

Цепочки болометров на холодных электронах

М. Тарасов, Л. Кузьмин, Н. Каурова

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия

НИИ Ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, 119899 Москва, Россия

Московский государственный педагогический университет, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 22 апреля 2009 г.

После переработки 13 мая 2009 г.

Для улучшения электронного охлаждения, расширения динамического диапазона и согласования входного и выходного импедансов были разработаны, изготовлены и измерены при температурах от 50 до 350 мК последовательные цепочки болометров на холодных электронах. Болометры интегрированы в перекрестно-щелевые антенны для исследования поляризации космического фонового излучения на частоте 345 ГГц. Максимальный температурный отклик составил 6.5 мкВ/мК. Электрическая мощность эквивалентная шуму, при температуре 300 мК составила $1.2 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2}.

PACS: 74.50.+r, 85.25.Pb

Сверхпроводниковые болометры, такие, как болометры на краю сверхпроводящего перехода, болометры на горячих электронах, болометры на кинетической индуктивности сверхпроводника и болометры на холодных электронах являются наиболее чувствительными приемными устройствами субмиллиметрового диапазона. В таких болометрах мощность излучения поглощается в абсорбере из тонкой пленки нормального металла, к которой подключены туннельные переходы типа сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН). Эти СИН-переходы выполняют функции электронного охлаждения (аналогично эффекту Пельтье в полупроводниках), и на них выделяется выходной сигнал, пропорциональный поглощенной мощности. Максимальное электронное охлаждение и максимальный отклик по току наблюдаются в области смещения немного меньше напряжения энергетической щели сверхпроводника в районе максимальной нелинейности вольт-амперной характеристики (ВАХ). Электронное охлаждение позволяет не только улучшить чувствительность, но также и расширить динамический диапазон за счет увеличения мощности насыщения, поскольку поглощенная мощность выносится из абсорбера охлаждающим током. Однако для практических применений в атмосферной радиоастрономии мощность фонового излучения зачастую оказывается выше мощности насыщения одиночного болометра структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (СИНИС), где нормальный металл представляет пленку абсорбера, на краях которой сформированы СИН-переходы. В случае при-

менения цепочек таких структур мощность сигнала распределяется между отдельными болометрами, что позволяет расширить динамический диапазон пропорционально числу болометров в цепочке.

Болометры на холодных электронах продемонстрировали мощность, эквивалентную шуму (МЭШ), на уровне 10^{-16} Вт/Гц^{1/2} при рабочей температуре 500 мК, 10^{-17} Вт/Гц^{1/2} при 280 мК и $2 \cdot 10^{-18}$ Вт/Гц^{1/2} при 100 мК. Эти значения, в принципе, удовлетворяют требованиям многих астрофизических экспериментов в случае, если они сохраняются и для достаточно высокого уровня фонового излучения, принимаемого в реальных экспериментах, особенно на наземных и аэростатных телескопах. Так, для аэростатного проекта BOOMERANG величина фонового излучения на частоте 345 ГГц оценивается на уровне около 5 пВт, что может привести к насыщению одиночного высокочувствительного болометра. В цепочке таких болометров приходящая мощность распределяется между многими болометрами, каждый из которых работает в оптимальных условиях и обеспечивает наилучшую МЭШ [1]. Каждый из болометров выносит тепло в подводные электроды по отдельности, что улучшает условия охлаждения. Недостатком цепочки болометров может быть увеличение объема абсорбера пропорционально числу болометров, что приводит к возрастанию тепловой проводимости от электронов к фононам и росту МЭШ. Для устранения такого ограничения необходимо в том же количестве, что и увеличение числа болометров, уменьшить объем абсорбера. Обычная теневая технология изготовления СИНИС болометров состоит

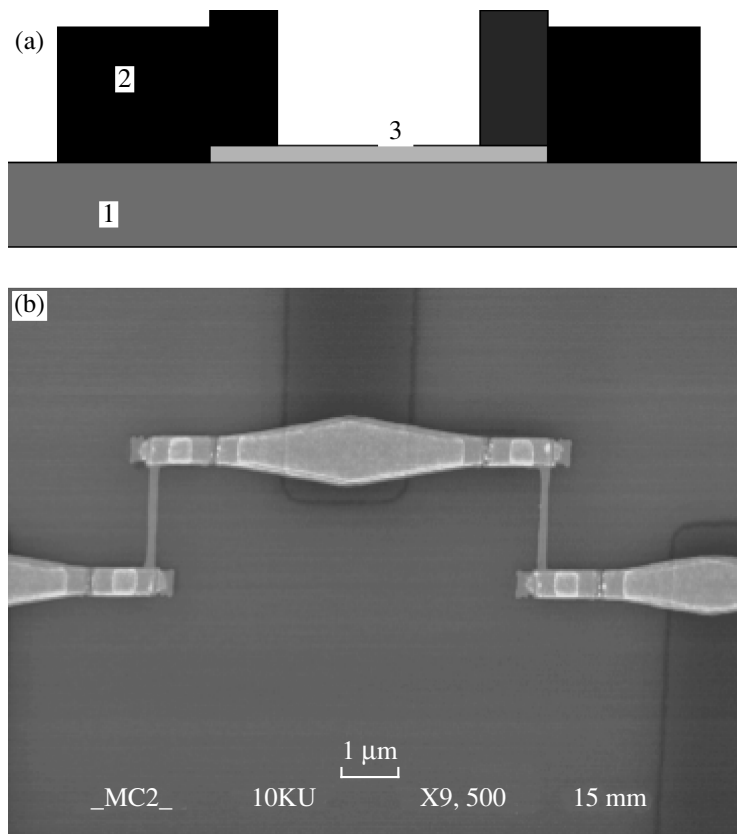


Рис.1. (а) Схематическое изображение СИНИС структуры в разрезе, где 1 – кремниевая подложка, 2 – сверхпроводящие электроды, 3 – абсорбер из нормального металла со слоем окисла на поверхности. (б) Вид в электронном микроскопе фрагмента цепочки с двумя СИНИС элементами

из напыления алюминиевых электродов, окисления для образования туннельного барьера и нанесения без разрыва вакуума пленки абсорбера из нормального металла типа меди. Для избежания разрыва пленок необходимо каждый последующий слой металла делать толще предыдущего. Это накладывает ограничение снизу на толщину верхнего слоя нормального металла абсорбера. Нами разработана технология изготовления болометров в обратной последовательности, когда первым наносят нормальный металл значительно меньшей, чем ранее, толщины. Сложность заключается в необходимости найти такой нормальный металл, который образует высококачественный слой туннельного барьера. Нам удалось получить не сверхпроводящий слой алюминия с использованием подслоя хрома с небольшим количеством его окислов, что подавляет сверхпроводимость за счет ферромагнетизма малой концентрации CrO_2 , который испаряется первым.

Вид образца с перекрестно-щелевой антенной в оптическом и электронном микроскопе представлен на рис.1. Расчетные размеры антенны получены мас-

штабированием аналогичной антенны [2]. В каждом из четырех узлов антенны размещена цепочка болометров, состоящая из четырех абсорберов и восьми туннельных СИН-переходов. Поверх этой структуры затем напыляется пленка изолятора и пленка металла с тем, чтобы сформировать емкости, которые подсоединяют каждый из болометров к узлу антенны параллельно другим, тогда как соединение по выходному сигналу остается последовательным. Такое последовательно-параллельное соединение обеспечивает входной импеданс на частоте сигнала около 70 Ом и выходной низкочастотный импеданс в районе 1 МОм, что обеспечивает согласование как по входу, так и по выходу, а также увеличивает мощность насыщения устройства. Импеданс по входу на частоте сигнала определяется параллельным соединением четырех абсорберов шириной 0.2 мкм, длиной 2 мкм и сопротивлением около 300 Ом каждый, а выходной импеданс определяется последовательным соединением восьми туннельных СИН-переходов с максимальным динамическим сопротивлением более 250 кОм каждый. На частоте

те сигнала туннельные СИН-переходы представляют собой емкость около 0.1 пФ или порядка 5 Ом на 350 ГГц. Эта емкость включена последовательно с индуктивностью и активным сопротивлением абсорбера, и суммарный импеданс близок к действительному [3]. Пары цепочек болометров, включенных в противоположные узлы антенны, позволяют измерять ортогональные компоненты сигнала и исследовать его поляризацию.

Вольт-амперная характеристика такой цепочки болометров представлена на рис.2. Видно, что энер-

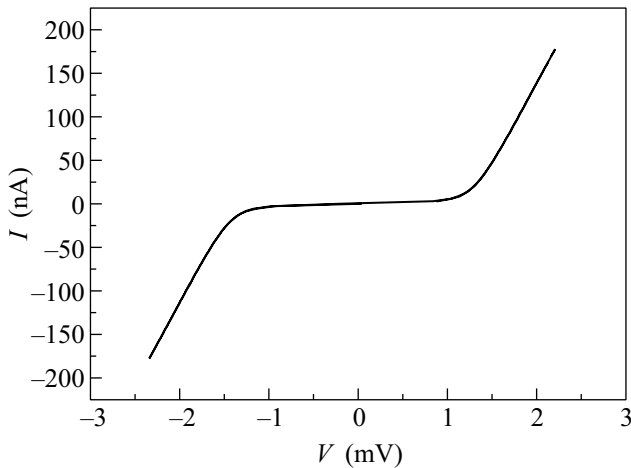


Рис.2. Вольт-амперная характеристика цепочки В1 образца L863

гетическая щель находится при напряжении, равном восьми значениям щели для одиночного СИН-перехода. Отношение сопротивления при нулевом смещении к нормальному сопротивлению цепочки R_0/R_n превышает 800, что близко к теоретической оценке $R_0/R_n = 1000$ для данной рабочей температуры 280 мК. Зависимость дифференциального сопротивления от напряжения смещения приведена на рис.3. Характерные особенности в виде глубоких минимумов в области суммарной энергетической щели 1250 мкВ и характерная кривизна, в отличие от близкой к линейной зависимости при уменьшении напряжения, указывают наличие эффекта электронного охлаждения.

Для оценки электрической мощности, эквивалентной шуму была измерена температурная чувствительность цепочки болометров (см. рис.4). Максимальное значение составило 6.3 мкВ/мК при температуре в районе 300 мК. Для оценки предельной чувствительности такой цепочки болометров возьмем значение теплового потока, обусловленное только электрон-фононным взаимодействием $P = \Sigma \nu (T^5 - T_0^5)$, для которого тепловая проводимость

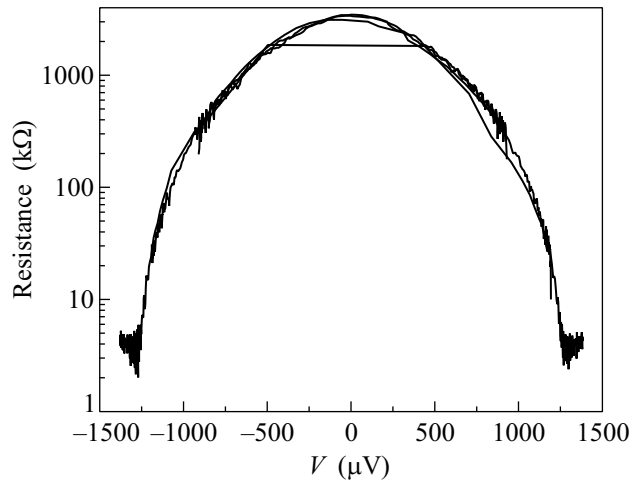


Рис.3. Значения дифференциального сопротивления цепочки в зависимости от напряжения смещения, измеренные при температуре 70 мК

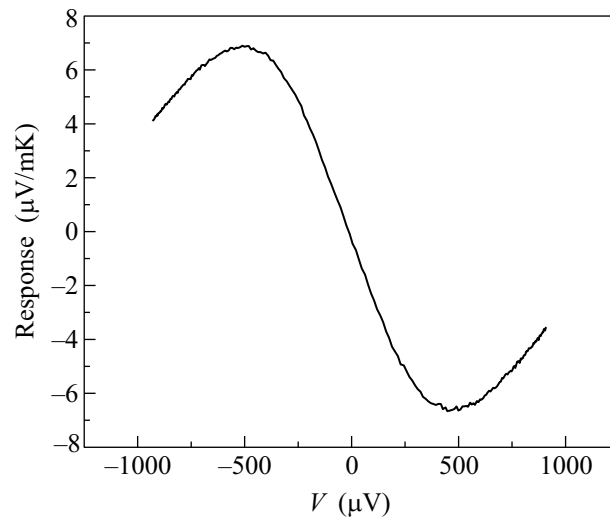


Рис.4. Температурный отклик цепочки болометров от напряжения смещения, измеренный при температуре 300 мК

$G = dP/dT = 5\Sigma\nu T^4$. В этом случае отклик по напряжению на приходящую мощность составит $S = dV/dP = (dV/dT)/(dT/dP) = (dV/dT)/G$. Температурный отклик dV/dT для четырех последовательно соединенных СИНИС болометров составляет $6.3 \cdot 10^{-3}$ В/К. Если взять объем абсорбера для нашей цепочки из 4 болометров равным $\nu = 10^{-19}$ м³ и параметр материала абсорбера $\Sigma = 3 \cdot 10^9$ Вт·м⁻³·К⁻⁵, то получим чувствительность $S = 2 \cdot 10^6 T^{-4} = 3.25 \cdot 10^8$ В/Вт при рабочей температуре 280 мК. Взяв выходной шум болометра в области белого шума $v_n = 4nV/Hz^{1/2}$, можно получить оценку ожидаемой электрической МЭШ

$W = v_n/S = 1.2 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2}. Зависимость электрической МЭШ от напряжения смещения приведена на рис.5. Для реального уровня теплового фонового излучения в районе 5 пВт вклад фотонного шума в МЭШ можно оценить как $NEP_{\text{phot}} = (2P_0 \cdot hf)^{1/2} = 5 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2}. Это значит, что такая цепочка болометров при реальном уровне фона будет ограничена фотонными шумами.

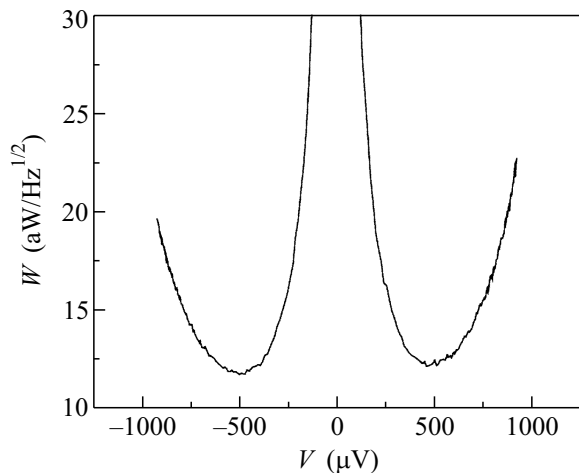


Рис.5. Электрическая мощность, эквивалентная шуму цепочки болометров

Для микроволновых измерений кремниевый кристалл (чип) с перекрестно-щелевой антенной в центре помещали на плоской поверхности удлиненной гиперполусферической кремниевой линзы, направленной на рупор криогенного источника излучения. Был измерен отклик на излучение криогенного теплового источника. Источник монтировался на температурной ступени 2.8 К и состоял из пленки NiCr на тонкой сапфировой подложке, прижатой к рупору, направляющему излучение к квазиоптическому держателю образца болометра, находящемуся при температуре 280 мК. Мощность излучения источника модулировалась подачей переменного нагревающего напряжения смещения на пленку NiCr излучателя. Такой тепловой источник является достаточно медленным и его глубина модуляции уменьшается с ростом частоты модуляции, поэтому амплитуда измеренного отклика уменьшается с 40 до 10 нВ при увеличении частоты от 0.5 до 4 Гц. Согласно калибровке, темпе-

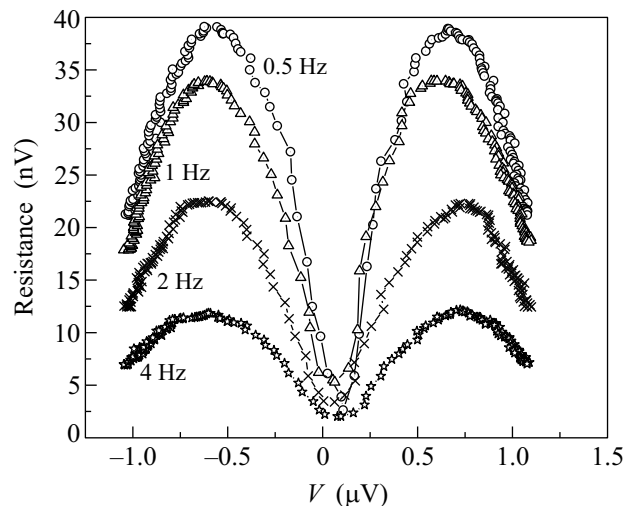


Рис.6. Оптический отклик по напряжению цепочки болометров на излучение теплового источника, модулированного на 0.5 Гц, 1 Гц, 2 Гц, 4 Гц в зависимости от напряжения смещения на цепочке

ратурный градиент излучения источника составляет около 1 К, поэтому мощность излучения в полосе 100 ГГц составляет около 1 пВт. С учетом потерь сигнала за счет рассогласования пучков, отражения от поверхности кремниевой линзы и рассогласования за счет отсутствия согласующих емкостей, измеренный сигнал соответствует отклику болометра не хуже $S_v > 4 \cdot 10^7$ В/Вт. Тепловые шумы болометра в области максимального отклика сопротивления $R = 1$ МОм при $T = 0.3$ К дают спектральную плотность флуктуаций напряжения $V_n = 4$ нВ/Гц^{1/2}. Из этих значений можно получить приблизительную оценку оптической МЭШ болометра не хуже $V_n/S_v = 8 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2}.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант # 05-02-19650, а также Шведских агентств VR, KVA, STINT.

1. Leonid Kuzmin, J. Low Temp. Phys. **151**, 292 (2008).
2. G. Chattopadhyay, F. Rice, D. Miller et al., IEEE Microwave and Guided Wave Lett. **9**, 467 (1999).
3. М. Тарасов, М. Фоминский, А. Калабухов, Л. Кузьмин, Письма в ЖЭТФ **76**, 588 (2002).