Письма в ЖЭТФ, том 76, вып. 8, с. 588 – 591

Экспериментальное исследование болометра на горячих электронах в нормальном металле с емкостной связью

М. Тарасов[+△], *М. Фоминский*[+△], *А. Калабухов*[*△], *Л. Кузьмин*[*△]

[+] *Институт радиотехники и электроники РАН, 101999 Москва, Россия*

[*] *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия*

[△] *Чалмерский технологический университет, S41296 Гетеборг, Швеция*

Поступила в редакцию 19 сентября 2002 г.

Болометр на горячих электронах в нормальном металле с емкостной теплоизоляцией (БГЭНЕ) представляет собой дальнейшее развитие концепции болометра на горячих электронах в нормальном металле с андреевскими зеркалами (БГЭНА). Он был предложен для устранения частотного и энергетического ограничения БГЭНА, в котором андреевские зеркала действуют эффективно только для относительно длинных абсорберов и энергий ниже энергетической щели в сверхпроводнике. Важным достоинством БГЭНЕ является простота топологии, в которой одни и те же туннельные переходы обеспечивают тепловую развязку, защиту от наводок, измерение температуры и могут быть использованы для электронного охлаждения. Температурный отклик болометра измерялся при охлаждении до 260 мК. Экспериментально наблюдался отклик $dV/dT = 1.7$ мВ/К, что соответствует чувствительности $S = 0.4 \cdot 10^9$ В/Вт. Измеренные шумы на выходе усилителя с этим образцом составили $V_{na} = 4$ нВ/Гц$^{1/2}$, что соответствует мощности эквивалентной шуму (МЭШ) равной 10^{-17} Вт/Гц$^{1/2}$. Для измерения оптического отклика в качестве источника сигнала внутри криостата использовано излучение черного тела, представляющего собой тонкую NiCr пленку, нанесенную на тонкую сапфировую подложку и подвешенную на нейлоновых нитях. Оптические измерения оказались в хорошем соответствии с измерениями на постоянном токе.

PACS: 44.20.+b, 73.23.–b, 74.50.+r

1. Топология образцов и их изготовление. Концепция болометра на горячих электронах в нормальном металле с емкостной теплоизоляцией (БГЭНЕ) была предложена в [1]. Ключевая идея конструкции заключается в замене на емкостные развязки андреевских зеркал, применяемых для тепловой изоляции абсорбера от электродов в болометре на горячих электронах в нормальном металле с андреевскими зеркалами (БГЭНА). Это позволяет избежать частотных ограничений для андреевских зеркал, которое возникает при перегреве электронов выше энергетической щели. Согласование импеданса абсорбера на частоте сигнала осуществляется через те же емкости, которые реализуют высокий потенциальный барьер для горячих электронов. Для планарной комплементарной логопериодической антенны на кремниевой подложке импеданс можно оценить по формуле $Z_{\text{ant}} = 377[2(1+\varepsilon)]^{1/2} = 80$ Ом. Импеданс болометра состоит из емкостной, индуктивной и резистивной составляющих, соединенных последовательно:

$$Z_{bol} = \frac{2}{i\omega C} + i\omega L + R. \tag{1}$$

Для планарной антенны с действительным импедансом можно скомпенсировать индуктивность полоски абсорбера емкостью туннельных переходов. Для длины абсорбера 10 мкм $Z_L = 20$ Ом на 300 ГГц требуемый емкостной импеданс составляет 30 фФ, что легко достигается на туннельных переходах размером 1×0.5 мкм^2. В результате образуется дополнительный полоснопропускающий фильтр, который дополнительно уменьшает нежелательное воздействие теплового фонового излучения. Одновременно эти же туннельные переходы действуют как температурные сенсоры и выполняют электронное охлаждение, по аналогии с эффектом Пелтье в полупроводиках.

Образцы изготавливали на кремниевых подложках размером 7×7 мм с 16 контактными площадками. Каждый чип включал 6 БГЭНЕ структур, одну интегрированную с логопериодической антенной, четыре с двойными дипольными антеннами для центральных частот 300 и 600 ГГц, одну тестовую структуру с двумя дополнительными туннельными переходами для измерения температуры вдоль полоски абсорбера (см. микрофотографию на рис.1). Контактные площадки и антенны изготавливали с использованием УФ литографии и последовательного термического напыления 10 нм Cr, 40 нм Au и 10 нм Pd слоев. Структуру болометра формировали прямой

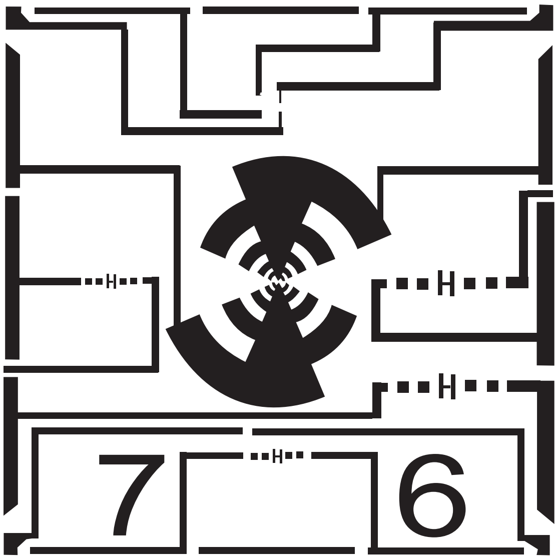

Рис.1. Микрофотография чипа болометра с 16 контактными площадками и 6 БГЭНЕ структурами. В центре расположена логопериодическая антенна, справа – две двойных дипольных антенны для центральной частоты 300 ГГц, слева и внизу в центре – для 600 ГГц

электронной литографией и теневым напылением под разными углами через двойную маску из фоторезистов PMMA и COPOLYMER в одном вакуумном цикле. При этом напыляли 60 нм Al, 2 мин окисляли в кислороде при давлении 10^{-1} мБар, затем напыляли двуслойную пленку Cr/Al под другим углом. Пленка нормального металла в болометре была длиной 8 мкм, шириной 0.2 мкм и толщиной 80 нм. Сопротивление болометров с двуслойными пленками из 50 нм Cr и 10 нм Al составляло около 100 Ом, что близко к оптимальному сопротивлению как логопериодической, так и двойной дипольной антенн. Для сравнения приведены также результаты измерений с образцом, содержавшим 50% хрома и 50% алюминия. Емкость туннельных переходов составляла около 3 фФ, так что для двух последовательно соединенных емкостей, 100 Ом болометра и собственной индуктивности полоски резонансная частота составляет около 250 ГГц.

2. Экспериментальные результаты. Образцы помещали на плоской поверхности удлиненной гиперполусферической сапфировой линзы, размещенной на испарителе He3 абсорбционного криоохладителя замкнутого цикла (см. [2]). Криоохладитель размещался на холодной плате гелиевого криостата фирмы Infrared Labs [3] с оптическим окном. Пары жидкого гелия откачивали до достижения температуры 1.7 К. Минимальная температура в системе составила 260 мК. В качестве примера на рис.2 приведены ВАХ одного из образцов. Из этих зависимостей можно по-

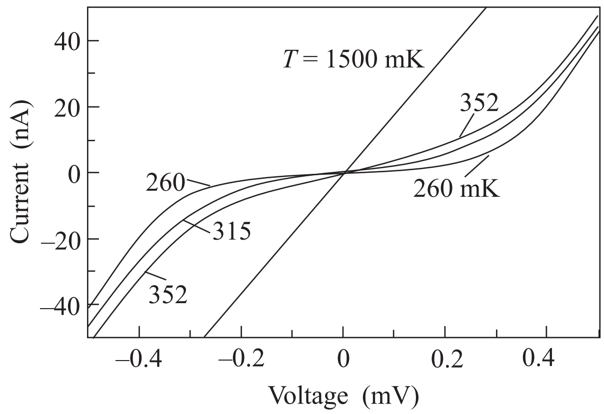

Рис.2. Вольт-амперные характеристики болометра, измеренные при температурах от 260 мК до 1.5 К

лучить зависимости напряжения от температуры и чувствительность dV/dT при различных температурах и смещениях по постоянному току, см. рис.3.

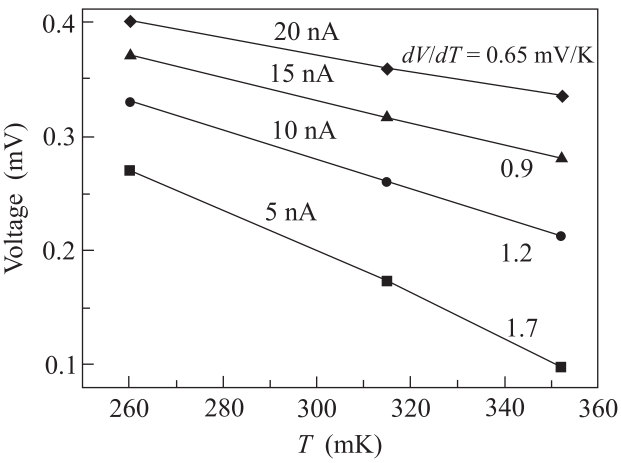

Рис.3. Зависимости напряжения на болометре от температуры для различных значений тока смещения

Для измерения чувствительности и шумов болометра по реальному микроволновому сигналу в наших экспериментах в качестве источника сигнала использован источник излучения черного тела с модулируемой температурой (Haller-Beeman Assoc. Inc, детальное описание см. в [4]), состоящий из тонкой NiCr пленки, нанесенной на тонкую сапфировую подложку, подвешенную на тонких нейлоновых нитях. При пропускании через пленку тока она нагревается и служит источником излучения. Источник размещали на холодной плате криостата при базовой температуре 1.7 К и его выходной рупор был направлен на линзу с БГЭНЕ, находившуюся на расстоянии нескольких сантиметров от источника. Приложение от источника тока мощности в несколько милливатт вызывает излучение с эквивалентной температурой до

100 К. Источник позволяет получать модулированные сигналы в широком диапазоне частот. Зависимости отклика болометра от напряжения смещения, измеренные в режиме вариации температуры (рис.4, кривая DVT), и от встроенного источника излучения

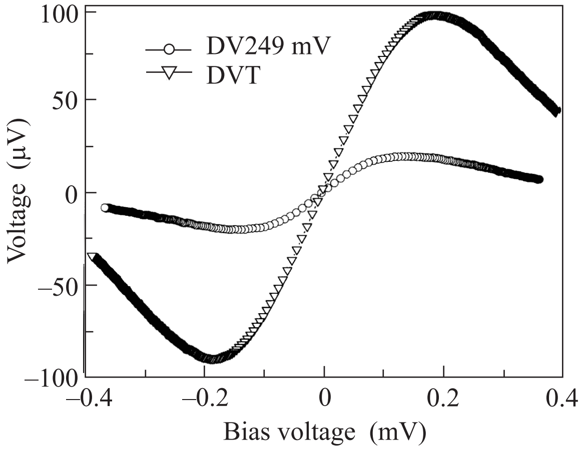

Рис.4. Отклик по напряжению БГЭНЕ на изменение температуры (кривая DVT) и на излучение черного тела (кривая DV 249 mV)

(кривая DV249mV) демонстрируют разумное соответствие теоретическим оценкам.

Для оценки мощности, эквивалентной шуму, были проведены измерения низкочастотных шумов на выходе болометра. Измерены зависимости спектральной плотности флуктуаций напряжения от частоты, а также зависимости шумов от напряжения смещения на нескольких частотах. В образце с 50 нм хрома и 10 нм алюминия в рабочей точке с максимальным откликом шумы болометра и усилителя составили 4 нВ/Гц$^{1/2}$. Зависимость спектральной плотности шумов от напряжения смещения в области белого шума для образца с 30 нм хрома и 30 нм алюминия представлена на рис.5. На основании этих измерений мы можем взять значения спектральной плотности шумов усилителя 3 нВ/Гц$^{1/2}$, что соответствует техническим данным изготовителя операционного усилителя OP27, болометра с усилителем в рабочей точке 200 мкВ на уровне 6.5 нВ/Гц$^{1/2}$ на 3 кГц и выше, 8.5 нВ/Гц$^{1/2}$ на 1 кГц.

Высокие значения отклика для образцов с двуслойными пленками абсорбера отличаются от предсказываемого простой теорией для СИН (сверхпроводник – изолятор – нормальный металл) датчика и могут быть связаны с влиянием электронного охлаждения.

Обсуждение результатов и оценка чувствительности БГЭНЕ. Теоретические значения отклика СИН перехода могут быть получены с использованием простого аналитического выражения

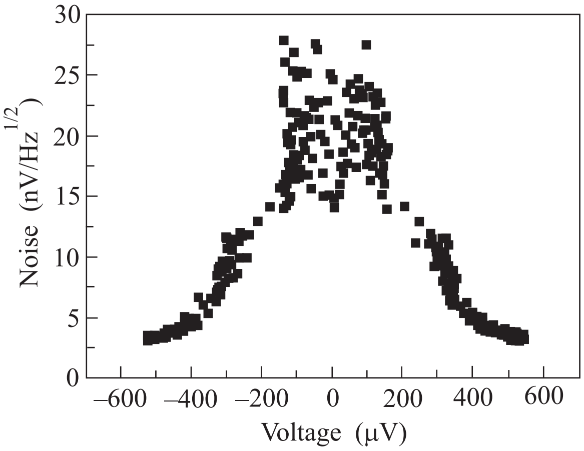

Рис.5. Зависимость шумов в диапазоне 1–10 кГц от напряжения смещения на болометре с 30 нм хрома и 30 нм алюминия. При смещении больше 500 мкВ шумы ограничены усилителем

$$I(V,T) = \frac{k}{eR}\sqrt{11TT_c} \cdot \exp\left(-\frac{1.76T_c}{T}\right) \cdot \sinh\left(\frac{eV}{kT}\right), \quad (2)$$

которое дает хорошее соответствие с экспериментальными результатами для СИН перехода с чисто хромовым абсорбером. Из этого соотношения можно получить значения максимального температурного отклика СИН перехода при различных значениях окружающей температуры. Для нашей базовой температуры 270 мК одиночный переход должен иметь отклик около 0.5 мВ/К, для увеличения этого отклика вдвое (до 1 мВ/К) электронная температура должна быть 163 мК. Наблюдаемые в эксперименте высокие значения отклика могут объясняться совместным действием двух механизмов: электронного охлаждения, а также увеличения нелинейности перехода за счет эффекта близости, когда его нужно рассматривать как СИНС (сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – сверхпроводник) структуру, которая в пределе нулевой температуры приближается к СИС* (сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник с ослабленной щелью) структуре.

Шумы в структуре из двух последовательно соединенных туннельных переходов можно вычислить с использованием простого выражения для спектральной плотности флуктуаций тока в одном переходе:

$$S_I(V) = \frac{2eV}{R}\mathrm{ctgh}\left(\frac{eV}{2kT}\right). \quad (3)$$

Для получения флуктуаций напряжения следует флуктуации тока домножить на дифференциальное сопротивление переходов, которое можно получить из выражения (2). Рассчитанные зависимости дифференциального сопротивления и шумов от напряжения смещения оказались близки к измеряемым.

В наших первых экспериментах в [5] оценка предельных параметров БГЭНЕ (NEP $= 2.5 \times 10^{-17}$ Вт/Гц$^{1/2}$) далека от теоретических оценок по причине неоптимальных образцов и высоких шумов последующего усилителя сигнала. В данной работе получена крутизна характеристики $dV/dT = 1.7$ мВ/К при 260 мК для образца MF46p6-16. При оценках отклика по напряжению $S = dV/dP = (1/G)dV/dT$ мы использовали значения теплопроводности $G = dP/dT = 5\Sigma\nu T^4$, характерной постоянной материала $\Sigma = 2.5 \cdot 10^9$ Вт $\cdot$ м$^{-3} \cdot$ К$^{-5}$ (измерено в отдельном эксперименте на образцах с БГЭНА с калибровкой по рассеиваемой мощности источника постоянного тока в пленке меди; для образцов с двухслойными пленками абсорбера требуется дополнительное детальное исследование зависимости характерной постоянной материала от температуры), объеме образца $n = 8 \cdot 10^{-20}$ м^3, что соответствует $G = 5 \cdot 2.5 \cdot 10^9 \cdot 8 \cdot 10^{-20}(0.256)^4 = 4.3 \cdot 10^{-12}$ Вт/К и $S = 1.7 \cdot 10^3/(4.3 \cdot 10^{-12}) = 0.4 \cdot 10^9$ В/Вт. Для выходных шумов болометра и усилителя $V_{na} = 4$ нВ/Гц$^{1/2}$ мощность эквивалентная шуму (МЭШ или NEP) равна $V_{na}/S = 6 \cdot 10^{-18}$ Вт/Гц$^{1/2}$. Пример измеренной МЭШ приведен на рис.6. Если пленка абсорбера состоит из нормального и сверхпроводящего слоев,

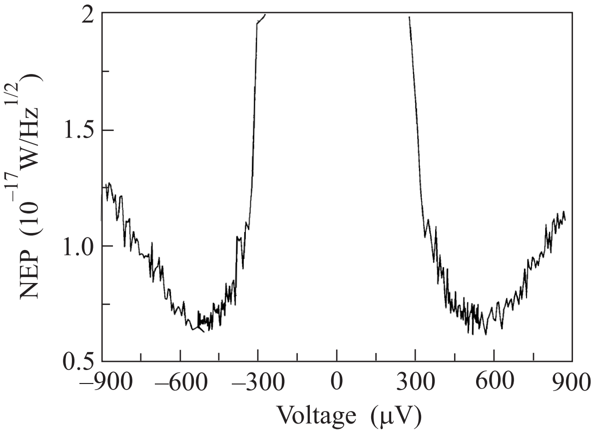

Рис.6. Мощность эквивалентная шуму, измеренная для образца с 30 нм Cr и 30 нм Al в пленке поглотителя

то все горячие электроны будут сконцентрированы в пленке нормального металла за счет эффекта андреевского отражения. Это приведет к эффективному уменьшению объема и соответствующему росту вольт-ваттной чувствительности. Выигрыш достигается за счет эффективного уменьшения объема нормального металла, эффекта близости, андреевского отражения и электронного охлаждения. Важным достоинством высокого отклика является снижение требований к последующему усилителю.

Приведенную выше электрическую МЭШ нужно сравнить с оптической МЭШ, измеренной с использованием излучения черного тела. Измерявшийся образец MF46p6-16 с логопериодической антенной, ширина линии излучения составляла в E-плоскости 5° и 30° в H-плоскости. Ослабление температуры излучения источника составило $\eta = (3/46) \cdot (3/7.7) = 1/40$. Помимо этого, следует учесть потери на отражение на границе вакуум/диэлектрик, рассогласование импедансов, степень черноты источника черного тела, рассогласование направления основного лепестка антенны, потери в боковые лепестки, что дает еще не менее 10 дБ дополнительных потерь. В результате излучение ослабляется в 400 раз и более. Принимаемая мощность излучения составляет $\Delta P = \eta \cdot k \cdot \Delta T \cdot \Delta f = 10^{-13}$ Вт, крутизна отклика $0.4 \cdot 10^9$ В/Вт, что должно давать отклик по напряжению 40 мкВ. Измеренный отклик по напряжению на излучение черного тела составил 20 мкВ, что находится в хорошем соответствии с измеренными значениями.

Заключение. Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы болометры на горячих электронах в нормальном металле с емкостной теплоизоляцией, интегрированные с планарными антеннами субмиллиметровых волн. Электрическая чувствительность достигала 1.7 мВ/К, отклик $S = 0.4 \cdot 10^9$ В/Вт и мощность эквивалентная шуму, 10^{-17} Вт/Гц$^{1/2}$. Измеренный отклик на излучение черного тела находится в хорошем соответствии с электрической мощностью эквивалентной шуму, измеренной при вариации температуры. Полученные результаты указывают на эффективность работы болометра с емкостной теплоизоляцией.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку от STINT (шведское агенство стратегических исследований), KVA (шведская королевская академия наук), VR (шведский научный совет), INTAS # 01-686, 00-384.

1. L. Kuzmin, Physica B: Condensed Matter **284–288**, 2129 (2000).
2. L. Duband and B.Collaudin, Cryogenics **39**, 659 (1999).
3. Infrared Labs, http://www.irlabs.com/catalog/cdewarindex.html.
4. Haller-Beeman Assoc. Inc, http://www.haller-beeman.com.
5. B. Choi, L. Kuzmin, D. Chouvaev, and M. Tarasov, Proc. 4 Int. Workshop *From Andreev Reflection to the International Space Station*, Bjorkliden, Kiruna, Sweden, March 11-18, 2000, pp. 289–314.