

# ОЦЕНКА ОПТИЧЕСКОЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТИТАНОВЫХ НАНОБОЛОМЕТРОВ-СЕНСОРОВ НА КРАЮ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ПЕРЕХОДА С РАЗОГРЕВОМ ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА

А. Н. Выставкин, А. Г. Коваленко, И. А. Кон, А. С. Ильин,  
С. В. Шитов, О. В. Корюкин, А. В. Уваров

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

Получена 9 сентября 2012 г.

**Аннотация.** В настоящей работе рассмотрены разные способы формирования микроструктур из сверхпроводниковых пленок титана. Выявлен оптимальный, с точки зрения воспроизводимости точки сверхпроводникового перехода, режим формирования этих структур. Измерены вольтамперные характеристики и зависимости сопротивления от температуры изготовленных образцов с применением чернотельного излучателя, нагреваемого до разных температур. Из сопоставления характеристик была оценена предельная чувствительность болометра, который может быть создан с использованием предлагаемой технологии.

**Ключевые слова:** Сверхпроводниковая микроэлектроника, сенсор на краю перехода, горячие электроны.

**Abstract.** The paper considers different superconducting titanium microstructures fabrication technology methods. An optimal method, in terms of superconducting transition point reproducibility, has been developed. IV curves and resistance temperature dependences were measured with different blackbody radiation source temperatures. The dependencies comparison allowed to estimate the noise equivalent power of a bolometer, fabricated using the proposed technology.

**Keywords:** Superconducting microelectronics, transition edge sensor, hot electrons.

## Введение

Сверхпроводниковые болометры-сенсоры на краю перехода (СКП) представляют большой интерес в разных областях науки и техники, в частности для детектирования терагерцового излучения [1]. Наиболее распространенная конструкция терагерцового болометрического приемного элемента – поглотитель в виде мембраны с СКП в качестве термометра [2]. В то же время, большой интерес представляет конструкция, в которой СКП играет роль поглотителя излучения и термометра одновременно, а излучение концентрируется в микроструктуру при помощи антенны [3]. В таком случае объем, в котором рассеивается терагерцовое излучение, на много меньше, соответственно меньше теплоемкость и выше чувствительность. Излучение разогревает электронный газ, который при рабочей температуре порядка 350 мК достаточно плохо обменивается теплом с атомной решеткой сверхпроводника. Авторы в настоящее время работают над созданием подобного болометрического приемника [4]. В качестве материала СКП болометра был выбран титан, поскольку его температура сверхпроводникового перехода примерно равна 400мК, что в свою очередь близко к минимальной рабочей температуре рефрижератора с испарением  $^3\text{He}$  [5], который планируется использовать для охлаждения разрабатываемых болометров.

## Изготовление образцов

Поверхность титана достаточно хорошо сорбирует другие вещества, что осложняет создание тонкопленочных структур с воспроизводимыми сверхпроводниковыми характеристиками. Таким образом, разработка технологического процесса формирования СКП наноболометров с воспроизводимыми характеристиками, является весьма важным этапом в создании сверхпроводниковых приемных элементов. Для отработки технологического процесса было изготовлено несколько серий образцов

поглотителей сверхпроводниковых СКП-боллометров разными методами микроструктурирования.

Все образцы были изготовлены методом электронно-лучевой литографии с последующим осаждением металлов в установке магнетронного распыления. Формирование структур поглотителей проводилось несколькими методами микроструктурирования: «взрывной» литографией, ионным травлением через металлорезистную маску из титана, жидкостным травлением в плавиковой кислоте через маски из полиметилметакрилата (ПММА),  $\text{SiO}_2$  и полиэфирсульфона (PES) [6] и ионным травлением через маску из PES.

Было обнаружено, что образцы, полученные методом «взрывной» литографии имеют низкую воспроизводимость характеристик и, в большинстве своем, не переходят в сверхпроводящее состояние в рабочем диапазоне температур применяемого криостата. Дополнительные исследования с использованием рентгеноспектрального микроанализа как образцов, изготовленных методом «взрывной» литографии, так и образцов, сформированных ионным травлением через металлорезистную маску из титана, показали наличие углеродных примесей в титане, что для первых может быть объяснено дегазацией резиста ПММА [7] в процессе осаждения титана вследствие его термической нестабильности, а для последних – легированием углеродом из сетки нейтрализатора в процессе ионного травления. Кроме того, исследование образцов на атомно-силовом микроскопе показало значительное снижение гладкости структур, изготавливаемых вторым способом.

Наилучшие результаты как по своим электрическим свойствам, так и по их воспроизводимости, показали образцы структур, изготовленные методами жидкостного травления, за исключением образцов, вытравленных через маску из  $\text{SiO}_2$ . Это привело к ухудшению сверхпроводящих свойств титановых пленок, а также структуры, сформированной методом ионного травления через маску из PES.

Главным недостатком использования при травлении позитивных резистов. ПММА и сополимера, является то, что необходимо использовать инвертированный шаблон. Это означает, что воздействию электронным лучом подвергается почти полностью вся область засветки, за исключением непосредственно рисунка титанового поглотителя. При этом весьма значительно увеличивается время экспонирования – в десятки раз. Еще одним недостатком травления является невысокая прецизионность процесса и невозможность изготовления структур с размерами меньше 1 мкм.

Данные недостатки можно исключить, если использовать для формирования титановых структур метод ионного травления через маску из PES. Последний обладает высокой термической стабильностью, что исключает дегазацию резиста, а также его задубливание [6]. Кроме того, резист на основе PES – негативный, что значительно уменьшает время экспозиции маски поглотителя на электронном литографе.

Титановые структуры, сформированные с использованием PES, изображенные на рисунке 1, показали превосходство по своим параметрам относительно образцов, изготовленных другими вышеуказанными методами. Далее приведены результаты их исследования.

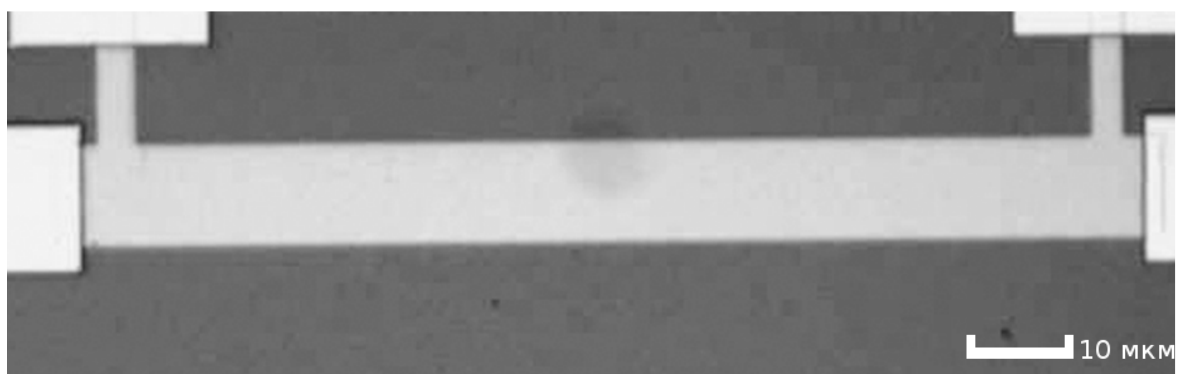


Рисунок 1. Фотография тестового титанового образца, изготовленного с использованием резиста на базе PES, полученная с помощью оптического микроскопа.

## Воздействие излучения чернотельного источника

Образцы были наклеены на медный держатель и установлены в криостат испарения  $^3\text{He}$ . На держателе был установлен резистивный термометр, по которому определялась температура образцов. Образцы были установлены в криостат в соответствии с эскизом на рисунке 2. Излучение чернотельного источника [8], отражаясь в плоском зеркале, падет на образцы.

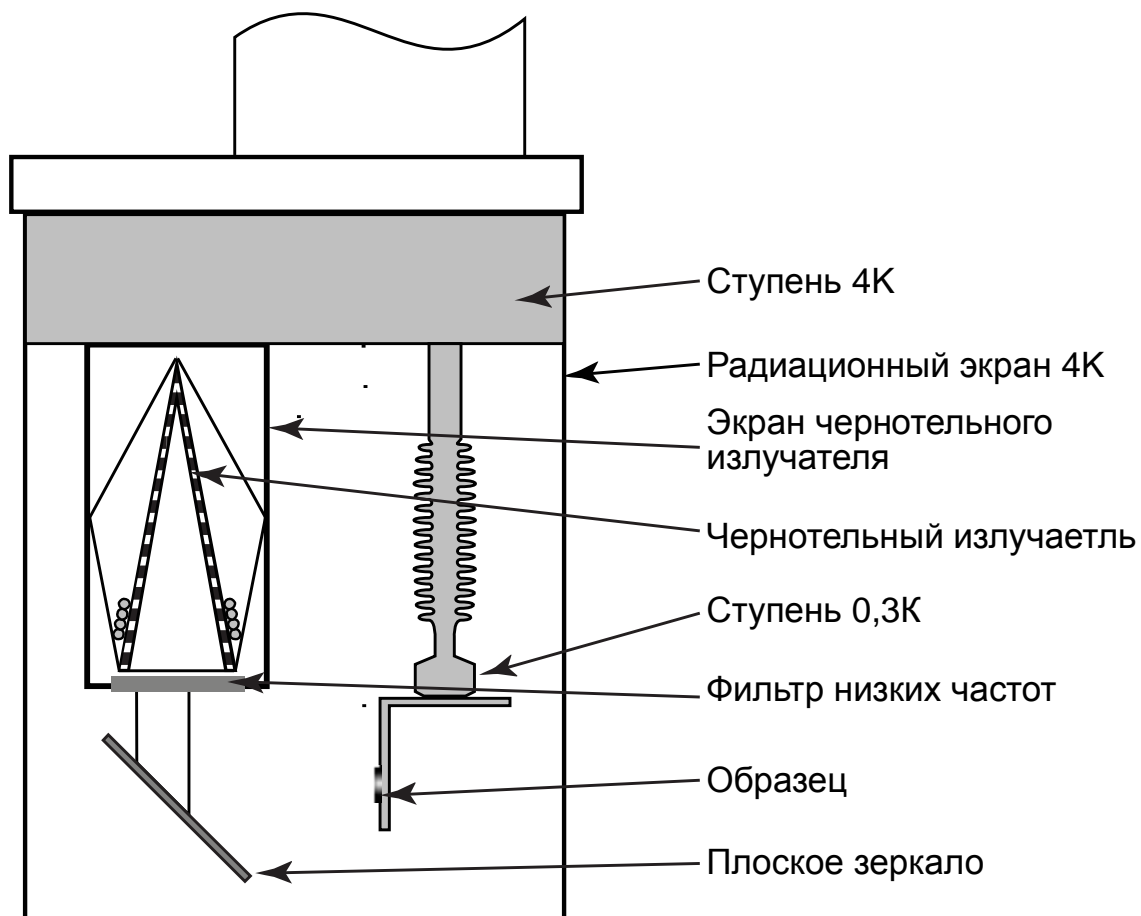


Рисунок 2. Схема расположения образца в криостате

Был проведен ряд измерений вольтамперных характеристик и зависимости сопротивления образцов от температуры при разных температурах чернотельного источника. В результате измерений было установлено, что область парапроводимости сдвигается в сторону более низких температур при

возрастании интегральной мощности облучения. Следует отметить, что процесс измерения протекал достаточно медленно. Таким образом, можно полагать, что атомная решетка образца была термализована с решеткой подложки и, соответственно, с термометром через держатель. В таком случае, сдвиг области парапроводимости можно объяснить разогревом электронного газа излучением от чернотельного источника.

Используя результаты измерений зависимости сопротивления, можно оценить предельную чувствительность потенциального болометра. Уравнение баланса энергии электронов [9] устанавливает соотношение между мощностью, поглощенной в образце, и температурой электронного газа.

$$P = \Sigma \nu (T_e^5 - T_\phi^5)$$

$P$  – мощность, рассеиваемая в образце с объемом  $\nu$ ,  $T_e$  – температура электронного газа,  $T_\phi$  – температура фононов,  $\Sigma \cong 3 \text{ нВт К}^{-5} \cdot \text{мкм}^{-3}$  – параметр материала [10].

Зная температуры электронного газа и атомной решетки, можно вычислить поглощенную мощность. В то же время, токовый отклик вычисляется из результатов изменения вольтамперной характеристики при воздействии излучения.

Значение температуры электронного газа образца при воздействии излучения чернотельного источника определяется следующим образом. Используем зависимость сопротивления от температуры без подведенной мощности. В этом случае температура электронного газа соответствует температуре атомной решетки. При сверхпроводниковом переходе температура электронного газа определяет флуктуационный вклад куперовских пар в проводимость [11], что позволяет найти температуру электронного газа по сопротивлению образца, облучаемому чернотельным источником: температура

образца без воздействия излучения соответствует температуре электронного газа образца с тем же сопротивлением (рисунок 3). В нашем случае чернотельный излучатель разогрелся до температуры 10 К при температуре атомной решетки  $T_{\phi}=0,3436$  К и температуре электронов  $T_e=0,34445$  К. Подставив значения этих температур в уравнение баланса электронов, найдем поглощаемую мощность излучения:

$$P = \Sigma v(T_e^5 - T_{\phi}^5) = 3 * 100 * 10 * 0,1 * ((0,34445)^5 - (0,3436)^5) \approx 1,8 * 10^{-11} \text{ Вт}$$

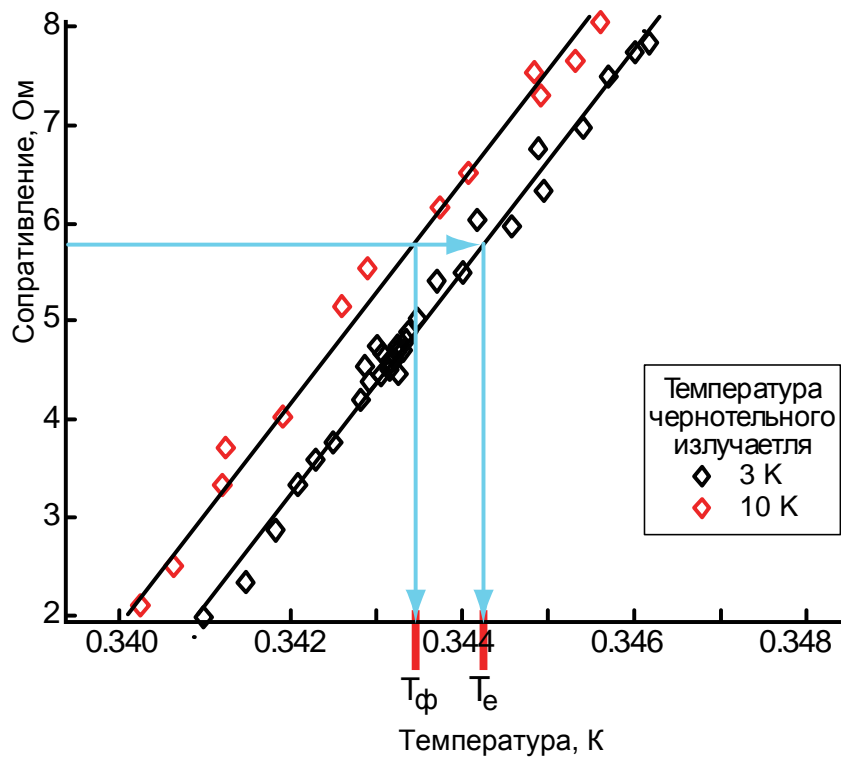


Рисунок 3. Зависимости сопротивления образца от температуры в присутствии излучения чернотельного источника и без излучения

Далее, по вольтамперным характеристикам образца в присутствии излучения чернотельного источника и без излучения (рисунок 4) получим изменение тока смещения в оптимальной области:  $\Delta I \approx -2$  мкА. Зная изменение тока через образец и значение поглощенной мощности, можно вычислить токовую чувствительность образца к поглощаемой мощности.

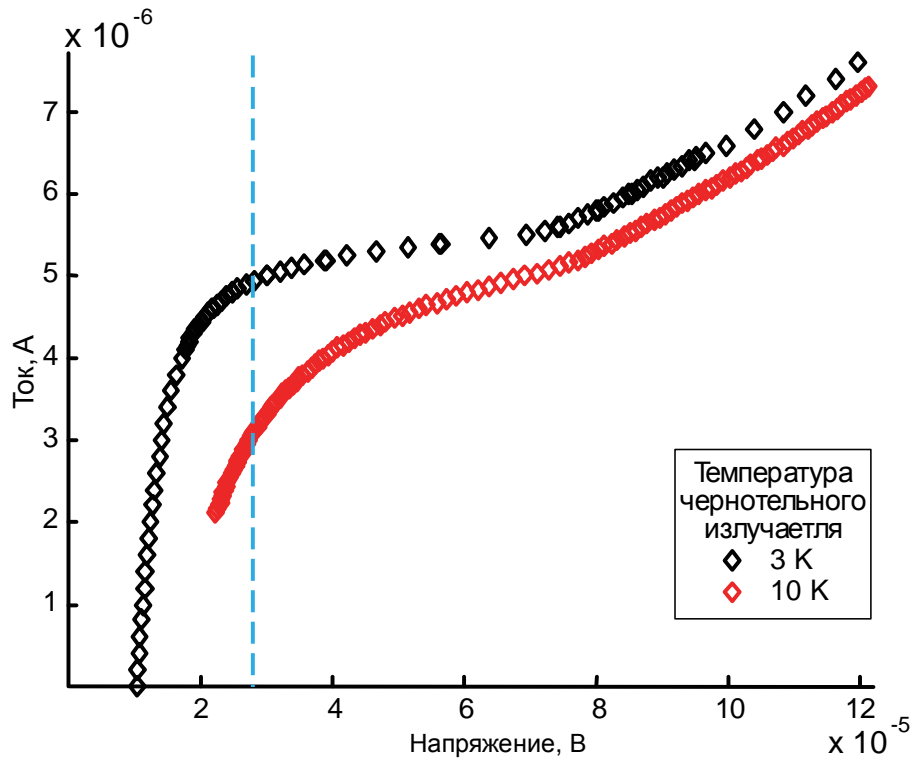


Рисунок 4. Вольтамперные характеристики в присутствии излучения чернотельного источника и без излучения

Для исследованных образцов токовый отклик составляет  $S = -\Delta I/P \approx 10^5 \text{ A/Wm}$ . Предельная чувствительность наноболометров-сенсоров на переходе определяется соотношением  $P_{np} = \sqrt{i_{noise}^2} / S_I$ , где  $\sqrt{i_{noise}^2}$  – среднеквадратичный шумовой ток усилителя, следующего за болометром. В нашем случае это СКВИД-усилитель, у которого  $\sqrt{i_{noise}^2} \approx 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ A/Гц}^{1/2}$ . С таким усилителем предельная чувствительность болометра на основе исследуемого образца составит  $P_{np} \approx 1,35 \cdot 10^{-17} \text{ Wm/Гц}^{1/2}$ . Планарные размеры СКП-болометра могут быть уменьшены до  $1 \cdot 0,1 \text{ мкм}^2$ . Поскольку предельная чувствительность СКП-болометра изменяется как корень из объема, легко оценить чувствительность потенциального приемника с указанными выше планарными размерами СКП-болометра: это  $\sim 1,35 \cdot 10^{-19} \text{ Wm/Гц}^{1/2}$ . Этот результат хорошо согласуется с ранее



полученными оценками возможной предельной чувствительности СКП-нано болометров с разогревом электронного газа [4].

### **Заключение**

На основе разработанной методики были изготовлены образцы микроструктур из титана в качестве прототипов наноболометров-сенсоров на горячих электронах. При облучении образцов чернотельным источником наблюдалось смещение области парапроводимости в сторону более низких температур. Это можно объяснить различием температур электронного газа и атомной решетки, что, в свою очередь, объясняется разогревом электронного газа под воздействием излучения от чернотельного источника. При помощи уравнения баланса энергии электронов была вычислена поглощенная мощность. Значение поглощенной мощности и сдвиг вольтамперной характеристики позволили оценить чувствительность болометров, изготавливаемых на основе подобных микроструктур.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 10-07-00338-а.

### **Литература**

- [1] P.L. Richards, C.R. McCreight, Infrared detectors for astrophysics // *Physics Today*, 2, 41-47 (2005)
- [2] T. May, S. Anders, V. Zakosarenko, M. Starkloff, H.-G. Meyer, G. Thorwirth, E. Kreysa, // *Proc. SPIE* 6549 (2007)
- [3] Shitov S. V., Vystavkin A. N. A design analysis of imaging radiometer with antenna-coupled transition-edge sensors // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 559, 2, 503-505 (2006)

- [4] А. Н. Выставкин, А. Г. Коваленко, С. В. Шитов, О. В. Корюкин, И. А. Кон, А. А. Кузьмин, А. В. Уваров, А. С. Ильин, Сверхпроводниковые наноболометры - сенсоры на горячих электронах для сверхчувствительных матричных радиометров терагерцового диапазона частот // Радиотехника и электроника, 55, 6, 710–715 (2010)
- [5] L. Duband, Space-Borne Helium Adsorption Coolers // The Far Infrared and Submillimetre Universe 1997
- [6] Ильин А.С., Кузьмин А.А., Коваленко А.Г., Использование полиэфирсульфона (PES) для электронно-лучевой литографии // Журнал радиоэлектроники. – 2011. –№8. <http://jre.cplire.ru/jre/aug11/8/text.html>
- [7] Dubos P., Charlat P., Crozes Th., Paniez P. and Pannetier B. A thermostable trilayer resist for niobium lift-off. // J. Vac. Sci. Technol., 2000, B 18, 122.
- [8] A. V. Uvarov, S. V. Shitov, A. N. Vystavkin, A cryogenic quasioptical millimeter and submillimeter wavelength bands blackbody calibrator // Measurement Techniques, 53, 9 1047-1054 (2010)
- [9] M. Nahum, J.M. Martinis, Ultrasensitive hot-electron microbolometer. // Appl. Phys. Lett., 1993, 29 November, 63(22), pp. 3075-3077.
- [10] Выставкин А.Н., Шуваев Д.В., Кузьмин Л.С. и др. // ЖЭТФ, 88, 3, 598 (1999)
- [11] Асламазов Л.Г., Ларкин А.И. // ФТТ, 10, 1104 (1968)