

**БОЛОМЕТР НА ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНАХ В НОРМАЛЬНОМ МЕТАЛЛЕ С
АНДРЕЕВСКИМ ОТРАЖЕНИЕМ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ БЕРЕГАХ**

*А. Н. Выставкин, Д. В. Шуваев, Л. С. Кузьмин, М. А. Тарасов**

*Институт радиотехники и электроники Российской академии наук
103907, Москва, Россия*

Э. Адерстед†, М. Вилландер, Т. Клаесон

*Department of Microelectronics and Nanoscience, Chalmers University of Technology
Gothenburg, Sweden*

Поступила в редакцию 24 августа 1998 г.

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования высокочувствительного болометра на горячих электронах в пленке нормального металла с андреевским отражением в сверхпроводящих берегах и электронным охлаждением с помощью перехода сверхпроводник—изолятор—нормальный металл. Для измеренной теплопроводности $G \approx 6 \cdot 10^{-12}$ Вт/К и постоянной времени $\tau = 0.2$ мкс при температуре 300 мК оценка мощности эквивалентной шуму составляет $NEP = 5 \cdot 10^{-18}$ Вт/Гц^{1/2} для флуктуаций температуры в качестве источника шума. При температуре 100 мК теплопроводность уменьшается до $G \approx 7 \cdot 10^{-14}$ Вт/К, что дает $NEP = 2 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц^{1/2} при постоянной времени $\tau = 5$ мкс. Такой микроболометр предназначен для использования в качестве детектора миллиметровых и субмиллиметровых волн в космических радиотелескопах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые болометр с разогревом электронов в пленке нормального металла и андреевским отражением в сверхпроводящих берегах (ННЕВ) был описан в работах [1, 2]. Была продемонстрирована очень высокая чувствительность при рабочих температурах в районе 100 мК. Такой болометр представляет собой полосу пленки нормального металла малых размеров, подключенную к двум сверхпроводящим электродам. Ток микроволнового сигнала протекает через электроды в пленку и нагревает электронный газ в полоске нормального металла. Важно, что электроны не могут отдать тепловую энергию в электроды по причине андреевского отражения на границе сверхпроводник—нормальный металл. Электроны могут отдавать энергию решетке, однако при температурах менее 1 К электрон-фононное взаимодействие становится очень слабым и передача энергии от разогретых электронов решетке значительно уменьшается. Эта слабая тепловая связь характеризуется теплопроводностью G и определяет значительный рост температуры при малой мощности возбуждения, т. е. эффект разогрева электронов. Для детектирования изменений температуры электронов используется дополнительный переход структуры сверхпроводник—изолятор—нормальный металл (SIN), в котором роль нормального электрода выполняет разогреваемая пленка нормального металла (см.

* E-mail: Tarasov@hitech.cplire.ru

† E. Aderstedt, M. Willander, T. Claeson.

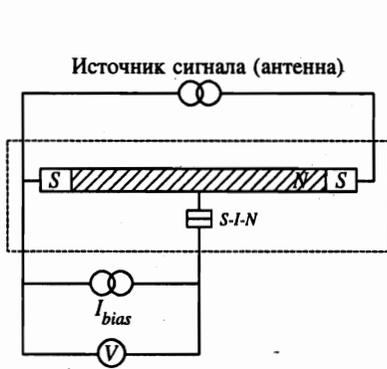


Рис. 1

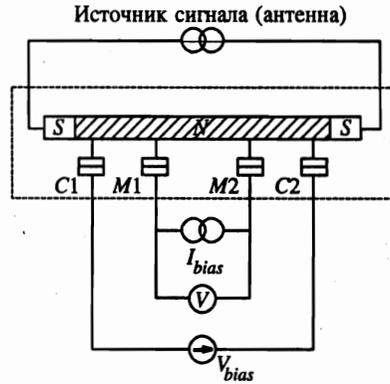


Рис. 2

Рис. 1. Структура микроболметра: SIN-переход с источником малого постоянного смещения. Напряжение на переходе зависит от сглаживания вольт-амперной характеристики тепловыми шумами, что является мерой температуры поглотителя из нормального металла (заштрихован)

Рис. 2. Структура микроболметра с электронным охлаждением. Два низкоомных SIN-перехода (C1 и C2) смещены постоянным напряжением и используются для снижения эффективной электронной температуры пленки нормального металла поглотителя (заштрихована). Два высокоомных SIN-перехода (M1 и M2) смещены малым постоянным током и используются для измерения электронной температуры

рис. 1). Форма вольт-амперной характеристики SIN-перехода зависит от электронной температуры пленки нормального металла. На переход подают постоянный ток смещения и измеряют изменения напряжения, т. е. линейный в широком диапазоне мощностей отклик $\Delta V(T)$. Важной чертой такого болометра является равенство тепловой постоянной времени τ и времени электрон-фононной релаксации τ_{e-ph} . Типичные значения $\tau = 10$ мкс при 100 мК и $\tau = 0.4$ мкс при 300 мК оказываются много меньшими, чем требуется для большинства применений [1, 3].

Поскольку высокочувствительные детекторы субмиллиметровых волн требуются в основном для космической радиоастрономии, ННЕВ-приемник при рабочей температуре в районе 300 мК, достижимой с помощью простых и легких ³He-криостатов, представляется весьма привлекательным. Требования Европейского космического агентства к болометрическим детекторам для будущих инфракрасных и субмиллиметровых спутниковых радиоастрономических систем изложены в [3]. Такой детектор должен работать при температуре 300 мК и иметь мощность эквивалентную шуму $NEP < 1 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2} при постоянной времени $\tau < 1$ мс.

Существуют три основных компоненты шумов, дающих вклад в NEP болометра:

$$NEP = \left[4k_B T_e^2 G + \frac{V_j^2}{S^2} + \frac{V_n^2}{S^2} \right]^{1/2}, \tag{1}$$

где T_e — температура электронов в поглотителе, $G = dP/dT$ — теплопроводность для теплоотова, вызванного сигналом разогрева, $S = dV/dP = (dV/dT)G^{-1}$ — отклик детектора, V_j — флуктуации напряжения в SIN-переходе и V_n — флуктуации напря-

жения в усилителе. Первый член описывает флуктуации температуры в поглотителе и определяет фундаментальный предел шумов для данного устройства при данной температуре. Из этого выражения ясно, что именно малое значение G определяет малую величину NEP этого типа болометра.

Нами предложено для дальнейшего снижения NEP использовать известный [4] механизм электронного охлаждения путем снижения электронной температуры T_e электронного газа в поглотителе болометра, оставляя практически неизменной физическую температуру решетки около 300 мК [5]. В таком устройстве осуществляется баланс между нагревом электронов фононами и их охлаждением посредством туннельного перехода, смещенного постоянным напряжением в рабочую точку в районе энергетической щели, что позволяет удалять наиболее высокоэнергетичные электроны (см. рис. 2).

Согласно предварительным оценкам [5], полная теплопроводность G не может быть снижена электронным охлаждением, поскольку при этом добавляется еще один канал теплопритока. Электронное охлаждение может улучшить предельные параметры NEP за счет уменьшения T_e в первом члене в (1) и за счет увеличения температурного отклика dV/dT , давая более высокие значения S во втором и третьем членах NEP [5].

2. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ

Мы разработали и изготовили несколько вариантов $NHEB$, в том числе с дополнительными SIN -переходами для охлаждения. Первым был создан микроболометр с одиночным туннельным переходом для измерения электронной температуры поглотителя [6]. Поглотитель и сверхпроводящие электроды формировались с использованием прямой электронной литографии и техники напыления под разными углами (*shadow evaporation technique*). Сверхпроводящие электроды из алюминиевой пленки толщиной 40 нм наносились первыми и окислялись в течение 2 мин в атмосфере кислорода при давлении $4 \cdot 10^{-2}$ мбар для формирования туннельного барьера. Затем наносились 3 нм хрома и 35 нм серебра в форме полоски поглотителя длиной 6 мкм и шириной 0.25 мкм. После этого наносились два сверхпроводящих электрода толщиной 120 нм из пленки свинца с дополнительной литографией и травлением. Ионное травление *in situ* перед нанесением пленки использовалось для удаления окислов и загрязнений на границе между пленками нормального металла и сверхпроводника.

Измерены вольт-амперные характеристики детекторного SIN -перехода при различных температурах и различных значениях поглощенной мощности сигнала (рис. 3). Сопротивление короткого образца ($l = 6$ мкм) составило 12 Ом. Зависимость напряжения V при постоянном токе смещения через переход от тока сигнала I_{abs} в поглотителе измерялась при постоянной температуре для двух образцов с различающейся вдвое длиной поглотителя. Соответствующие кривые $V(I)$ для двух образцов практически совпадают (рис. 4). Значение производной dV/dI_{abs} прямо связано с формой кривой и может быть выражено через температурный отклик, обратную теплопроводность и производную dP/dI_{abs} :

$$\frac{dV}{dI_{abs}} = \frac{dV}{dP} \frac{dP}{dI_{abs}} = \frac{dV}{dT} \left(\frac{dP}{dT} \right)^{-1} \frac{dP}{dI_{abs}}$$

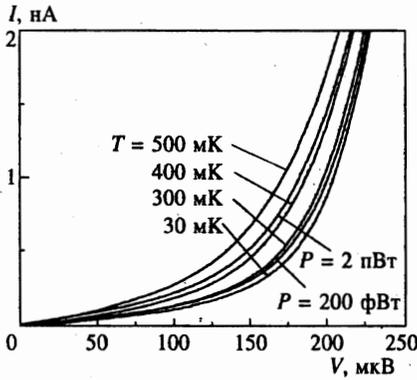


Рис. 3

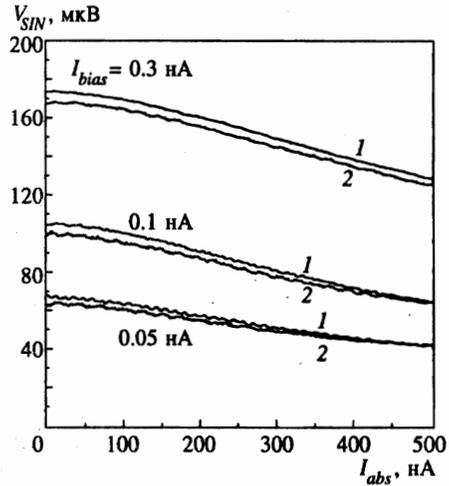


Рис. 4

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики *SIN*-перехода, измеренные при различных температурах без тока сигнала и для двух значений тока сигнала при физической температуре 30 мК

Рис. 4. Зависимости напряжения на *SIN*-переходе при постоянном токе через переход I_{bias} от тока через поглотитель для двух образцов длиной 6 (кривые 1) и 12 мкм (кривые 2) при физической температуре 30 мК

Из формулы Джоуля можно получить

$$P = P_{Joule} = I_{abs}^2 R \rightarrow \frac{dP}{dI_{abs}} = 2RI_{abs}.$$

Обратная теплопроводность может быть получена из выражения для теплообмена в случае эффекта разогрева электронов:

$$P_{e \rightarrow ph} = \Sigma U (T_e^5 - T_{ph}^5) \rightarrow \frac{dP}{dT} = 5\Sigma U T^4, \tag{2}$$

где Σ — характерный параметр материала, и если предположить выполнение условия равновесия, то $P_{Joule} = P_{e \rightarrow ph}$. После замены получим

$$\frac{dV}{dI_{abs}} = \frac{dV}{dT} \left(\frac{2I_{abs}R}{5\Sigma T^4 U} \right) \propto \frac{R}{U}. \tag{3}$$

Совпадение кривых означает, что увеличение рассеиваемой мощности P за счет увеличения сопротивления R в точности компенсируется возрастанием теплопроводности за счет увеличения объема U , т. е. нет никакого существенного потока тепла через границу сверхпроводник—нормальный металл. Это является прямым подтверждением эффекта андреевского отражения. Зависимость $V(I_{abs})$ была затем пересчитана к величине $V(P)$. Максимальный отклик по мощности при оптимальном токе $I_{bias} = 0.3$ нА составил $S_{max} = |dV/dP| = 3 \cdot 10^7$ В/Вт. Объединив зависимости $V(I_{bias}, T)$ и $V(I_{bias}, P)$, можно рассчитать зависимость $P(T_e)$ (рис. 5).

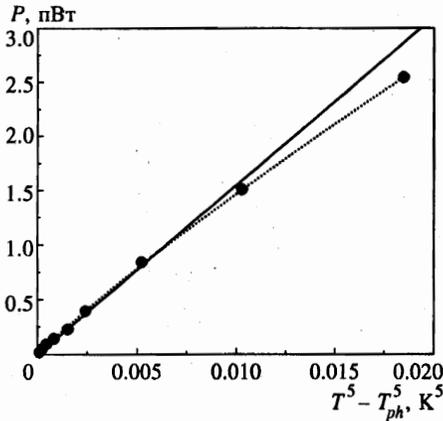


Рис. 5. Зависимость поглощенной мощности от $T^5 - T_{ph}^5$, где T — температура электронов, полученная из измерений $V(I_{bias}, T)$, и $T_{ph} = 30$ мК — температура подложки, измеренная как температура держателя подложки. Линейная зависимость $P = 1.55 \cdot 10^{-10}(T^5 - T_{ph}^5)$ соответствует соотношению (2)

Сравнивая экспериментальные результаты с выражением (2), можно определить параметр материала $\Sigma \approx 3 \cdot 10^{-9}$ нВт·К⁻⁵·мкм⁻³ и, соответственно, теплопроводность $G \approx 6 \cdot 10^{-12}$ Вт/К при 300 мК. Эта величина вдвое меньше, чем рассчитанная с использованием данных из [2]. Такое уменьшение возникает за счет меньшего объема поглотителя в нашем случае. Компонента флуктуаций температуры в NEP (1), рассчитанная для этой величины G , составляет около $5 \cdot 10^{-18}$ Вт/Гц^{1/2}, что существенно меньше, чем в требованиях Европейского космического агентства для полной мощности NEP для будущих космических болометров [3]. При 100 мК теплопроводность заметно уменьшается до $G \approx 7 \cdot 10^{-14}$ Вт/К. Эта величина G дает компоненту шума за счет флуктуаций температуры в полную величину $NEP = 2 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц^{1/2}.

Тепловая постоянная времени может быть рассчитана как $\tau = C/G$, где C — электронная теплоемкость. Для полученного значения Σ можно вывести $\tau \approx 5T^{-3}$ нс. При $T = 300$ мК постоянная времени $\tau \approx 0.2$ мкс, и при $T = 100$ мК она составляет $\tau \approx 5$ мкс, что значительно лучше, чем обычно требуется.

При физической температуре 100 мК и ниже чувствительность ННЕВ существенно не улучшалась. Это было связано с качеством измерительного туннельного перехода, у которого заметное изменение формы вольт-амперной характеристики с температурой происходило при температуре выше 300 мК. Такое поведение может быть связано с тепловой обработкой при выполнении второй литографии.

3. ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Используя такую же технологию, мы изготовили ННЕВ с четырьмя туннельными переходами, см. рис. 2 и рис. 6, 7. Абсорбер в этом случае представлял собой медную пленку толщиной 40 нм, шириной 0.25 мкм и длиной 7 мкм. Для эффективного охлаждения электронов сопротивление каждого охлаждающего перехода должно было быть порядка 1 кОм. В то же время измерительные переходы должны иметь сопротивление существенно больше 10 кОм, чтобы использовать слабый ток смещения. Для выполнения этих условий были использованы переходы сильно различающейся площади (0.2 мкм² для больших и 0.01 мкм² для малых переходов). В результате было получено отношение нормальных сопротивлений переходов более 20, что может объясняться окислением с торцов, что сильнее влияет на малые переходы, чем на большие.

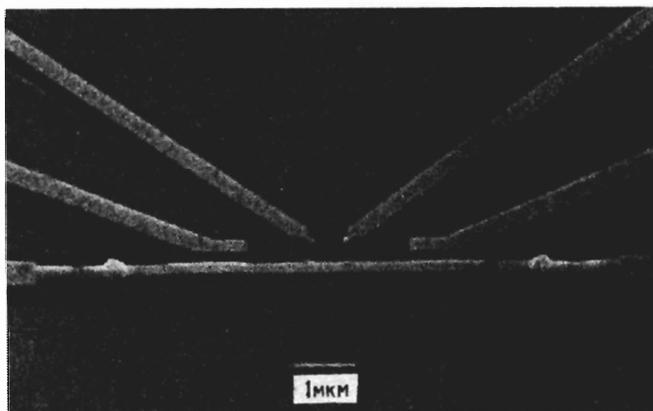


Рис. 6. Полученная с помощью электронного микроскопа фотография микроболометра с электронным микрорефрижератором, изготовленного методом напыления под разными углами. Верхняя горизонтальная полоска изготовлена из меди и является поглотителем. Более темный слой — алюминий, два больших и два малых перехода сформированы там, где полоска поглотителя перекрывает оксидированные алюминиевые электроды. Концы поглотителя соединяются с алюминиевыми электродами, изготовленными с использованием отдельной литографии

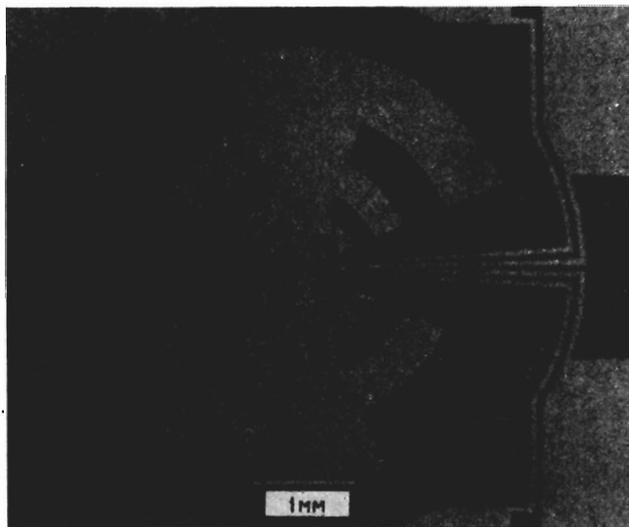


Рис. 7. Общий вид образца с планарной логопериодической антенной, предназначенной для работы на частотах 100–1000 ГГц

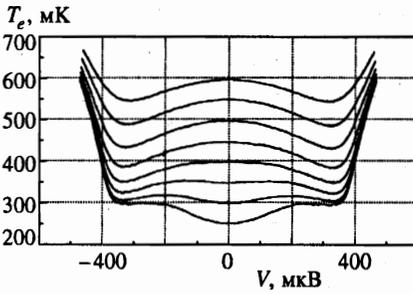


Рис. 8. Температура электронов T_e в поглотителе как функция приложенного к двум большим SIN -переходам напряжения ($R_n^{C1} + R_n^{C2} = 625 \text{ Ом} + 645 \text{ Ом}$) при различных начальных температурах. Величина T_e рассчитана из результатов измерений изменений напряжения на двух малых переходах ($R_n^{M1} + R_n^{M2} = 62 \text{ кОм} + 116 \text{ кОм}$), смещенных небольшим постоянным током, с использованием калибровочной кривой, полученной путем отдельного измерения

Для демонстрации эффекта электронного охлаждения были измерены зависимости изменения напряжения на детекторном переходе при постоянном токе смещения от напряжения на больших переходах. Затем полученные изменения были прокалиброваны как функции температуры в криостате, когда большие переходы не подключены к источнику постоянного смещения.

Результирующие кривые, измеренные при различных стартовых температурах $T_{ph} = T_e$ при $V = 0$ приведены на рис. 8. Наблюдается как эффект охлаждения, так и его неожиданное подавление при температурах ниже 400 мК и 250 мК соответственно. Одной из причин такого эффекта может быть обычный тепловой разогрев током, текущим между туннельными переходами. Для проверки этого предположения мы разместили большие переходы на расстоянии всего лишь 0.5 мкм один от другого, но поведение системы в целом не изменилось.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны, изготовлены и исследованы болометры на горячих электронах в пленке нормального металла малых размеров с андреевским отражением в сверхпроводящих берегах. Эксперименты с поглотителями разной длины подтвердили, что теплопроводность в основном определяется электрон-фононным взаимодействием и практически никакого теплового транспорта через границу между сверхпроводниками и нормальным металлом не происходит. Измеренные значения теплопроводности составили $6 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/К}$ и $7 \cdot 10^{-14} \text{ Вт/К}$ в микроболометре с коротким поглотителем при температурах 300 мК и 100 мК соответственно. Это соответствует постоянным времени $\tau = 0.2 \text{ мкс}$ и $\tau = 5 \text{ мкс}$ и мощности эквивалентной шуму $NEP = 5 \cdot 10^{-18} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ и $NEP = 2 \cdot 10^{-19} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ для флуктуаций температуры в качестве основного источника шума. Эти параметры, в особенности постоянная времени, значительно превышают соответствующие, полученные на обычных сверхпроводниковых болометрах [7]. Подтверждена концепция использования электронного охлаждения такого болометра с помощью дополнительных SIN -переходов, что позволит уменьшить мощность эквивалентную шуму и упростить систему охлаждения болометра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки Российской Федерации, Российского фонда фундаментальных исследований, INTAS и Шведской

академии наук. Авторы выражают признательность академикам А. Ф. Андрееву и Н. С. Кардашеву за стимулирование данной работы.

Литература

1. M. Nahum, P. L. Richards, and C. A. Mears, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3**, 2124 (1993).
2. M. Nahum and J. M. Martinis, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 3075 (1993).
3. ESA tender A03288 Hot-electron microbolometers, opened Oct. 2, 1997.
4. M. M. Leivo, J. P. Pekola, and D. V. Averin, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 1996 (1996).
5. L. Kuzmin, I. Devyatov, D. Golubev, in *Proc. of the 4 Int. Conf. on Millimeter and Submillimeter Waves and Applications*, SPIE Int. Society Publ. (1998), p. 63.
6. D. Chouvaev, L. Kuzmin, M. Tarasov et al., in *Proc. of the 9th Int. Symp. on Space THz Technology*, JPL, California Inst. Techn., NASA (1998), p. 331.
7. A. T. Lee, S-F. Lee, J. M. Gildemeister, and P. L. Richards, in *Proc. of the 7th Int. Workshop on Low Temperature Detectors*, Munich (1997), p. 123.