Письма в ЖЭТФ, том 92, вып. 6, с. 460 – 464 © 2010 г. 25 сентября

Оптический отклик цепочки болометров на холодных электронах

М. А. Тарасов[+], Л. С. Кузьмин[*], В. С. Эдельман[▽], Н. С. Каурова[□], М. Ю. Фоминский[+], А. Б. Ермаков[+]*

[+] *ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия*

[*] *Chalmers University of Technology, 41296 Göteborg, Sweden*
(Чалмерский технологический университет, Гетеборг, Швеция)

[▽] *Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, 119334 Москва, Россия*

[□] *МПГУ, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 2 августа 2010 г.

Разработана многоэлементная болометрическая приемная система для измерения мощности и поляризации излучения на расчетной частоте 345 ГГц. Цепочки из 10 последовательно-параллельно соединенных болометров на холодных электронах попарно интегрированы в ортогональные порты перекрестно-щелевой антенны. Цепочки соединены параллельно по входному высокочастотному сигналу и последовательно – по измеряемому на низкой частоте выходному сигналу и постоянному смещению. Такая цепочка позволяет увеличить выходное сопротивление в 10^2 раз по сравнению с одиночным болометром при тех же условиях ВЧ согласования и оптимизировать согласование с усилителем на полевых транзисторах вплоть до десятков МОм. Параллельное соединение обеспечивает согласование по входному сигналу с перекрестно-щелевой антенной с импедансом 30 Ом на массивной кремниевой диэлектрической линзе. При температуре 100 мК отклик на тепловое излучения нагревателя со степенью черноты 0.3, перекрывающего входную апертуру антенны и нагретого до 3 К, составил 25 мкВ/К. С учетом реального шума оптическая флуктуационная чувствительность составила на постоянном токе 5 мК, оцененная чувствительность, соответствующая шумам усилителя, $\sim 10^{-4}$ К/Гц$^{1/2}$, мощность эквивалентная шуму МЭШ ~ 1–$5\cdot 10^{-17}$ Вт/Гц$^{1/2}$.

Для космологических экспериментов важная задача – измерение поляризации и интенсивности космического фонового излучения, а также радиоастрономические наблюдения узкополосых источников. Одним из таких экспериментов является аэростатный проект BOOMERanG-3 для диапазона 350 ГГц [1]. Оптимальным детектором для решения этой задачи может быть болометр на холодных электронах (БХЭ) [2 – 4]. В БХЭ реализованы несколько функций туннельного перехода сверхпроводник – изолятор – нормальный металл (СИН): измерение температуры, высокочастотная связь с интегрированной антенной, эффективная тепловая изоляция [2 – 4] и электронное охлаждение [5]. Отклик БХЭ весьма высок, благодаря малому объему абсорбера и низкой температуре. По численным оценкам мощность, эквивалентная шуму (МЭШ; NEP) БХЭ, может достигать 10^{-19} Вт/Гц$^{1/2}$ при применении на космических телескопах с низким уровнем фонового излучения. В эксперименте с эффективной нагрузкой по мощности 20 фВт, задаваемой постоянным током, при температуре 100 мК при электрическом нагреве была получена МЭШ=$2\cdot 10^{-18}$ Вт/Гц$^{1/2}$ [6]. Такая чувствительность удовлетворяет требованиям разрабатываемого европейского космического телескопа B-Pol [7]. Для аэростатных и наземных телескопов может быть реализована чувствительность лучше, чем фотонный шум сигнала при достаточно большой оптической нагрузке [8].

В настоящее время существуют три конкурирующих типа сверхпроводящих болометров для приема излучения. Первый и наиболее развитый – болометр на краю сверхпроводящего перехода тонкой пленки сверхпроводника (БКП, transition edge sensor, TES) [9]. Второй – детектор на основе кинетической индуктивности сверхпроводника (КИСП, kinetic inductance detector, KID) [10] с высокочастотным смещением на резонансной частоте. Третьим перспективным приемником является БХЭ, связанный с антенной через емкости туннельных переходов и изготавливаемый на планарной подложке. Отметим ожидаемые преимущества БХЭ по сравнению с БКП:

– эффективное электронное охлаждение детектора током смещения и считывания в отличие от неизбежного перегрева БКП детектора током смещения, то есть меньшая электронная температура и меньшие шумы БХЭ;

– значительно более высокая мощность насыщения за счет возможности удаления приходящей мощности из абсорбера путем электронного охлаждения;

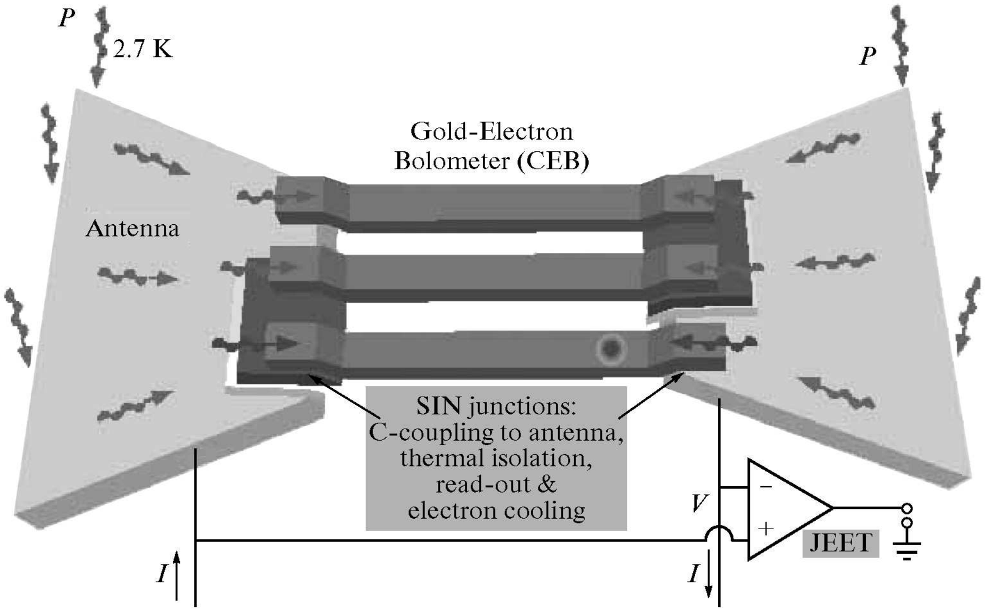

Рис.1. Схематическое изображение цепочки из трех БХЭ, соединенных последовательно по постоянному току и параллельно по входному микроволновому сигналу. Параллельное высокочастотное соединение осуществляется за счет применения дополнительной емкости между сверхпроводящими берегами болометра и антенной

– менее строгие требования к стабильности температуры, поскольку в БХЭ измеряется напряжение при протекании туннельного тока и вклад электрон-фононного взаимодействия существенно снижается;

– возможность согласования с существующими усилителями на полевых транзисторах с оптимальным по шумам сопротивлением порядка МОм, в отличие от БКП, для которых приемлем только сложный низкоомный СКВИД в системе считывания сигнала.

Разница между БКП и БХЭ увеличивается при измерении на фоне большой оптической нагрузки. В этом случае мощность насыщения БКП должна быть выбрана так, чтобы быть не меньше ожидаемого максимального сигнала, что приводит к дополнительному термодинамическому шуму. Для БХЭ возможна большая гибкость в выборе последующей электроники, которая может быть основана на полевых транзисторах с p-n-переходом, или МДП транзисторах, либо можно использовать сквид. В первом случае согласование достигается соединением БХЭ последовательно [10], что и описано в данной работе.

Если иметь в виду изучение космического фонового излучения на частоте 350 ГГц, то требуется, чтобы при характерной оптической нагрузке в 5 пВт [1] шумы болометра были меньше, чем статистический фотонный шум сигнала. Численное моделирование показало, что выполнение этих условий с помощью одиночного болометра и полевого транзистора невозможно ни в режиме с заданным током [8], ни в режиме с заданным напряжением [11]. Для решения этой задачи была предложена новая концепция последовательно-параллельной цепочки болометров [8] (см. рис.1). В такой цепочке приходящая мощность распределяется между N болометрами, а отклик по выходу суммируется. Эффективное распределение мощности достигается, благодаря включению емкостной связи между каждым болометром и антенной. При этом уменьшается нагрев каждого из абсорберов и возрастает отклик на низкой частоте. Вклад шумов напряжения усилителя пропорционально уменьшается.

В то же время, увеличение числа болометров приводит к увеличению суммарного объема абсорбера и соответствующему увеличению электрон-фононного шума. Расчет всех компонент МЭШ этой цепи показал, что при числе болометров более 6 полные шумы становятся меньше фотонного шума приходящего сигнала. Цепочка из 10 болометров была взята для создания экспериментального образца.

Фотография центральной части чип с перекрестно-щелевой антенной, разработанной аналогично [12], приведена на рис.2а. В каждом из портов антенны размещены цепочки из 5 болометров, которые, в свою очередь, соединены последовательно для горизонтальной и для вертикальной поляризации, так что для каждой поляризации работает цепочка из 10 болометров. Темные диагональные щели антенны перекрыты через изолятор пленкой

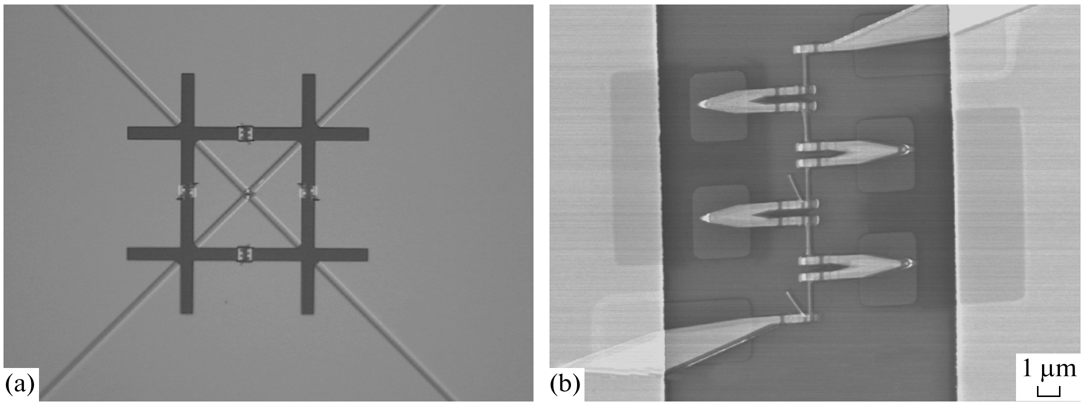

Рис.2. (a) Оптическая фотография перекрестно-щелевой антенны с цепочками болометров в четырех узлах (портах) антенны. (b) Изображение в электронном микроскопе половины цепочки, состоящей из 5 абсорберов и 10 СИН переходов

алюминия, образующей емкостную закоротку щели на частоте сигнала. Абсорберы болометров выполнены из тонкой пленки алюминия с подслоем хрома, что обеспечивает нормальную проводимость и возможность формирования туннельного перехода Cr/Al/AlOx/Al, как описано в [13, 14]. Изображение в электронном микроскопе цепочки из 5 болометров, расположенных в одном из портов антенны, приведено на рис.2b.

Чип с антенной располагали на удлиненной гиперполусферической кремниевой линзе с четвертьволновым антиотражающим покрытием полусферы диаметром 14 мм. Сборка была установлена на держателе образцов, связанным теплопроводом с камерой растворения микрокриостата растворения [15]. Попадающее на линзу излучение извне проходит через оптическое окно (или излучается теплой крышкой) и три узкополосных квазиоптических фильтра [16], расположенных на тепловых экранах с температурами 100, 4.2 и 0.4 К. Ослабление ИК излучения осуществлялось фильтрами типа ZITEX^{tm} и FLUOROGOLD^{tm}, установленными на экранах 100 и 4.2 К. Фильтры ослабляют ИК излучение, попадающее на держатель образца, до уровня порядка 0.1 мкВт. Однако мощности 350 ГГц составляющей излучения при комнатной температуре, ослабленной всего на 5 дБ, достаточно для глубокого насыщения болометра. Поэтому исследование отклика болометра на тепловое излучение проводили, используя экран, установленный на уровне 0.4 К, перекрывающий поток излучения извне.

На вольт-амперных характеристиках (ВАХ) цепочки из 10 БХЭ наблюдается суммарная энергетическая щель 20 СИН переходов. При закрытом экране 0.4 К и охлаждении болометра ниже 0.2 К отношение максимального сопротивления при нулевом смещении ~ 10 МОм к нормальному асимптотическому сопротивлению превышает 10^3. Отметим, что происходит насыщение значения дифференциального сопротивления при температуре держателя ниже 200 мК. Поскольку чип содержал и другие, кроме болометров, элементы, удалось проверить, что при электрическом нагреве непосредственно чипа мощностью 0.2 мкВт температура болометра, оцениваемая по его дифференциальному сопротивлению, изменяется всего на сотые доли градуса. Поскольку при проведении измерений к чипу подводится мощность на уровне пиковатт, то можно утверждать, что температура болометра совпадает с температурой держателя. Поэтому надо искать другие причины насыщения. Возможно, оно обязано паразитному перегреву токами наводок (сетевые наводки, сотовая телефония, телевидение и пр.). Однако изменение условий заземления, экранирования, работа в разных лабораториях, практически не влияют на результаты, что заставляет думать о совокупности причин видимого насыщения в сложной многоэлементной системе последовательно включенных и связанных через емкости туннельных переходов в условиях электронного охлаждения.

Для измерения оптического отклика внутри радиационного экрана криостата при температуре 0.4 К была установлена нагреваемая константановая фольга, перекрывающая входную апертуру линзы. Измеренный коэффициент отражения фольги на частоте 350 ГГц равен 0.7 ± 0.05, то есть, степень черноты $\kappa = 0.3 \pm 0.05$. Отклик на излучение нагревателя при его температуре T – разность ВАХ при $T < 1$ К, когда мощность излучения пренебрежимо мала, и ВАХ, соответствующей текущей температуре фольги, – представлен на рис.3, вверху. На этом же рисунке показан отклик болометра на изменение

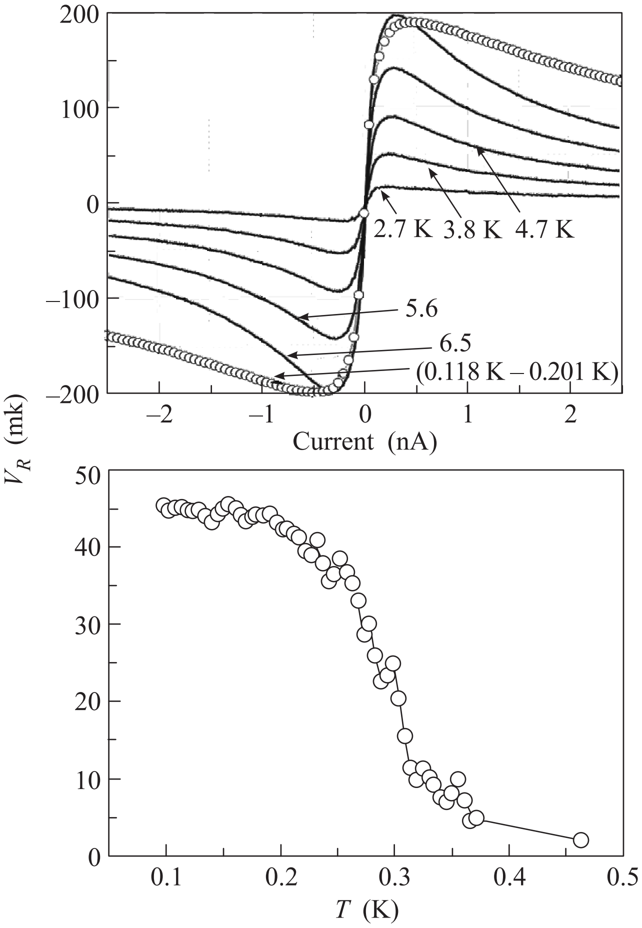

Рис.3. Вверху – отклик по напряжению V_R при температуре держателя болометра 0.1 К при разных температурах излучателя, указанных на рисунке, и при изменении температуры болометра от 0.118 до 0.201 К. Внизу – зависимость V_R от температуры болометра при фиксированной излучаемой мощности

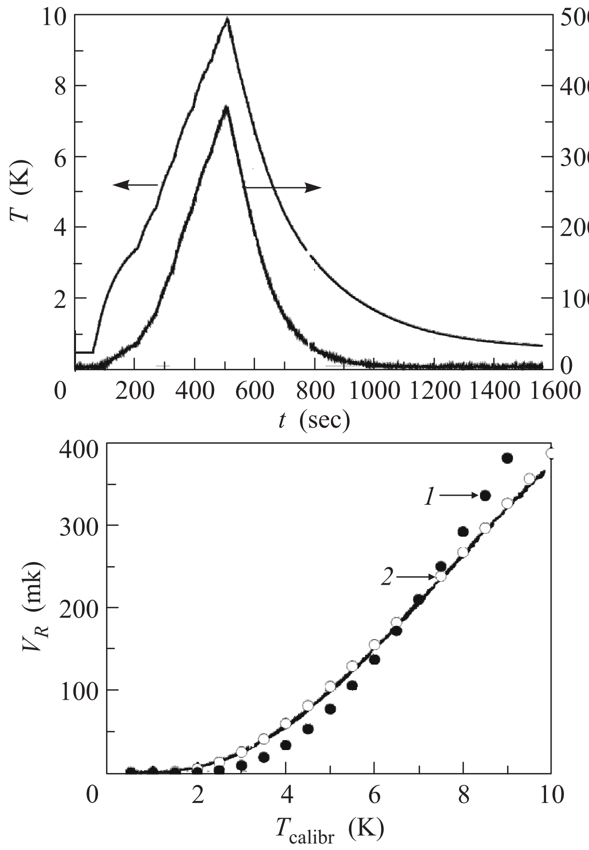

Рис.4. Вверху – изменение во времени отклика болометра V_R при токе 0.25 нА, соответствующем его максимуму, обязанное изменению температуры T излучателя. Внизу – зависимость $V_R(T)$. Темные точки *1* и светлые кружки *2* – зависимости, пропорциональные формуле Планка при частотах 350 и 210 ГГц, соответственно. Температура болометра 0.1 К

его температуры. Видно, что формы кривых, описывающих влияние облучения и нагрева, заметно различаются. Таким образом, механизм формирования отклика на излучение заметно отличается от банального нагрева.

Зависимость отклика от температуры держателя образца показана на рис.3, внизу. Видно, что отклик, аналогично дифференциальному сопротивлению, при охлаждении болометра сначала быстро возрастает, а затем насыщается, примерно при 0.2 К. Отметим, что насыщение делает приемник мало чувствительным к малым изменениям его температуры, что с практической точки полезно.

На верхнем рис.4 показано изменение во времени отклика при токе, соответствующем максимальному сигналу, и температуры излучателя, на нижнем рис.4 – зависимость отклика от температуры излучателя. Согласно этому рисунку, при $T = 3$ К изменение отклика составляет 25 мкВ/К. С учетом как черноты излучателя, так и реального среднеквадратичного шума, равного 0.38 мкВ, получим в полосе измерений 0–40 Гц флуктуационную чувствительность 0.005 К. Если для шумов взять спектральную плотность шумов усилителя ~ 10 нВ/Гц$^{1/2}$, то получим флуктуационную чувствительность $\approx 1.3 \cdot 10^{-4}$ К.

Оценим мощность, излучаемую нагретой фольгой, используя формулу Планка с учетом полосы пропускания двойной щелевой антенны $\delta f = 100$ ГГц, приняв для центральной частоты расчетное значение 350 ГГц и учитывая, что детектор работает в одномодовом режиме. При температуре 3 К получим

$$\Delta P = \kappa \frac{hf}{\exp(hf/kT) - 1} \delta f = 0.3 \cdot 10^{-13}\ \text{Вт}.$$

Значение вольт-ваттной чувствительности составит $dV/dP = 8 \cdot 10^8$ В/Вт, и при шуме, отвечающем шуму усилителя, получим оптическую мощность, эквивалентную шуму, $1.2 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц$^{1/2}$. Отметим, что это довольно грубая оценка, поскольку интенсивность сигнала в пределах полосы антенны сильно изменяется – согласно формуле Планка, на нижней границе она примерно втрое выше, а на верхней – втрое ниже, чем по центру полосы. Еще одно обстоятельство – реальная частотная характеристика антенны может отличаться от расчетной. Об этом свидетельствует сравнение зависимости отклика в функции температуры излучателя с расчетом этой же зависимости по формуле Планка при разных значениях центральной частоты антенны (нижний рис.4). Видно, что приличное согласие расчета с экспериментом достигается не при частоте 350 ГГц, а при заметно меньшей частоте – 210 ГГц. Если это значение отвечает центральной частоте антенны, то оптическая мощность, эквивалентная шуму, оказывается на уровне $\sim 6 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц$^{1/2}$. Для выяснения этого вопроса нужны эксперименты с перестраиваемыми узкополосными источниками излучения. Работа в этом направлении нами начата.

Таким образом, болометр предложенной конструкции при охлаждении ниже 0.2 К обеспечивает чувствительность, близкую к требуемой для решения космологических задач. При этом можно надеяться на дальнейший прогресс, если удастся при сравнении результатов с теоретической моделью выяснить механизм ограничения дифференциального сопротивления и чувствительности при температурах ниже 0.2 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке шведских агентств VR, Rymdstyrelsen, STINT, Swedish Institute, а также грантов Российского фонда фундаментальных исследований # 09-02-12272-ОФИ-м, и Минобрнауки по контракту 02.740.11.5103.

1. BOOMERANG, balloon telescope: Measurements of CMB Polarization, http://oberon.roma1.infn.it/boomerang/b2k/.
2. L. Kuzmin, Proc. of SPIE conference **5498**, 349 (2004).
3. L. Kuzmin, Physica B: Condensed Matter **284-288**, 2129 (2000).
4. L. Kuzmin and D. Golubev, Physica C **372-376**, 378 (2002).
5. M. Nahum, T. M. Eiles, and J. M. Martinis, Appl. Phys. Lett. **65**, 3123 (1994).
6. I. Agulo, L. Kuzmin, and M. Tarasov, *Proc. of the 16th Int. Symp. On Space Terahertz Technol.*, ISSTT2005, Gothenburg, Sweden, 2005, p. 147.
7. Leonid Kuzmin, Ghassan Yassin, Stafford Withington, and Paul Grimes., *Proc. of the 18th ISSTT*, Pasadena, 2007, p.93.
8. Leonid Kuzmin, J. of Physics: Conference Series (JPCS) **97**, 012310 (2008).
9. K. Irwin, Appl. Phys. Lett. **66**, 1998, (1995).
10. N. Grossman, D. G. McDonald, and J. E. Sauvageau, IEEE Trans. Magn. **27**, 2677 (1971).
11. Leonid Kuzmin, J. of Low Temperature Physics **151**, 292 (2008).
12. G.Chattopadhayay, F. Rice, D. Miller et al., IEEE Microwave Guide Wave Lett. **9**, 467 (1999).
13. М. Тарасов, Л. Кузьмин, Н. Каурова, Письма в ЖЭТФ **89**, 742 (2009).
14. М. А. Тарасов, Л. С. Кузьмин, Н. С. Каурова, ПТЭ № 6, 122 (2009).
15. В. С. Эдельман, ПТЭ № 2, 159 (2009).
16. М. А. Тарасов, В. Д. Громов, Г. Д. Богомолов и др., ПТЭ № 1, 85 (2009).