложку или подключен к

электродам из того же материала [10]. Использование материала абсорбера, отличного от материала электродов, может улучшить теплоизоляцию вследствие высокого несоответствия акустических импедансов и большего сопротивления Капицы между абсорбером и электродом. Ранее болометры изготавливались с поглотителем из тонкой пленки алюминия, с подслоем окиси хрома или железа для подавления сверхпроводимости [11], что влекло за собой большие утечки тепла и в подложку, и в электроды (рис. 1).

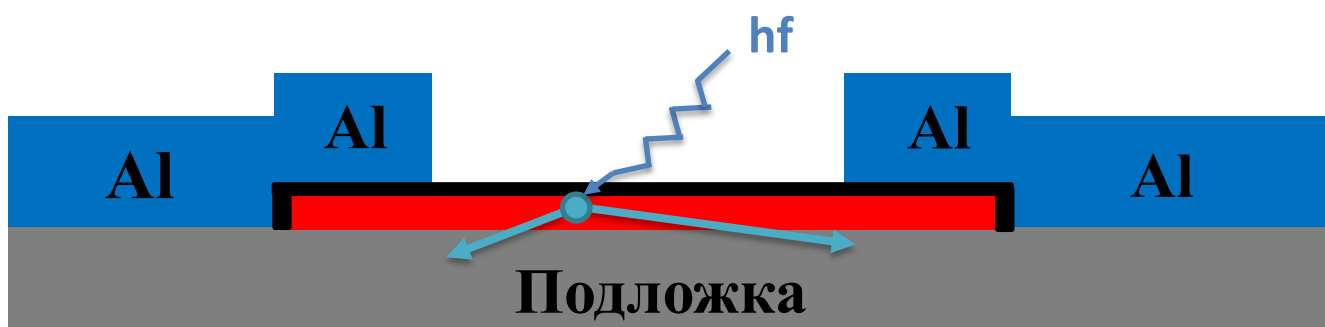


Рис. 1. Ранее исследованный СИНИС болометр с абсорбером (красный) и сверхпроводящими Al электродами (синие) на кремниевой подложке (серый). Абсорбер окисляется до сверхпроводящего электрода с образованием туннельного барьера.

## 2. Изготовление

В данной работе предлагается альтернативный по сравнению с рис.1 дизайн СИНИС болометров. Процесс изготовления несколько проще по сравнению с традиционной техникой теневого напыления. Пленки могут быть нанесены различными техниками напыления, такими как термическое испарение, электронно-лучевое испарение или магнетронное распыление. Структура обоих слоев может быть сделана с использованием простого процесса «взрывной» литографии.

На рис. 2 показан схематический вид предлагаемой компоновки: в первую очередь мы наносим TiAuPd разводку и контактные площадки, далее в едином цикле напыления, без разрыва вакуума наносится трехслойка

Al/оксид/нормальный металл. В конце мы избирательно протравливаем слой алюминия под абсорбером в области, определяемой окном в резисте. Алюминий под мостиком полностью удаляется травлением в слабом основании (Microposit MF CD 26 developer). Травление Al в кислотах не использовалось, так как оно было неуправляемым и невоспроизводимым. С уменьшением толщины абсорбера до 20 нм и ниже проблемы сушки после травления становятся решающими. Сухое травление в плазме не применяется из-за её анизотропии и малых подтравов. Капиллярные силы приводят к провисанию мостов и их прилипанию к подложкам. Чтобы избежать этого, мы использовали сушку в критической точке в жидком CO<sub>2</sub>.



Рис. 2. Схематическое изображение конструкции болометра, окончательная версия. Серый – кремниевая подложка, желтый – золотая разводка и антенны, синий – сверхпроводящий алюминий, красный – нормальный абсорбер (медь, палладий, или гафний), зеленый – область туннельного барьера, черный – окисел на поверхности алюминия.

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 с субмикронными размерами. На рис.3 представлена схема травления, травление нормального металла – меди производилось в азотной кислоте, разбавленной в пропорциях 1 к 30.

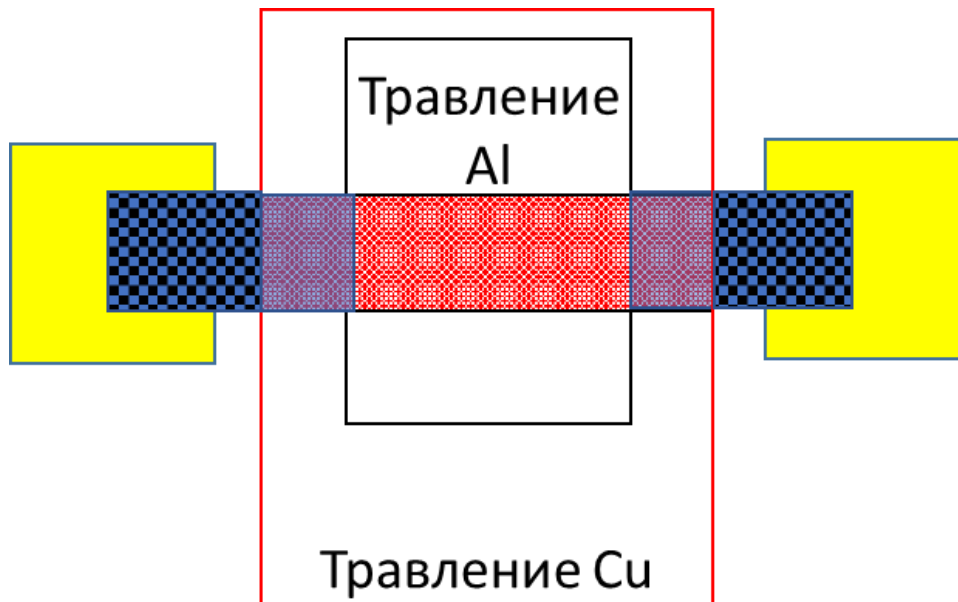


Рис. 3. Схема изготовления СИНИС структуры с двумя травлениями.

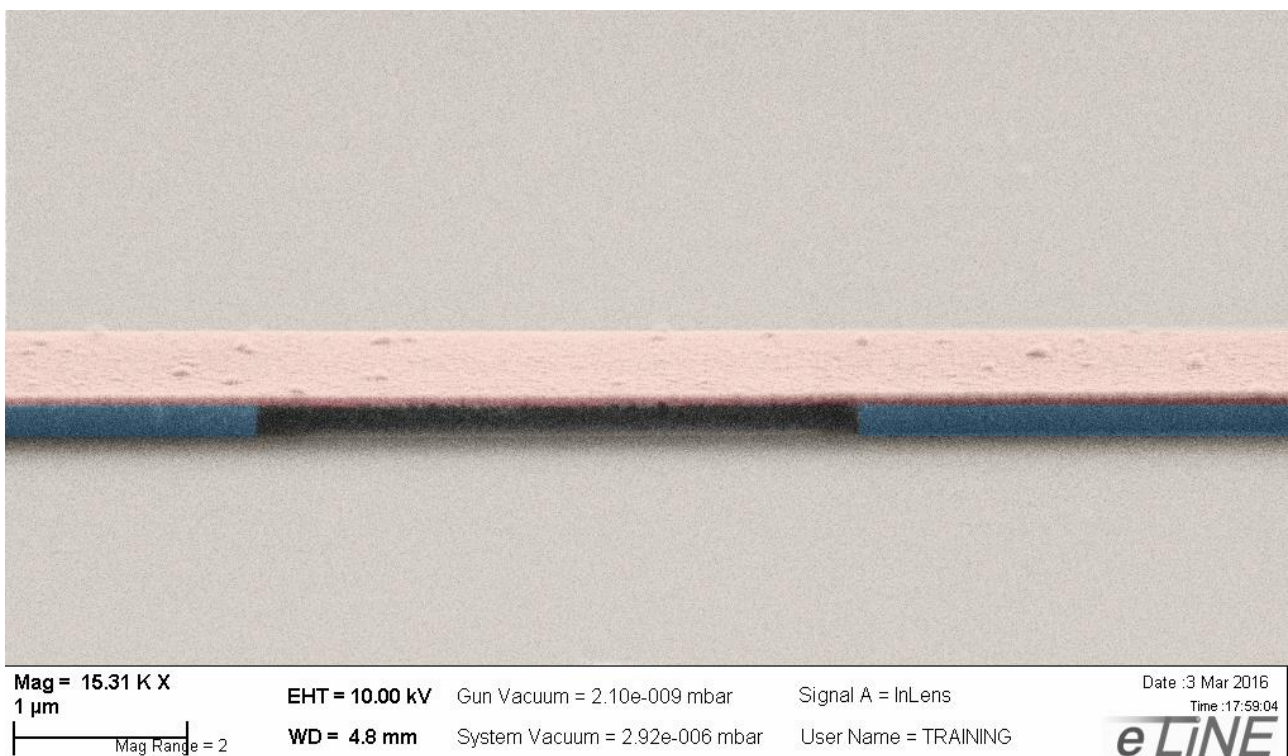


Рис. 4. СЭМ-изображение изготовленной СИНИС структуры, снятое под углом 60 градусов. Толщина слоев Al – 80 нм,  $Al_2O_3$  ~ 1 нм, Hf – 20 нм.

Результаты травления видны в сканирующем электронном микроскопе (рис. 4). В качестве нормального металла исследовались палладий, медь, гафний. Медь удобный материал с точки зрения технологи, но, к сожалению, данный материал слишком пластичен, и мостики из данного материала в

процессе сушки часто прилипают к подложке. Мостики из гафния более жесткие и лучше сохраняются в процессе сушки, к тому же обладают большим сопротивлением, но материал сложнее для напыления.

### 3. Измерения

Измерения проводились при низких температурах (75 мК – 500 мК) [12] в криостатах растворения. Измерения проводились по постоянному току в режиме задания тока. Схема измерений представлена на рис.5. Была возможность задания диапазона тока выбором соответствующего последовательного сопротивления в диапазоне 200 кОм – 10 ГОм.

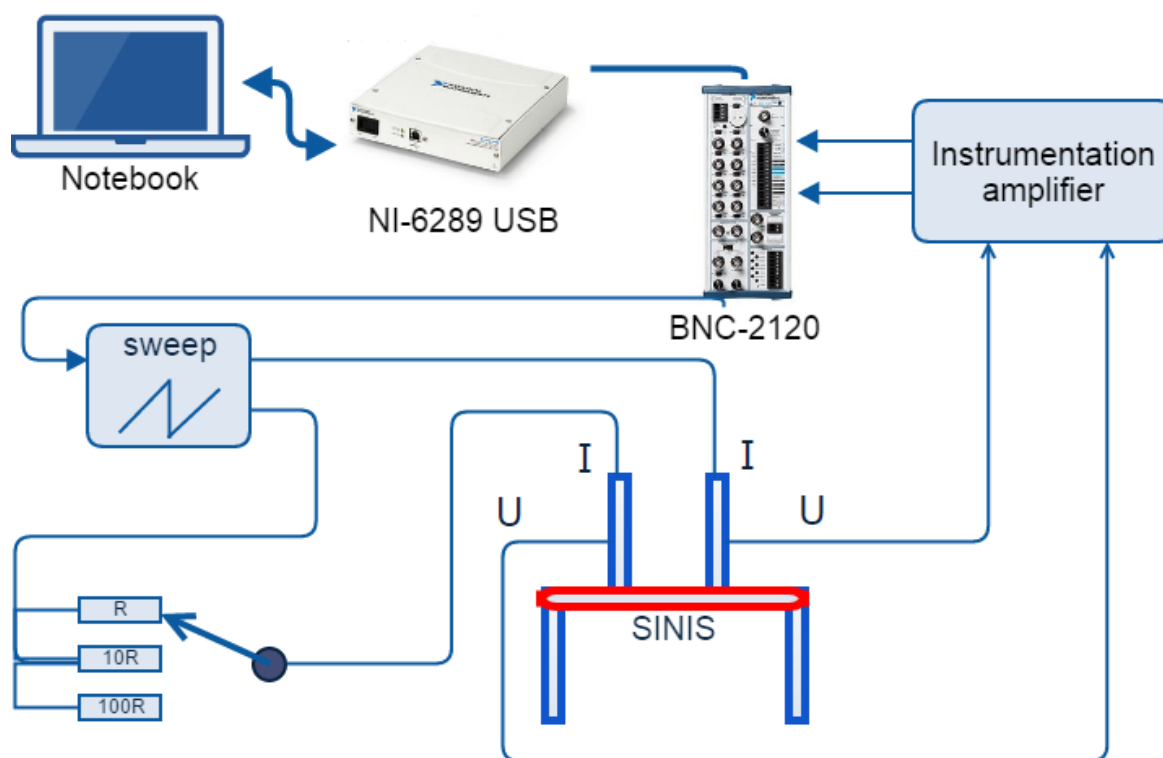


Рис. 5. Измерительная схема для снятия характеристик с СИНИС структуры.

Для снятия и обработки характеристик использовался программный пакет IRTECON [13]. Вид типичной вольт - амперной характеристики и дифференциальное сопротивление измеренное при 120 мК представлено на рис.6. Такие измерения очень чувствительны к значению сопротивления, через которое задается ток при комнатной температуре, что видно при различных сопротивлениях: 2 МОм, 20 МОм, 200 МОм, 2 ГОм, 10 ГОм. С сопротивлением 10 ГОм уровень шумов ниже, но диапазон тока весьма мал.

Уменьшение задающего сопротивления смещения приводит к подавлению максимального динамического сопротивления с 300 кОм до 20 кОм.

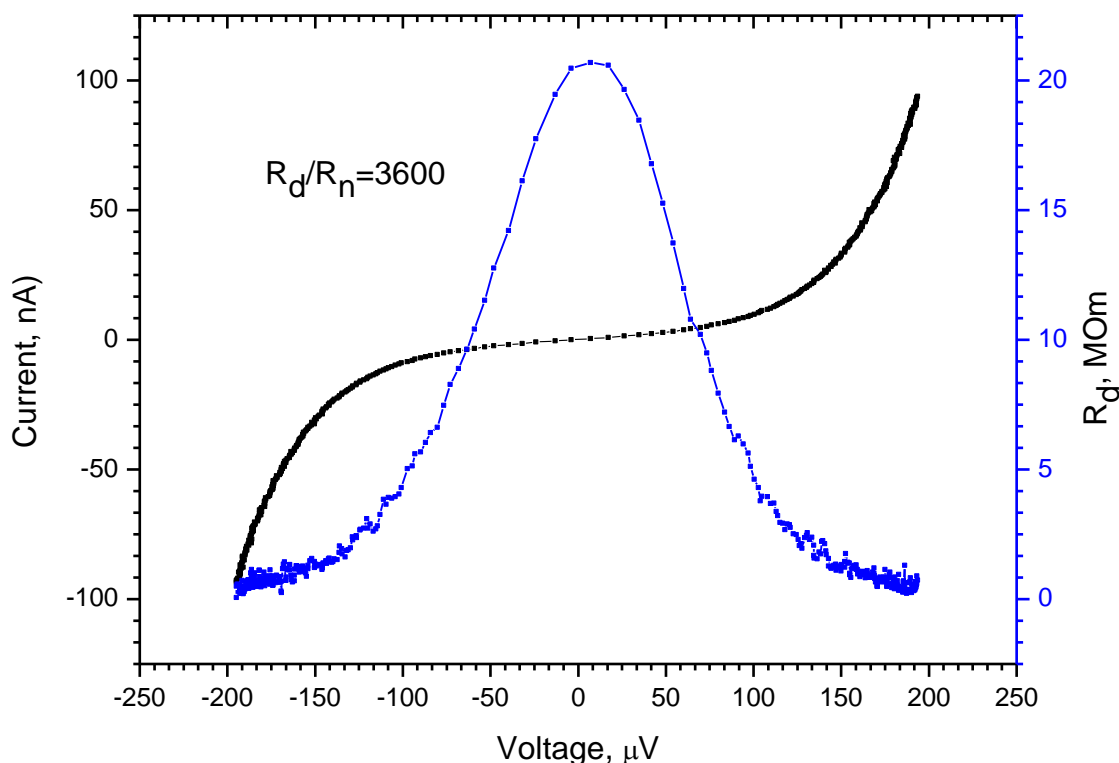


Рис. 6. ВАХ и дифференциальное сопротивление при 120 мК.

Приведена температурная зависимость дифференциального сопротивления в диапазоне температур 133-480 мК (рис. 7), асимптотическое сопротивление соответствует двум СИН переходам, участку абсорбера и подводящим проводам. Также на данной кривой виден характерный провал около нуля напряжения при низких температурах. Данный эффект указывает на присутствие андреевского отражения в таких структурах [14]. Физически это означает, что на границе налетающая квазичастица находит себе парную частицу и вместе с ней переходит в конденсат, а образующаяся дырка возвращается в нормальный металл. Наш опыт говорит о том, что такой же эффект имеет место и в СИН переходах, несмотря на наличие слоя изолятора между сверхпроводником и нормальным металлом (рис. 8). Для исследования этого эффекта была снята зависимость дифференциального сопротивления от магнитного поля (рис. 9), для этого криостат помещался в поле электромагнита.



Отметим, что при магнитных полях 0,24 мТл исчезает аномальная проводимость около нуля напряжений.

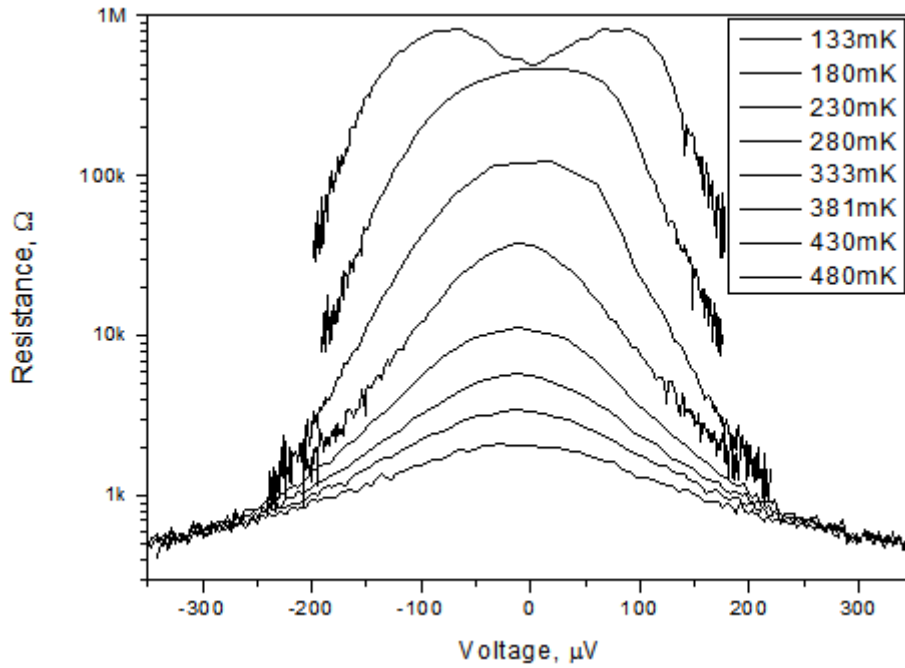


Рис.7. Температурные зависимости динамического сопротивления в диапазоне 133-480 мК.

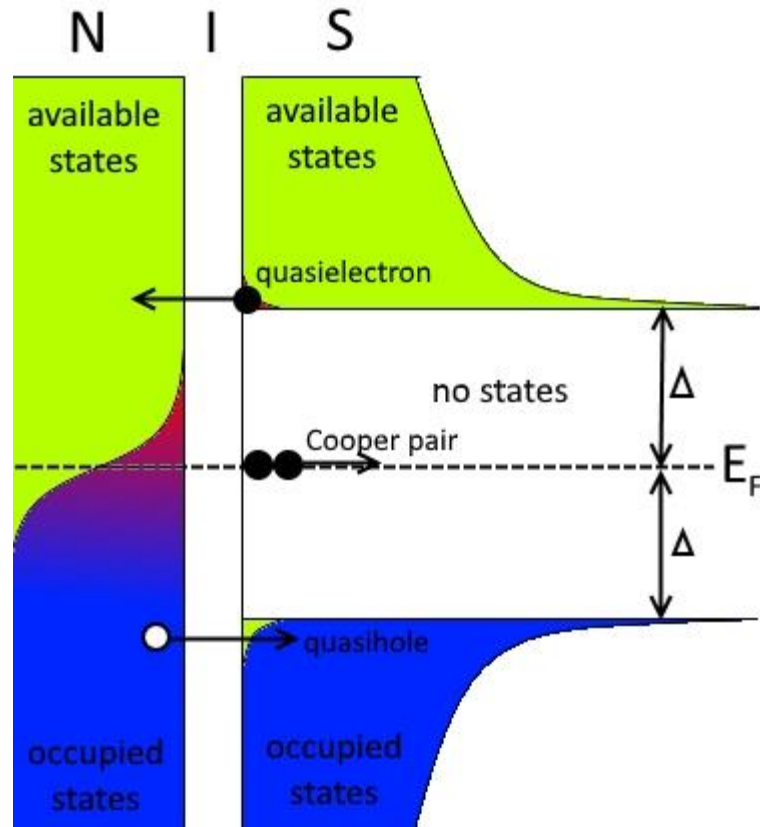


Рис.8. Энергетическая диаграмма СИИ перехода со схематичным изображением процессов Андреевского охлаждения.

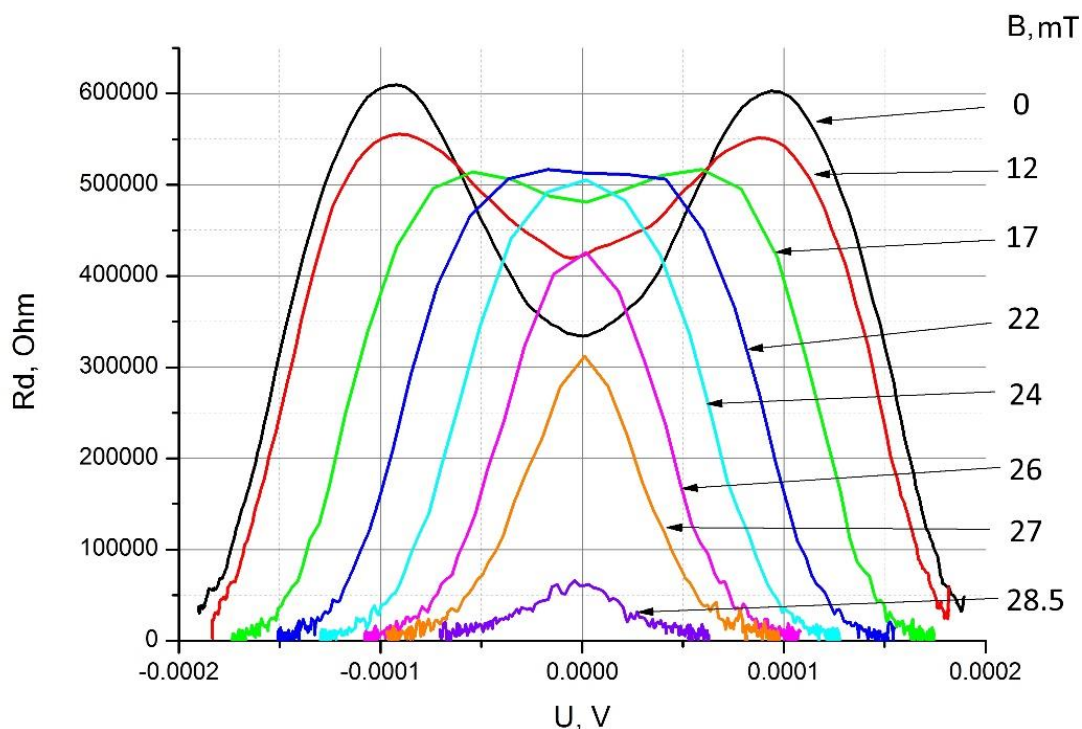


Рис.9. Зависимость дифференциального сопротивления от внешнего продольного магнитного поля.

#### 4. Электрический и оптический отклик

Основная характеристика болометра – это величина отклика на внешнее излучение. Для оценки максимального оптического отклика изготовленных структур был исследован отклик на нагрев болометра постоянным током. Данные измерения проводились в двойных СИНИС структурах с общим слоем нормального металла. В данной структуре (рис. 10) есть возможность задания постоянного тока через одну пару переходов (внешних) и измерение характеристик другой пары, в зависимости от приложенного тока. Возможны различные конфигурации измерений в данной структуре. Вольт-ваттная чувствительность составила более  $10^9$  В/Вт при токе мощностью 10 фВт в наших измерениях. На рис. 11 приедена ВАХ и характерная кривая отклика на нагрев при температуры 75 мК.

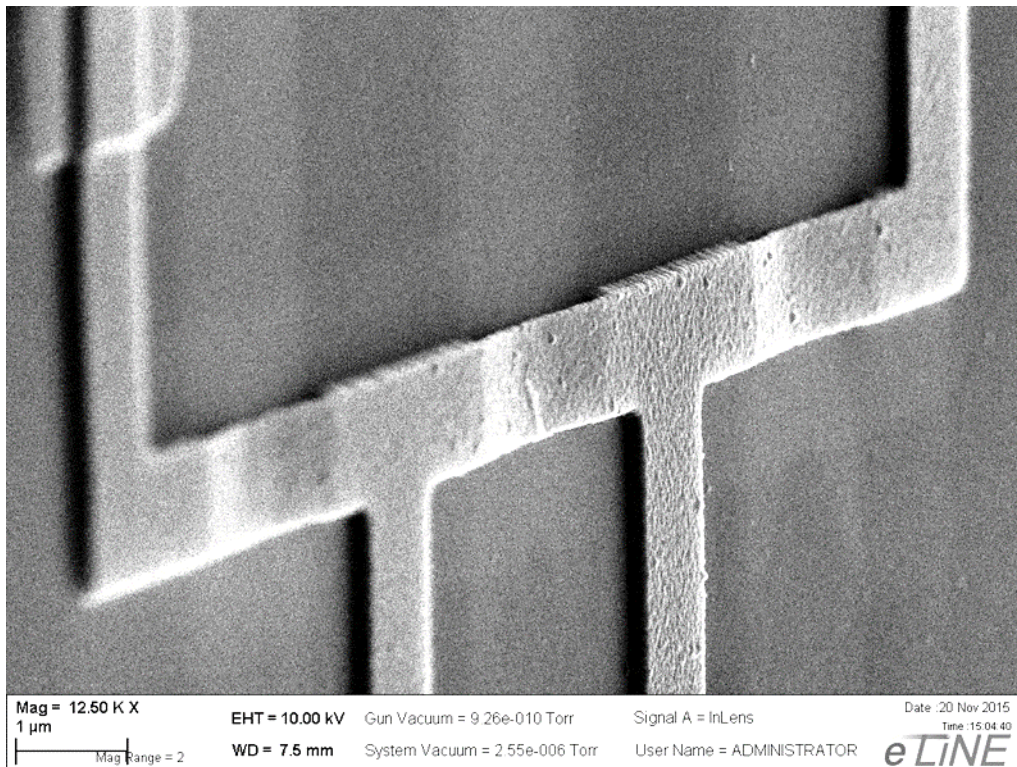


Рис. 10. Вид двойной СИНИС структуры, в которой проводили измерения на нагрев постоянным током.

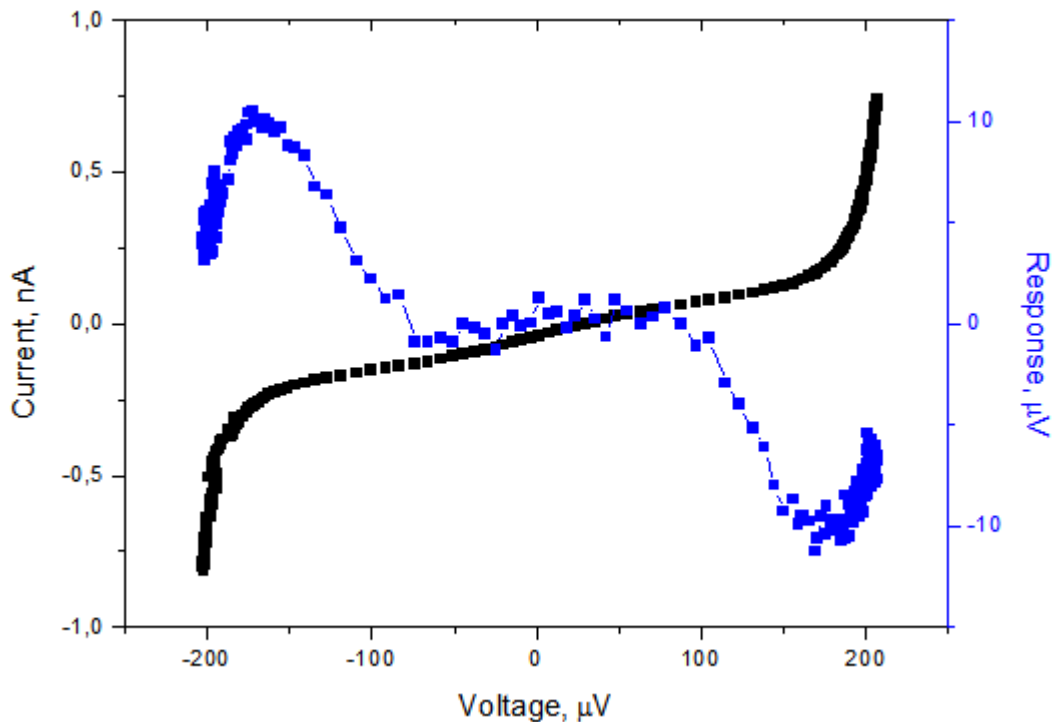


Рис 11. Отклик болометра с гафниевым абсорбером на нагрев постоянным током при температуре 75 мК. Соответствующий отклик составил более  $10^9$  В/Вт

Далее проводились непосредственно измерения отклика на внешнее излучение болометров, интегрированных в двойную щелевую антенну и

логопериодическую антенну. Оптическая схема эксперимента приведена на рис. 12. Источником излучения было черное тело, расположенное на 4 К ступени криостата, из широкого спектра которого вырезалась необходимая частота с помощью фильтров на частоту 350 ГГц.

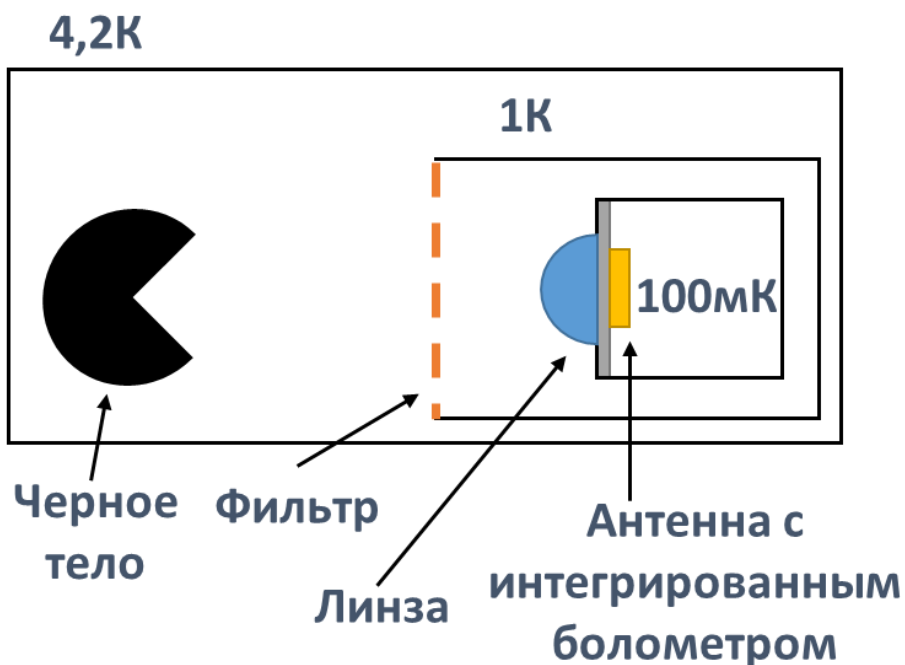


Рис. 12. Оптическая схема измерений.

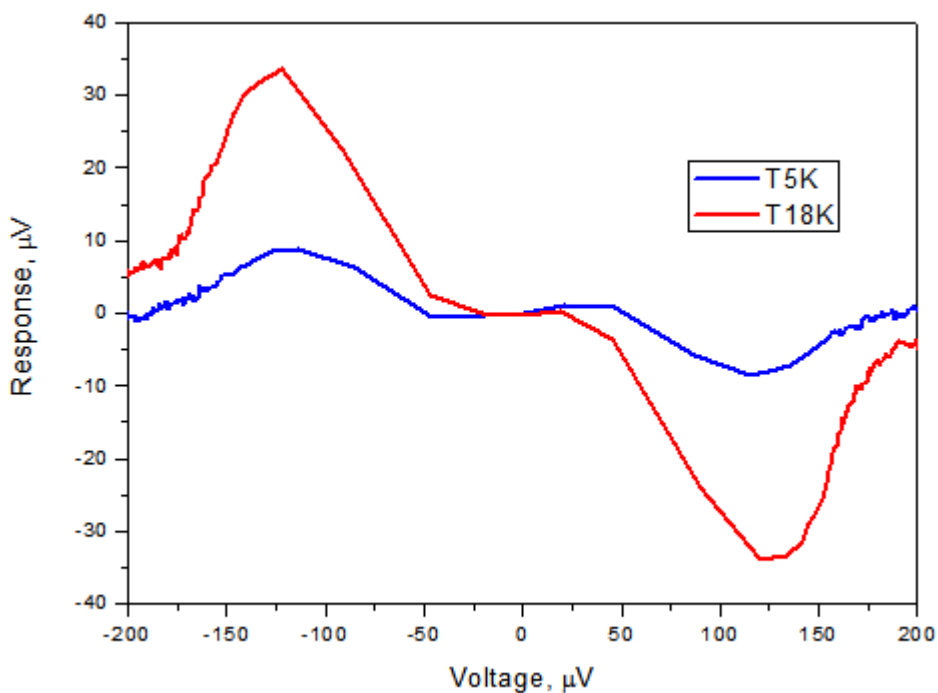


Рис. 13. Оптический отклик болометра с гафниевым абсорбером.

Чувствительность достигает  $10^8$  В/Вт

В структуре с гафниевым абсорбером лучший измеренный отклик составил более  $10^8$  В/Вт (рис. 13). Мощность, попадающая на антенну, рассчитывалась по формуле Планка с учетом геометрии установки и с учетом полосового фильтра. В данных расчетах не учитывалось согласование антенны и болометра, которое в случае медных абсорберов составляло 0,55, а для образцов с гафнием порядка 0,85.

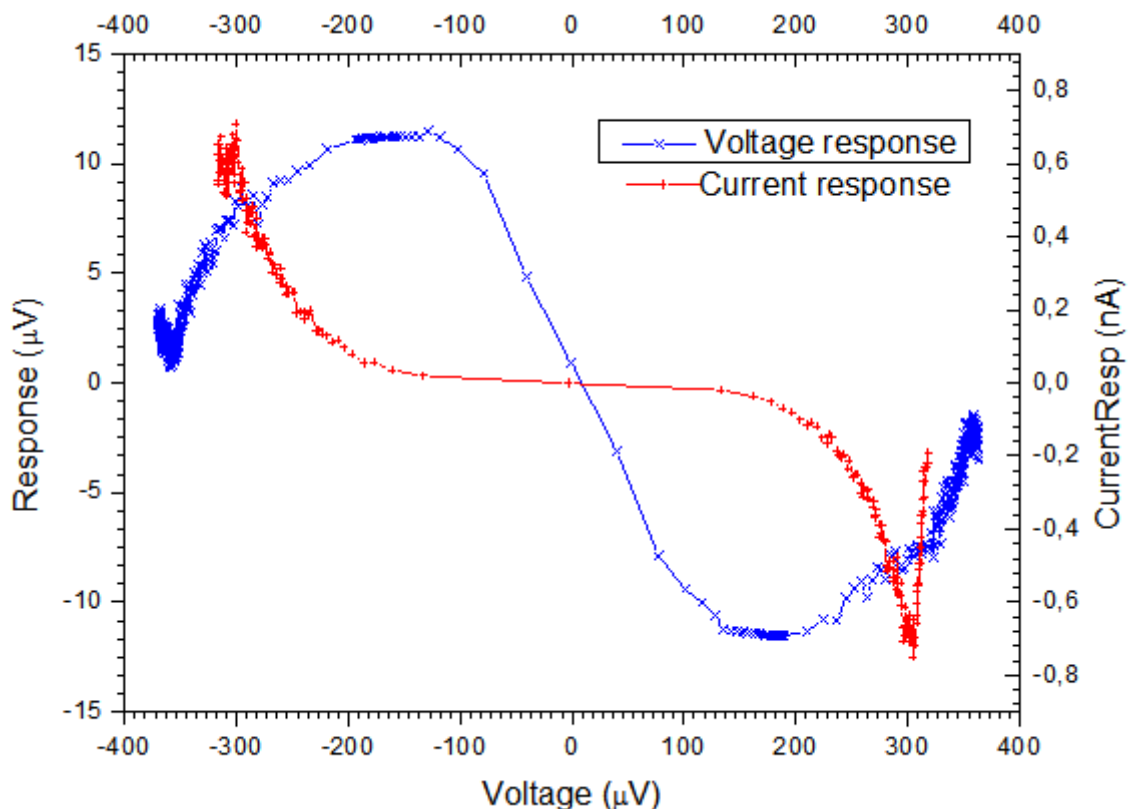


Рис.

14. Оптический отклик по напряжению и току болометра с медным абсорбером в логопериодической антенне на температуру черного тела 4,5 К.

В дальнейшем, после оптимизации измерений и в более поздних версиях изготовленных образцов удалось достигнуть отклика по напряжению 12 мкВ (Рис. 14) для температуры черного тела 4,5 К уже в образцах и с медным абсорбером. В данном случае, мы говорим о оптическом отклике не менее  $2 \cdot 10^8$  В/Вт при рассчитанной мощности 0,6 пВт, так как реально мощность, приходящаяся на болометр, была меньше чем в расчетах из-за выше обозначенных факторов. Отклик по току на такой температуре составил 0,7 нА,



что советует  $1,1 \cdot 10^4$  А/Вт чувствительности по току. 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 в традиционных болометрах и приближается к теоретическим оценкам в статье [1].

## 5. Моделирование

Также было проведено численное моделирование основных характеристик двойных щелевых антенн с «неизлучающей» щелью, использованных в наших работах (рис 15). Данные расчеты были проведены для выяснения согласования используемых планарных антенн с изготовленными болометрами. Моделировалась планарная антенна из золота толщиной 1 мкм на кремневой подложке толщиной 300 мкм.

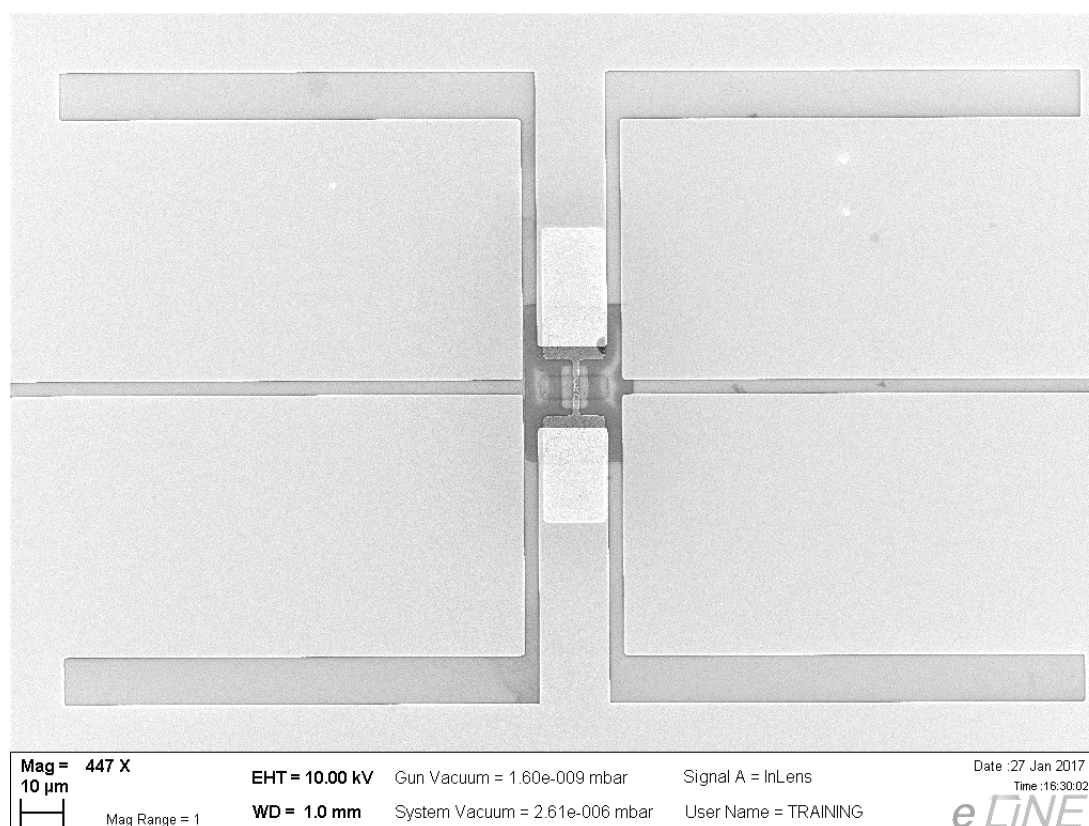


Рис. 15. Вид двойной щелевой антенны с интегрированным болометром.

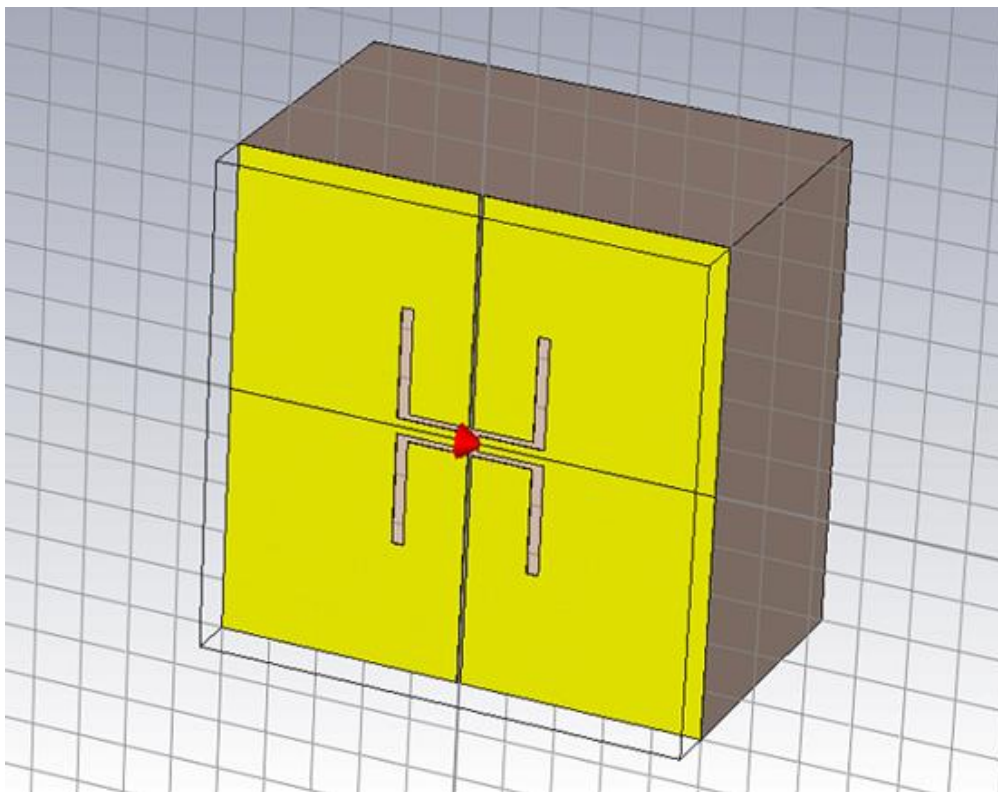


Рис. 16. Вид моделируемой структуры в программе CST Studio.

Данная антенна изначально проектировалась на центральную частоту около 350 ГГц. Был произведен расчет импеданса как используемой конструкции (рис. 16) так и классической, без дополнительных щелей. По результатам нашего численного моделирования (рис. 17) первый резонанс был на низких частотах около 150 ГГц и нам не актуален, так как мы работаем с фильтрами с центральной полосой 350 ГГц. По результатам расчета импеданса в этой области мы видим, что явного резонанса нет, в отличие от классической конструкции, но мнимая часть импеданса стремится к нулю при примерно 360 ГГц. Данная особенность возникает из дополнительной щели, которая используется для интеграции болометра. Соответственно действительная часть на этой частоте составляет 100 Ом. Типичное сопротивление абсорбера шириной 1 мкм, для нашего болометра составляет порядка 10 Ом для медных вариантов и до 50 Ом для образцов, где в качестве нормального материала использовался гафний.

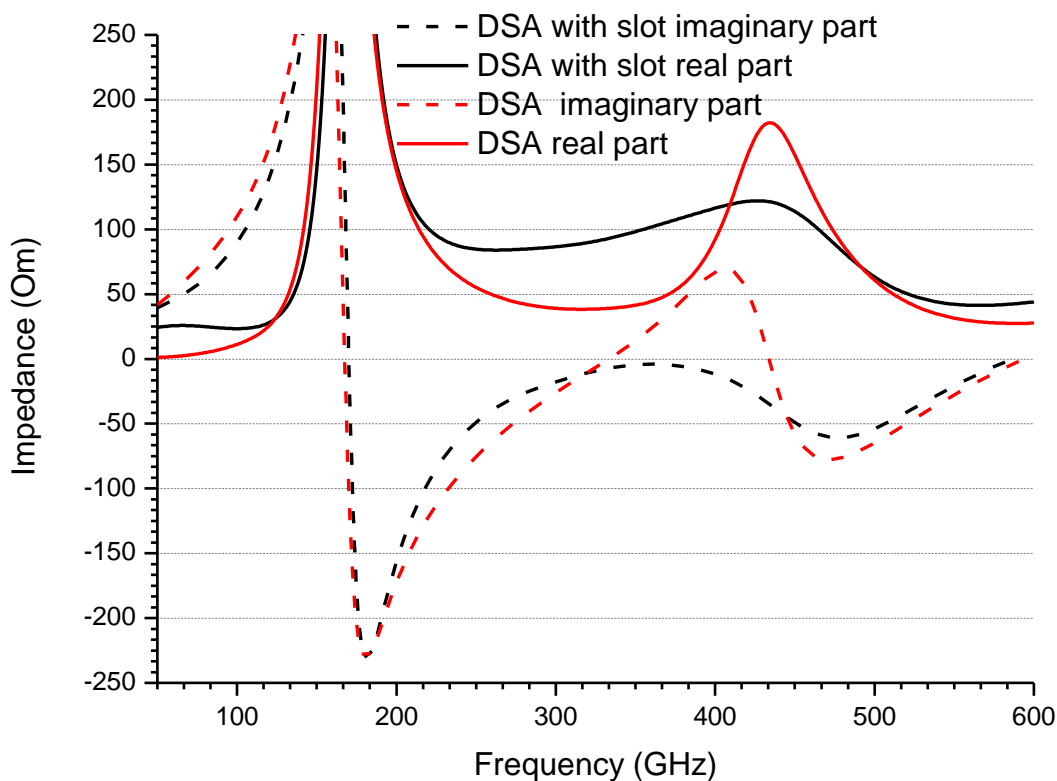


Рис. 17. Расчет действительной и мнимой части импеданса используемой двойной щелевой антенны.

## 6. 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 на 12 мкВ был на температуру черного тела 4,5 К. Токовый 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 отклика 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.

### Литература

1. I. A. Devyatov, M. Yu. Kupriyanov, High-sensitivity microwave detector based on a Josephson heterostructure, JETP Letters, 2009, vol. 89, No , pp. 451-456
2. J.Gildemeister, A.Lee, P.Richards, A fully lithographed voltage-biased superconducting spiderweb bolometer, Appl. Phys. Lett., 74, No 6, 868-870 (1999).
3. L.Kuzmin, D.Chouvaev, M.Tarasov, P.Sundquist, M.Willander, T.Claeson, On concept of normal metal hot-electron microbolometer for space applications, IEEE Trans. Appl. Supercond., 9 (2), 3186-3189 (1999).
4. M.Tarasov, V.Edelman, A.Ermakov, S.Mahashabde, L.Kuzmin, Quantum efficiency of cold-electron bolometer optical response, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., 5 (1), 44-48 (2015).
5. J.Muhonen, A.Niskanen, M.Meschke, Yu.Pashkin, J.S.Tsai, L.Sainiemi, S.Franssila, J.Pekola, Electronic cooling of a submicron-sized metallic beam, Appl. Phys. Lett., 94, 0731101 (2009).
6. G.Paraonau, A.Halvari, Suspended single-electron transistors: fabrication and measurement, Appl. Phys. Lett., 86,093101 (2005).

7. T.Li, Yu.Pashkin, O.Astafiev, Y.Nakamura, J.Tsai, H.Im, Low-frequency charge noise in suspended aluminum single-electron transistors, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 033107 (2007).

8. H.Nguyen, L.Pascal, Z.Peng, O.Buisson, B.Gilles, C.Winkelmann, Etching suspended superconducting tunnel junctions from multilayer, *Appl. Phys. Lett.*, 100, 252602 (2012).

9. A.Timofeev, P.Helisto, L.Gronberg, A.Luukanen, H.Seppa, J.Hassel, Suspended tunnel junction bolometers for Terahertz range, *The Open Applied Physics Journal*, 2012, 5, 34-40.

10. P.Koppinen, I.Maasilta, Phonon cooling of nanomechanical beams with tunnel junctions, *Phys. Rev. Lett.*, 102, 165502 (2009).

11. M. Tarasov, L. Kuzmin, and N. Kaurova, "Thin multilayer aluminum structures for superconducting devices," *Instruments and Experimental Techn.*, vol. 52, no. 6, pp. 877–881, 2009.

12. V.S. Edelman, A Dilution Microcryostat.Insert., *IET*, 2009, 52, No. 2, p. 301

13. A.B. Ermakov, S.V. Shitov, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets, W. Luinge, "A data acquisition system for test and control of superconducting integrated receivers", *Applied Superconductivity Conference ASC'2000*, September (2000), Report 4EA10, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, v.11, No 1, pp. 840-843, (2001)

14. A.V.Seliverstov, M.A.Tarasov, V.S.Edel'man, Influence of the longitudinal magnetic field on the Andreev conductance of a superconductor-insulator-normal metal structure, *JETP Letters*, 2016, vol. 103, No 7, pp. 484-488

**Ссылка на статью:**

Р.А.Юсупов, М.Ю.Фоминский, В.С.Эдельман, М.А.Тарасов, А.А.Юргенс. Болومتر на основе структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл с подвешенным мостиком из нормального металла. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2017. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar17/1/text.pdf>