

## КРИОГЕННЫЙ БОЛОМЕТР С ПОДВЕШЕННЫМ АБСОРБЕРОМ

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

<sup>1</sup> ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва

<sup>2</sup> ИФП РАН, Москва

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт (ГУ)

<sup>4</sup> Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

Статья поступила в редакцию 18 января 2015 г.

**Аннотация.** Разработана простая и надежная технология для изготовления подвешенного тонкоплёночного мостика из нормального металла между двумя сверхпроводниковыми алюминиевыми электродами. С помощью подвешенного моста достигается уменьшение теплопровода в подложку. Такие болометры на основе структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-сверхпроводник – изолятор (СИНИС), интегрированные в планарные антенны, предназначены для работы в ТГц диапазоне излучения, изготовлены образцы с различными поглощающими материалами и измерены их вольт-амперные характеристики при низких температурах (до 100 мК). Образцы с медными поглотителями демонстрируют высокое «подщелевое» сопротивление, что делает их способными конкурировать с обычными детекторами. Потенциально, в таких болометрах оптическая чувствительность может быть увеличена до  $10^9$  В/Вт, что было оценено по отклику по постоянному току в ранних прототипах.

**Ключевые слова:** СИН переход, болометр, изготовление подвешенных структур.

**Abstract.** A robust and simple technology for making suspended normal-metal (N) thin film bridges between superconducting (S) aluminum electrodes with tunnel barriers (I) was developed. The bridges represent effective bolometer absorbers with reduced heat losses to substrates. Such SINIS bolometers integrated with planar antennas are intended for operation in the THz-range of radiation. Samples with different absorber materials were fabricated and current-voltage characteristics were measured at mK temperatures. Samples with Cu absorber demonstrate a high sub-gap resistance that makes them competitive to conventional detectors. Potentially, such bolometers can improve the optical

responsivity by an order of magnitude, up to  $10^9$  V/W, as estimated from the equivalent dc power response in earlier prototypes.

**Keywords:** SIN junction, bolometer, manufacturing suspended structures.

## Введение

Поглощение терагерцового излучения в структурах сверхпроводник – изолятор - нормальный металл - сверхпроводник – изолятор (СИНИС) вызывает увеличение электронной температуры абсорбера, которое можно зарегистрировать 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 грамотного проектирования абсорбера, квантовый отклик детектора может быть улучшен до величины  $hf/kT$ , вследствие увеличения числа возбужденных электронов.

Например, снижение потерь тепла из абсорбера может быть получено традиционным способом – при помощи SiN мембраны, которая крепится тонкими металлическими полосками к подложке [1]. При такой конструкции объем и теплоемкость поглотителя вместе с мембраной уменьшается по сравнению с абсорбером на толстой кремниевой подложке [2]. Дальнейшее улучшение может быть достигнуто, если поглотитель подвешивается без какой-либо поддерживающей мембраны или подложки.

Для электрона, который поглощает фотон с частотой 350 ГГц, время электрон-фононного и электрон-электронного взаимодействия составляет около 0,2 и 1 нс соответственно. Возбужденный электрон создает высокоэнергичные фононы, которые могут легко покинуть абсорбер, если он помещен на подложку или подключен к электродам из того же материала [3]. Использование поглощающего материала, отличного от материала электродов, может улучшить теплоизоляцию вследствие высокого

несоответствия акустических импедансов и большого сопротивления Капицы между абсорбером и электродом.

Ранее болометры изготавливались с поглотителем из тонкой пленки несверхпроводящего алюминия (рис. 1) [4], что влекло за собой большие утечки тепла и в подложку, и в электроды.

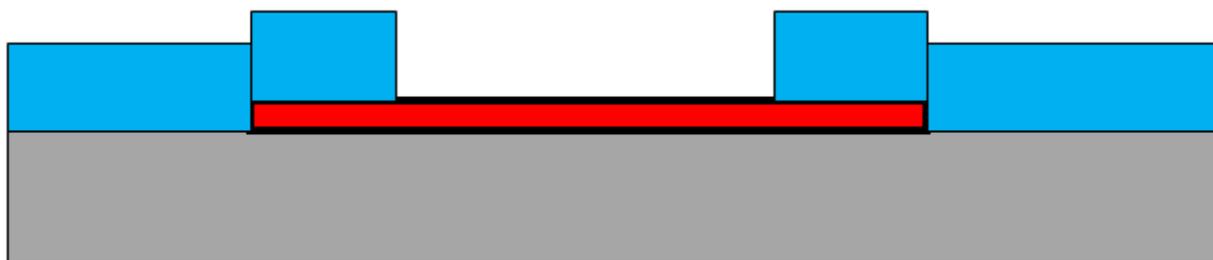


Рис. 1. Обычный СИНИС болометр с абсорбером (красный) и сверхпроводящими Al электродами (синие) на кремниевой подложке (серый). Абсорбер окисляется до сверхпроводящего электрода с образованием туннельного барьера.

### Изготовление

В данной работе предлагается альтернативный дизайн СИНИС болометров. Процесс изготовления несколько проще по сравнению с ранее используемой 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 (желтый), далее наносится трехслойка Al/оксид/Cu. 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). Результаты травления четко видны в сканирующем электронном микроскопе (рис. 3). Травление же в кислотах не использовалось, так как оно было неуправляемым и невоспроизводимым. На рис.4 представлен общий вид изготовленных структур: четыре СИН перехода, соединённые общим абсорбером — нормальным металлом.

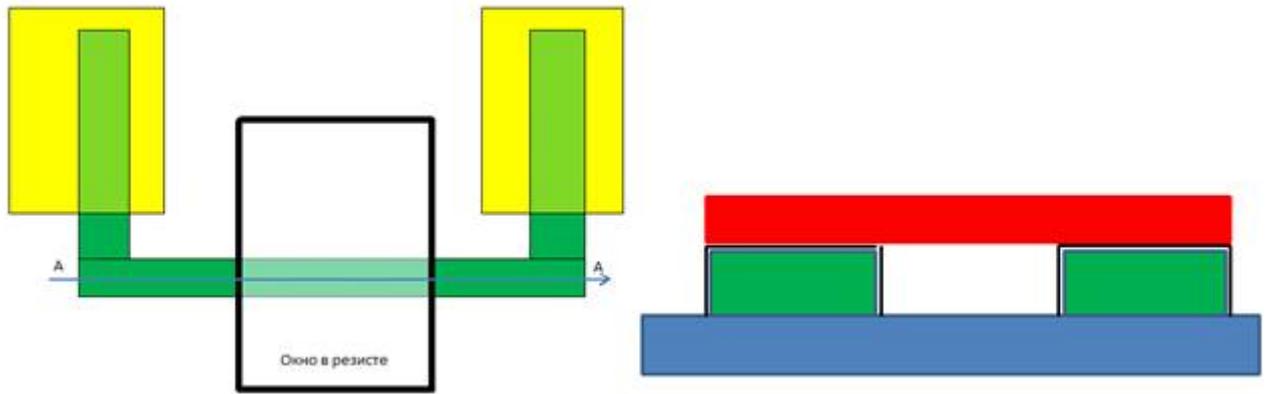


Рис. 2. Вид сверху на схему, травление нижнего слоя Al в трехслойке Al-оксид-Cu происходит в области черной рамки (открытое окно в резисте), и сечение вдоль линии А-А.

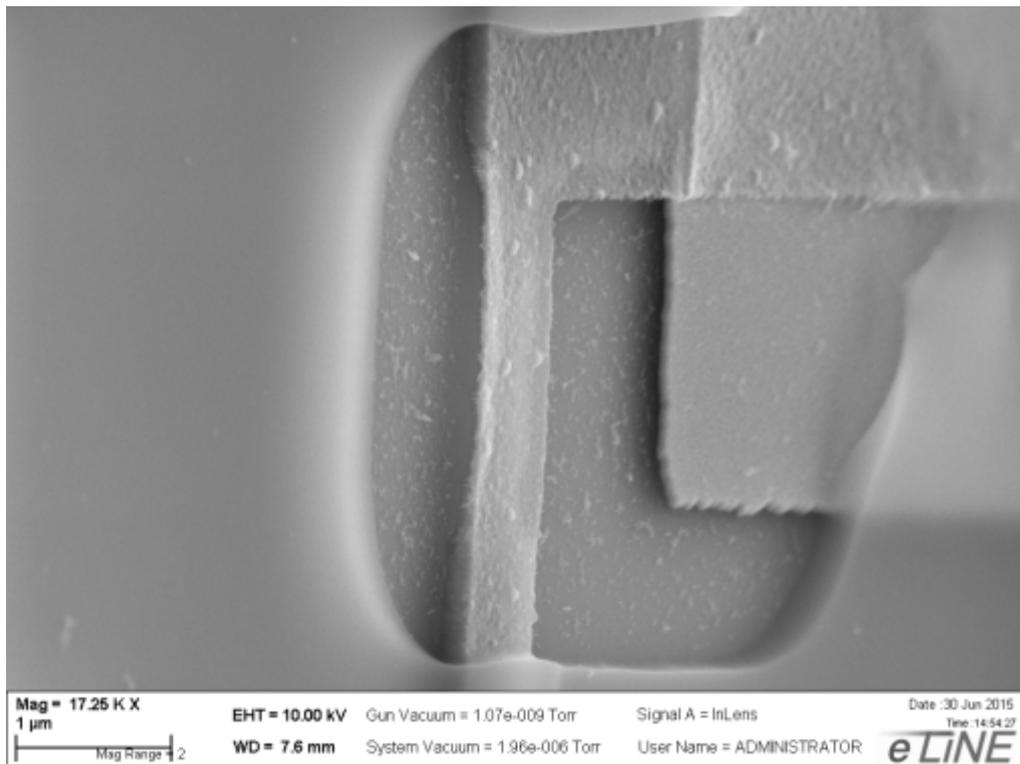


Рис. 3. СЭМ-изображение изготовленного образца, частично покрытого электронным резистом.

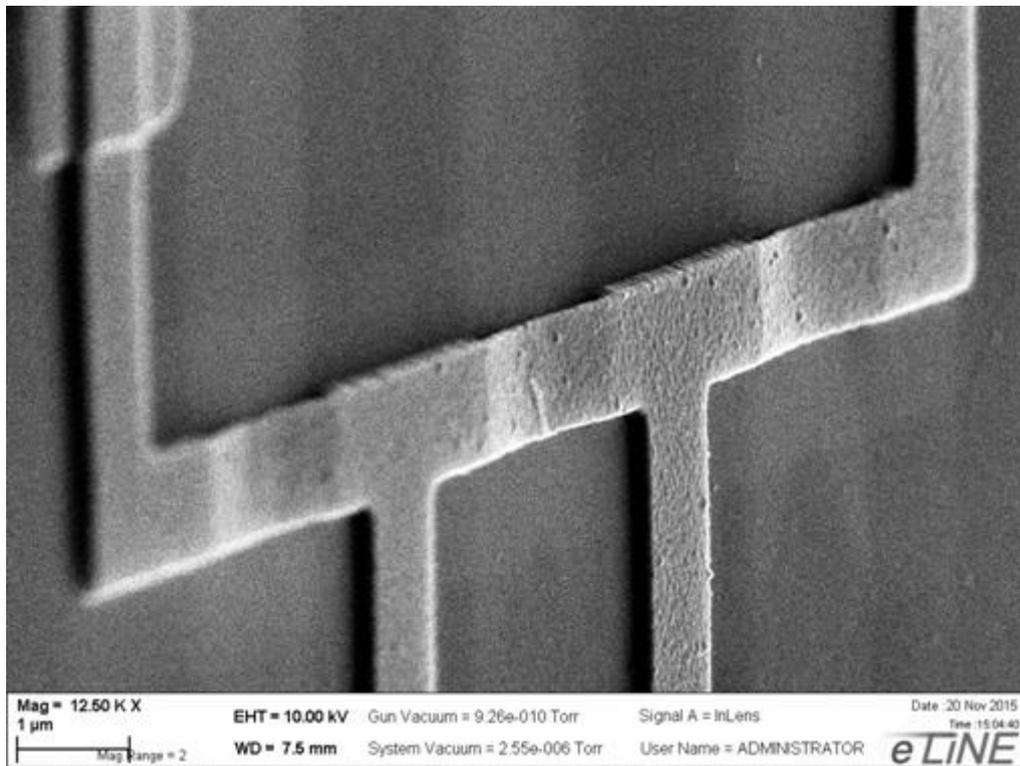


Рис. 4. Общее СЭМ-изображение изготовленных структур.

## Измерения

Измерения проводились при низких температурах (до 100 мК) в криостатах раствора. Измерения проводились в режиме задания тока. Вольт-амперные характеристики и отношение сопротивлений измерялось при 300 мК (рис. 5). 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 помех ниже, но диапазон тока весьма мал. Уменьшение задающего сопротивления смещения приводит к подавлению максимального динамического сопротивления с 300 кОм до 20 кОм. Обычные СИНИС болометры менее чувствительны и не так сильно подвержены влиянию сопротивления смещения. Кривая, снятая из характеристик, снятых при различных задающих сопротивлениях, представлена на рис.6.

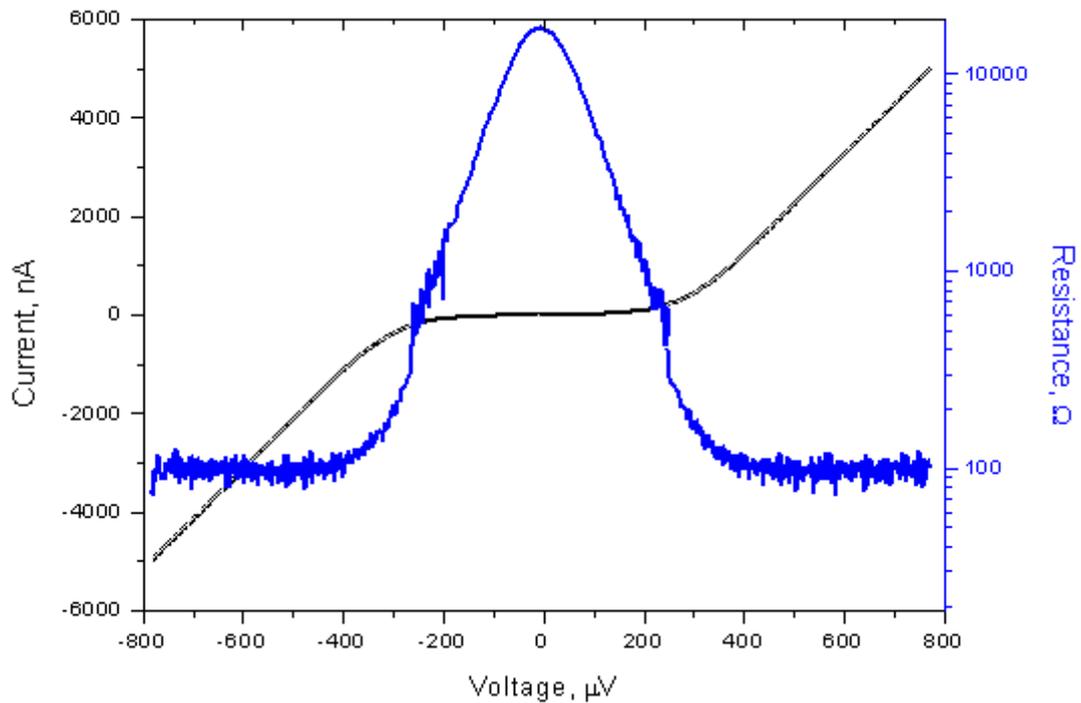


Рис. 5. ВАХ и динамические сопротивления при 300 мК.

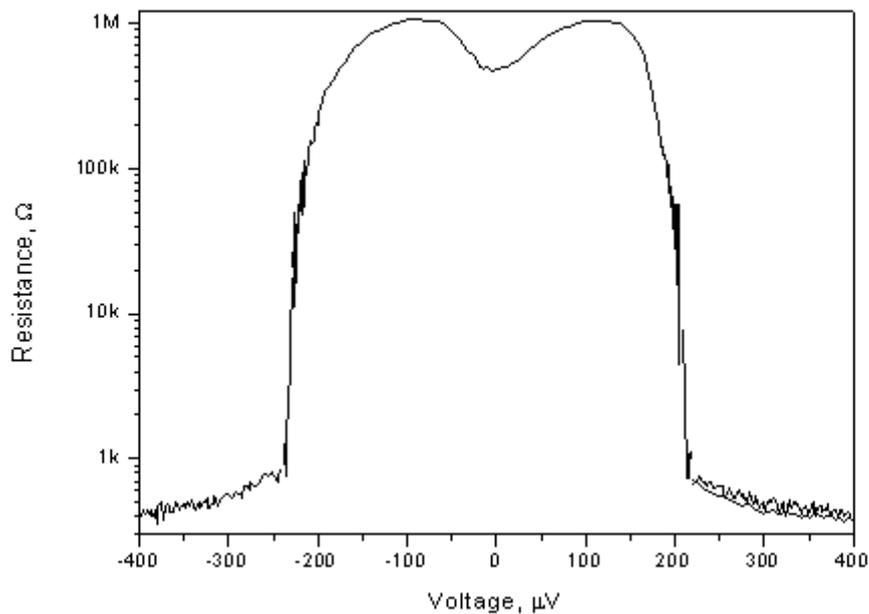


Рис. 6. Динамическое сопротивление болометра СИНИС с подвешенным абсорбером при 100 мК, измеренное с сопротивлением смещения 2 МОм, 20 МОм, 200 МОм, 2 ГОм, 10 Гом.

Снятие зависимостей происходило в автоматическом режиме с помощью программы Irteson с дальнейшей обработкой полученных

экспериментальных данных. Также была измерена температурная зависимость динамического 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. Для исследования этого эффекта была снята зависимость динамического сопротивления от магнитного поля (Рис. 8).

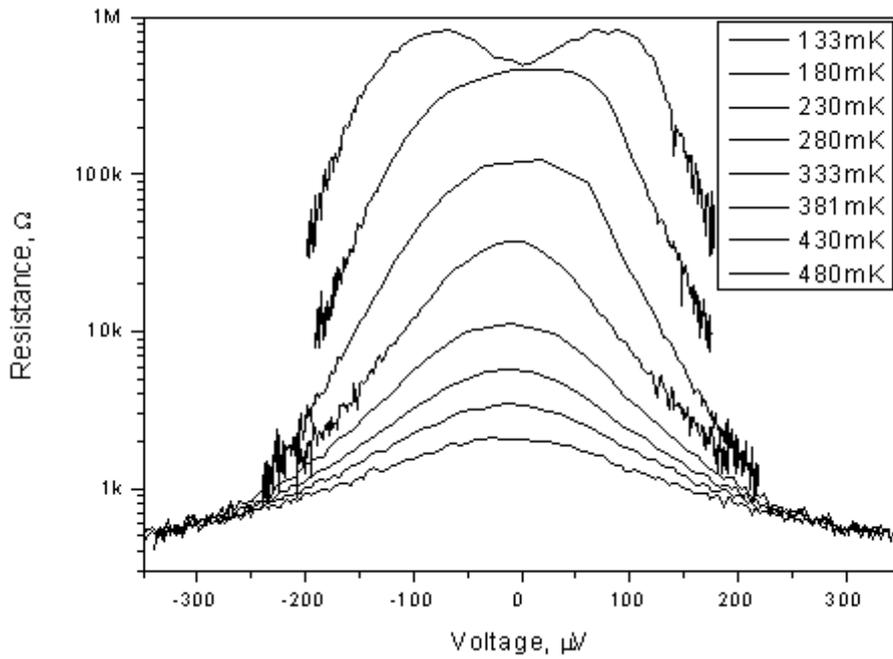


Рис.7. Температурные зависимости динамического сопротивления в диапазоне 133-480 мК.

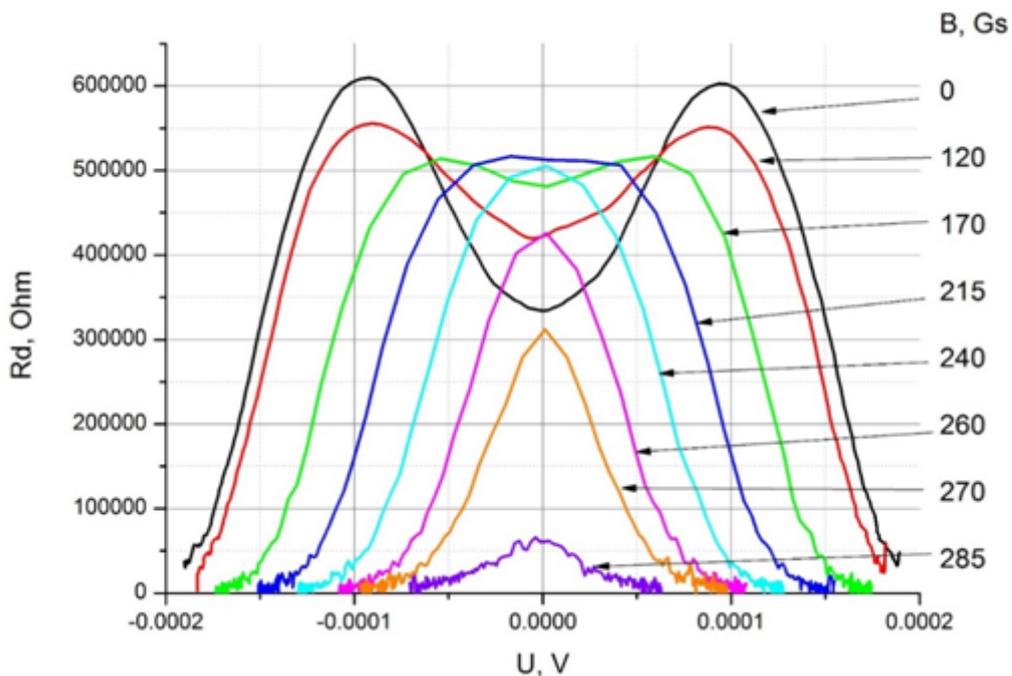


Рис. 8. Зависимость динамического сопротивления от внешнего магнитного поля.

Основная характеристика болометра – это отклик на внешнее излучение. Для оценки отклика изготовленных структур был исследован отклик на нагрев болометра постоянным током от температуры 75 мК (рис. 9). Вольт-ваттная чувствительность составила более  $10^9$  В/Вт.

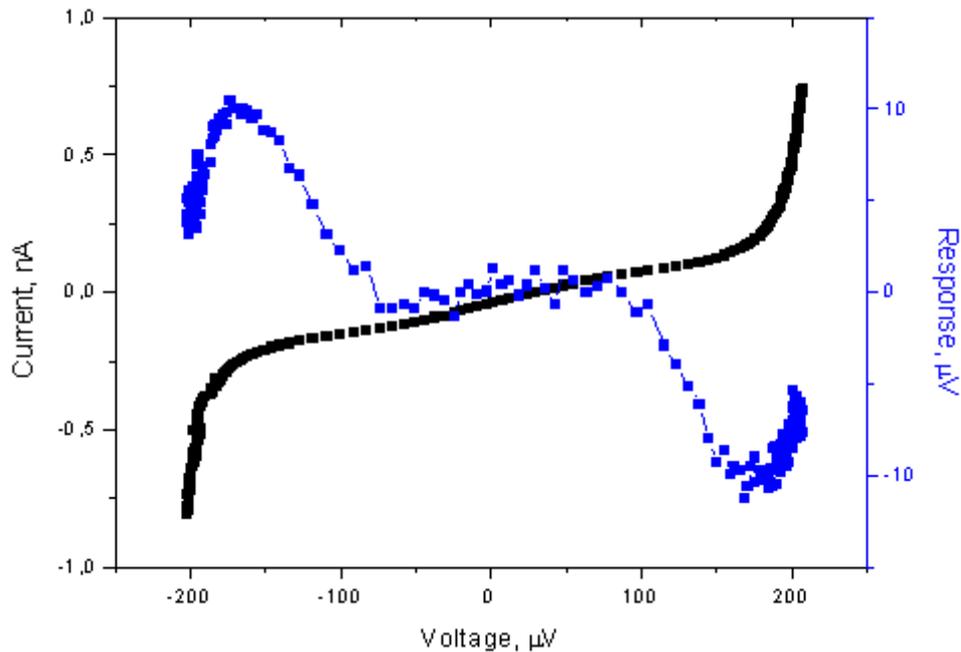


Рис 9. Отклик болометра на нагрев постоянным током от температуры 75мК. Соответствующий отклик составил более  $10^9$  В/Вт.

### Обсуждение и основные результаты

Попытки изготовления подвешенных мостов или нано-механических пучков предпринимались и ранее. В качестве примера можно упомянуть статью [5], 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 [6]. Существуют также подвесные одноэлектронные транзисторы [7], изготовленные с помощью реактивного ионного травления кремниевой подложки под 100 нм островом. Другой метод был использован в [8], 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 Cu [9]. В качестве альтернативы технике NbN мембраны можно

также упомянуть подвесные конструкции, которые поддерживаются снизу слоем оксида кремния, оставшегося после травления с обратной стороны в плазме SF<sub>6</sub> [10]. В приведенных выше примерах используется относительно толстый слой меди или золота. Для использования в качестве болометров целесообразно уменьшить объем абсорбера и увеличить его электрическое сопротивление для лучшего согласования с импедансом планарной антенны. Наши первые попытки с Pd в качестве нормального металла показали низкое качество SIN-переходов с максимальным отношением сопротивлений ниже двух. Это сказывается негативное влияние Pd на туннельный барьер. По нашим данным, никому не удалось изготовить качественные SIN-переходы с Pd в качестве нормального металла поглотителя.

Следующая серия образцов была с медным поглотителем, и мы получили хорошее качество переходов с  $R_d/R_n > 100$  при 300 мК. Недостатками использования тонких пленок меди являются их мягкость и тенденция к образованию напылов до подложки, а также достаточно низкое удельное сопротивление мостика. Наконец, мы выбрали Cr и CuCr в качестве материала для наномостиков, которые получились довольно жесткие и имеют достаточное удельное сопротивление. С уменьшением толщины 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 используем сушку в критической точке в жидком CO<sub>2</sub>.

С помощью вышеописанной методики были изготовлены СИНИС структуры с отношением сопротивлений туннельных переходов и сопротивления абсорбера около 100. Такие структуры подходят для криогенных болометров терагерцового диапазона, интегрированных с плоскими антеннами. Техника изготовления проще по сравнению с традиционной технологией теневого напыления. Следующим шагом будет использование в качестве материала поглотителя гафний, при котором должно дополнительно уменьшиться время электрон-фононного взаимодействия и повыситься чувствительность болометра.

### **Благодарности**

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект "Терагерцовые интегральные приемники и генераторы на основе сверхпроводниковых наноструктур" (номер соглашения о

предоставлении субсидии: 14.613.21.0046).

### Литература

1. J.Gildemeister, A.Lee, P.Richards, A fully lithographed voltage-biased superconducting spiderweb bolometer, *Appl. Phys. Lett.*, 74, No 6, 868-870 (1999).
2. 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).
3. 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).
4. 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.
5. P.Koppinen, I.Maasilta, Phonon cooling of nanomechanical beams with tunnel junctions, *Phys. Rev. Lett.*, 102, 165502 (2009).
6. 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).
7. G.Paraonau, A.Halvari, Suspended single-electron transistors: fabrication and measurement, *Appl. Phys. Lett.*, 86,093101 (2005).
8. 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).
9. 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).
10. 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.