

## КРИОГЕННЫЙ БОЛОМЕТР С ПОДВЕШЕННЫМ АБСОРБЕРОМ

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

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

[tarasov@hitech.cplire.ru](mailto:tarasov@hitech.cplire.ru), [ffke@yandex.ru](mailto:ffke@yandex.ru)

<sup>2</sup> ИФП РАН, Москва.

[edelman@kapitza.ras.ru](mailto:edelman@kapitza.ras.ru)

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

[yusupovrenat@hitech.cplire.ru](mailto:yusupovrenat@hitech.cplire.ru)

<sup>4</sup> CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden.

[yurgens@chalmers.se](mailto:yurgens@chalmers.se)

*Была разработана простая и надежная технология изготовления подвешенного тонкоплёночного мостика из нормального металла между двумя сверхпроводниковыми алюминиевыми электродами. Такие СИНИС структуры болометры, интегрированные в планарные антенны, предназначены для работы в ТГц диапазоне излучения. С помощью подвешенного моста достигается уменьшение теплопровода в положку. Были изготовлены образцы с различными нормальными металлами в качестве абсорбера и были измерены их вольтамперные характеристики при низких температурах, до 100мК. Образцы с медными поглотителя демонстрируют высокое «подцелевое» сопротивление, что делает их конкурентоспособными с СИНИС детекторами, изготовленными по другим технологиям. Потенциально, в таких болометрах оптическая чувствительность может быть увеличена до величины  $10^9$  В/Вт, что было оценено по отклику по постоянному току в ранних прототипах.*

### Введение

Поглощение терагерцового излучения в структурах сверхпроводник- изолятор- нормальный металл- сверхпроводник – изолятор (СИНИС) вызывает повышение электронной температуры абсорбера, которое регистрируется 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 зависит от электрон-электронного, электрон-фононного, фонон-электронных, фононных-фононных взаимодействий, и туннелирование 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  $hf / kT$ , через увеличение числа возбужденных электронов.

Снижение потерь тепла из абсорбера может быть получено традиционным способом с помощью SiN мембраны и тонких металлических креплений с помощью довольно сложной технологии [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 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 были сделаны (см. рис. 1) с поглотителем из тонкой пленки несверхпроводящего алюминия [4], что повлекло за собой большие утечки тепла в подложку и электроды.

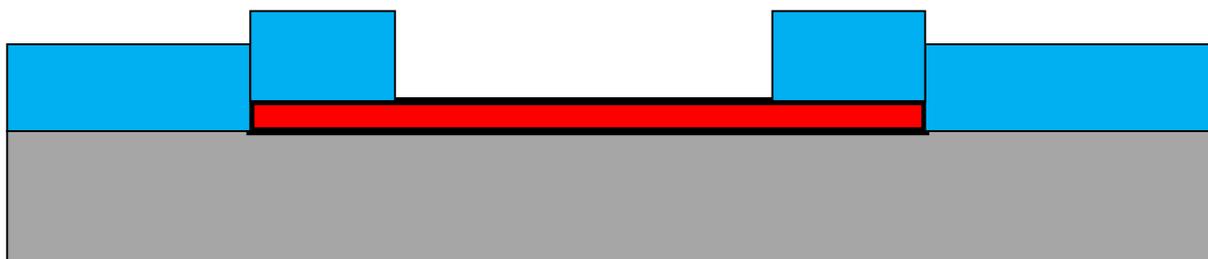


Рис. 1. Обычный СИНИС болометр с абсорбером (красный) на кремниевой подложке (серый) и сверхпроводящими Al электродами (синие). Абсорбер окисляется с образованием туннельного барьера до сверхпроводящего электрода.

### Изготовление и измерения

В данной работе описывается альтернативный дизайн СИНИС болометров. Процесс изготовления 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. 3 и 4 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), и даже в оптическом микроскопе. Травление же в кислотах было неуправляемо, и невоспроизводимым. Вольтамперные характеристики и отношение сопротивлений измерялось при 300 мК и 100 мК и представлено на рис. 4,5. Такие измерения очень чувствительны к значению сопротивления, через которое задается ток при комнатной температуре, что ясно видно при различных сопротивлениях: 2 МОм, 20 МОм, 200 МОм, 2 ГОм, 10 ГОм. С 10 ГОм сопротивления уровень помех ниже, но диапазон тока весьма мал, но 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.

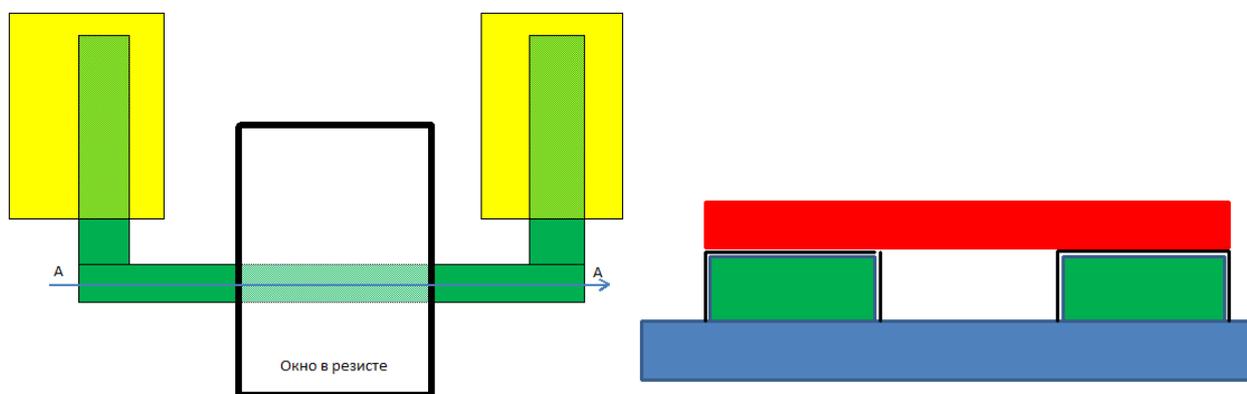


Рис. 2. Вид сверху на схему, травление нижнего слоя Al в трехслойке Al-оксид-Cu происходит в области черной рамки (открытое окно в резисте), и сечение вдоль линии А-А.

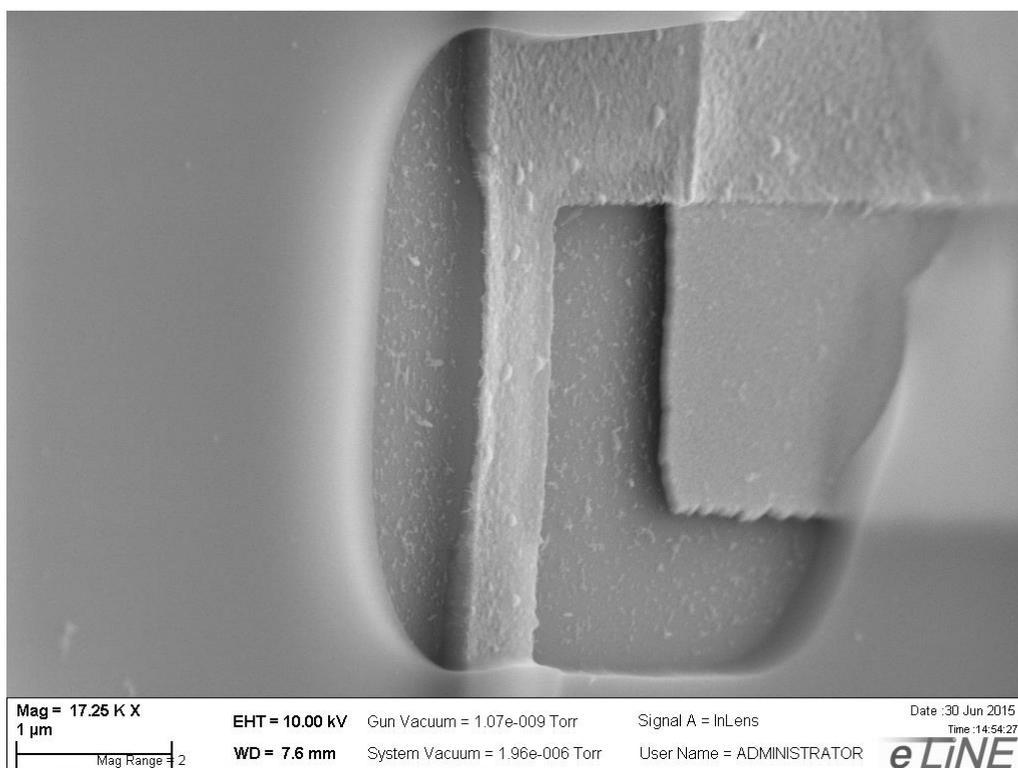


Рис. 3. СЭМ-изображение образца, изготовленного и частично покрытого электронным резистом.

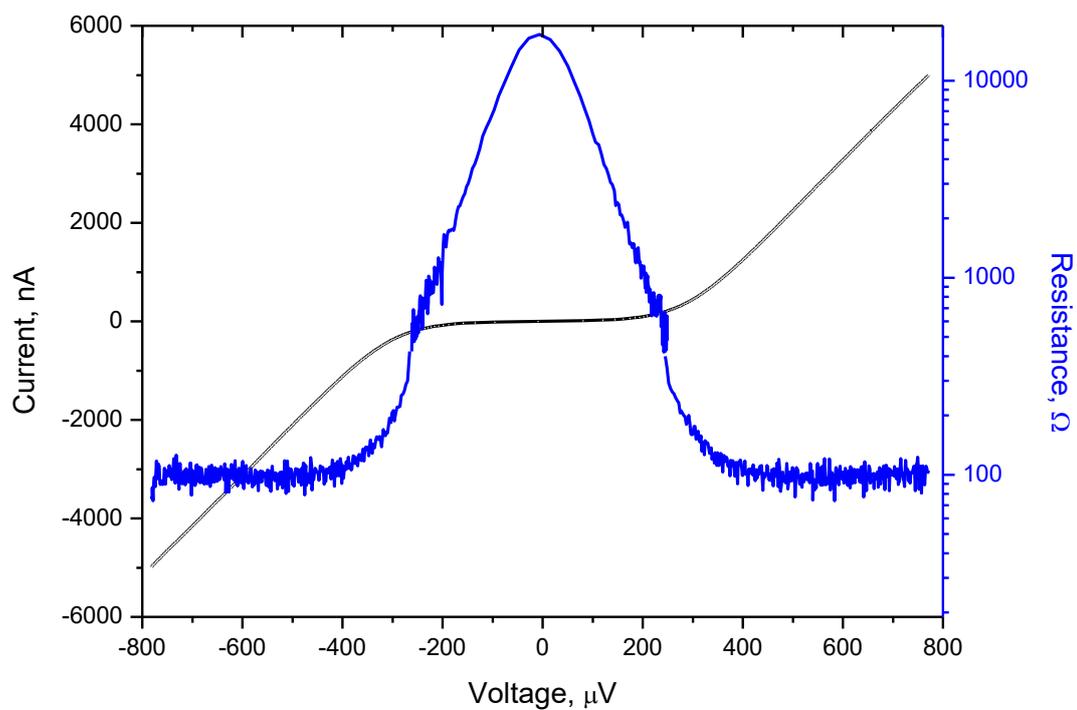


Рис. 4. ВАХ и динамические сопротивления при 300 мК.

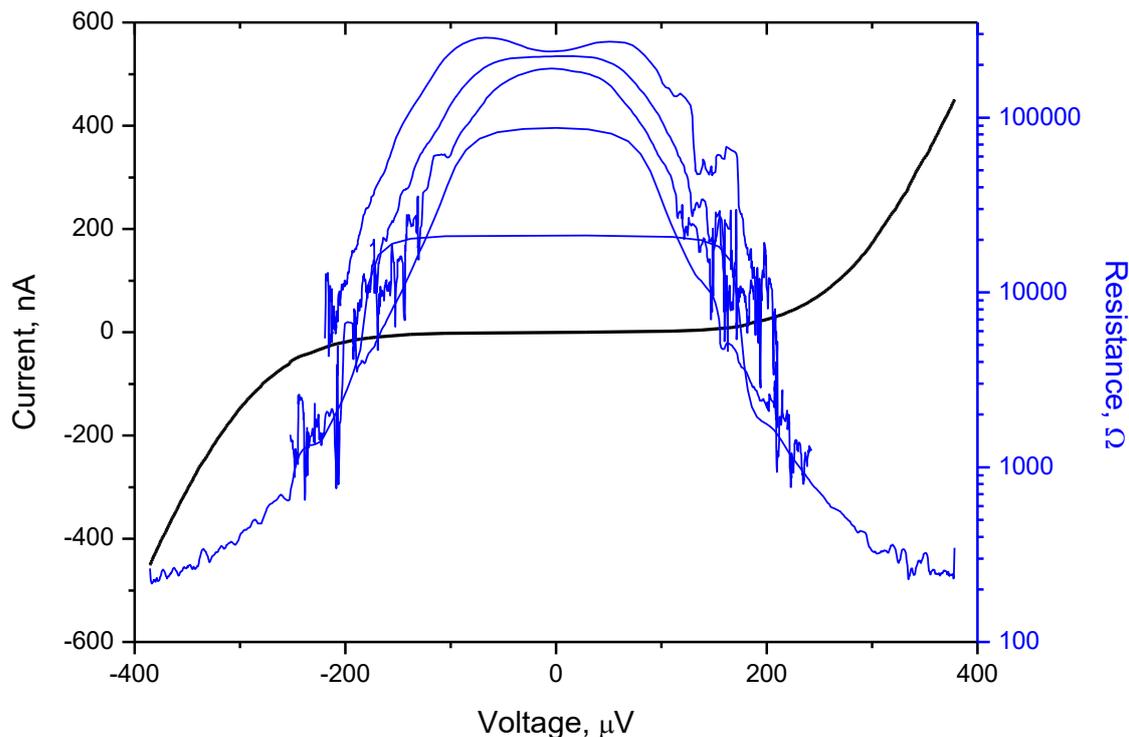


Рис.

5. ВАХ и динамическое сопротивление болометра СИНИС с подвешенным абсорбером при 100 мК, измеренное с сопротивлением смещения 2 МОм, 20 МОм, 200 МОм, 2 ГОм, 10 Гом.

### Обсуждение

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 толстым слоем Cu [9]. В качестве альтернативы к технике NbN мембраны можно также упомянуть подвесные конструкции поддерживаемые 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 влияния 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 использованием тонких пленок меди является их

мягкость и тенденции к образованию напылов до подложки, а так же достаточно низкое удельное сопротивление мостика. Наконец мы выбрали  $\text{Cr}$  и  $\text{CuCr}$  в качестве материала для наномостиков, которые получились довольно жесткие и имеют достаточно 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 прилипания к подложкам, чтобы избежать этого мы используем сушку в критической точке в жидком  $\text{CO}_2$ .

С помощью вышеописанной методики были изготовлены СИНИС структуры с отношением сопротивлений туннельных переходов более 100 и сопротивления абсорбера около 100 Ом, которые подходят для криогенных болометров терагерцового диапазона, интегрированных с плоскими антеннами. Техника изготовления проще по сравнению с традиционной технологией теневого напыления. Следующим шагом будет использовать в качестве материала поглотителя гафния, при использовании которого 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.