

ПРЕДЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ БОЛОМЕТРА НА ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ БОЛОМЕТРА И МОЩНОСТИ СИГНАЛА

М. Тарасов¹, В. Эдельман², С. Махашабде³, Л. Кузьмин³

¹ Институт Радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

² Институт физических проблем им. П.Л.Капицы РАН

³ Чалмерский технологический университет, Швеция

Статья получена 9 декабря 2013 г.

Аннотация. Разработаны, изготовлены и исследованы интегральные структуры с болометрами на холодных электронах, интегрированные в двойные щелевые антенны. При температуре болометра от 0.06 К до 3 К измерен оптический отклик болометров в диапазоне температур излучателя 2-15 К. Для температуры излучателя в районе 2.7 К, что соответствует температуре космического фонового излучения, отклик приемника составил $0.3 \cdot 10^9$ В/Вт, температурная чувствительность $2 \cdot 10^{-4}$ К/Гц^{1/2}. Эффективность согласования с источником излучения, равная отношению излученной и поглощенной мощности, составила 0.6. Проведены оценки вольтваттной чувствительности в зависимости от мощности фона, сигнала, температуры образца. Для получения эквивалентной шуму мощности на уровне МЭШ= $2 \cdot 10^{-18}$ Вт/Гц^{1/2}, которая требуется для многих космических проектов, температура образца должна быть не выше 0.1 К, температура фонового излучения менее 1.6 К, мощность сигнала менее 1 фВт на частоте 350 ГГц, в полосе 100 ГГц, при объеме абсорбера $5 \cdot 10^{20}$ м³. Такие условия оказываются нереальными для большинства практических случаев. Для измерения сигналов на уровне 10-100 пВт требуется применение матриц из более 10-100 болометров, что позволяет избежать снижения отклика и сохранить высокие значения температурной чувствительности. Работа докладывалась на Первой Всероссийской Микроволновой конференции 29 ноября 2013 года

Ключевые слова: сверхпроводниковые болометры, эквивалентная шуму мощность, вольтваттная чувствительность, температура фонового излучения.

Abstract. Integrated structures comprising cold electron bolometers and twin-slot antennas have been studied in the temperature range 0.06-3 K. Dynamic resistance ratio and optical response was measured for 2-15 K black body radiation temperature. For radiation temperature of 2.7 K, which corresponds to cosmic microwave radiation temperature, the optical responsivity was around $0.3 \cdot 10^9$ V/W and temperature sensitivity of $2 \cdot 10^{-4}$ K/Hz^{1/2}. Ratio of irradiated and measured power corresponds to matching efficiency of 0.6. For obtaining of Noise Equivalent Power NEP= $2 \cdot 10^{-18}$ W/Hz^{1/2}, that is required for many space-borne experiments, the temperature of sample should be below 0.1 K, background radiation temperature below 1.6 K, signal power below 1 fW at signal frequency 350 GHz, bandwidth 100 GHz and absorber volume $5 \cdot 10^{-20}$ m³. Such requirements are not realistic for practical cases and to avoid saturation of receiver the arrays of bolometers should be used instead of a single bolometer. For measurements of signal in the range of 10-100 pW the array should consist of over 10-100 bolometers.

Key words: superconducting bolometers, noise equivalent power, responsivity, background radiation temperature.

Болометр на холодных электронах (БХЭ) состоит из наноабсорбера и двух туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН), подсоединенных к планарной антенне. На Рис. 1 схематически изображен такой болометр, в середине расположен абсорбер из нормального металла, который через туннельные переходы подсоединяется к сверхпроводящим электродам. Сигнал подается в абсорбер через емкости туннельных переходов и поглощается в нормальном металле. Одновременно происходит электронное охлаждение за счет удаления горячих электронов из абсорбера под действием приложенного к СИН переходам постоянного смещения. Электронное охлаждение выполняет функции сильной электротермической обратной связи, повышая отклик, уменьшая постоянную времени и эквивалентную шуму

мощность [1]. В отличие от наших ранних работ [2] с перекрестно-щелевыми антеннами, в данной работе использована двойная щелевая антенна [3,4], позволяющая улучшить диаграмму направленности и поляризационную селективность. Такие однопиксельные антенны существенно проще антенных решеток [5], применяемых с болометрами на краю сверхпроводящего перехода.

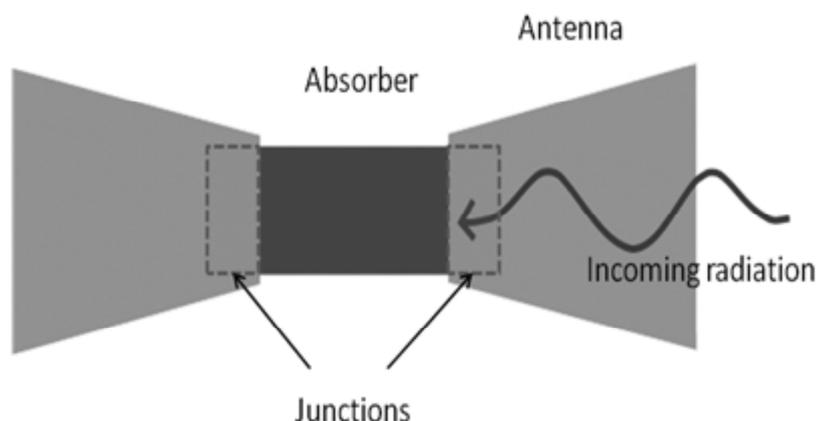


Рисунок 1. Схематическое изображение БХЭ с абсорбером из нормального металла и двумя СИН туннельными переходами

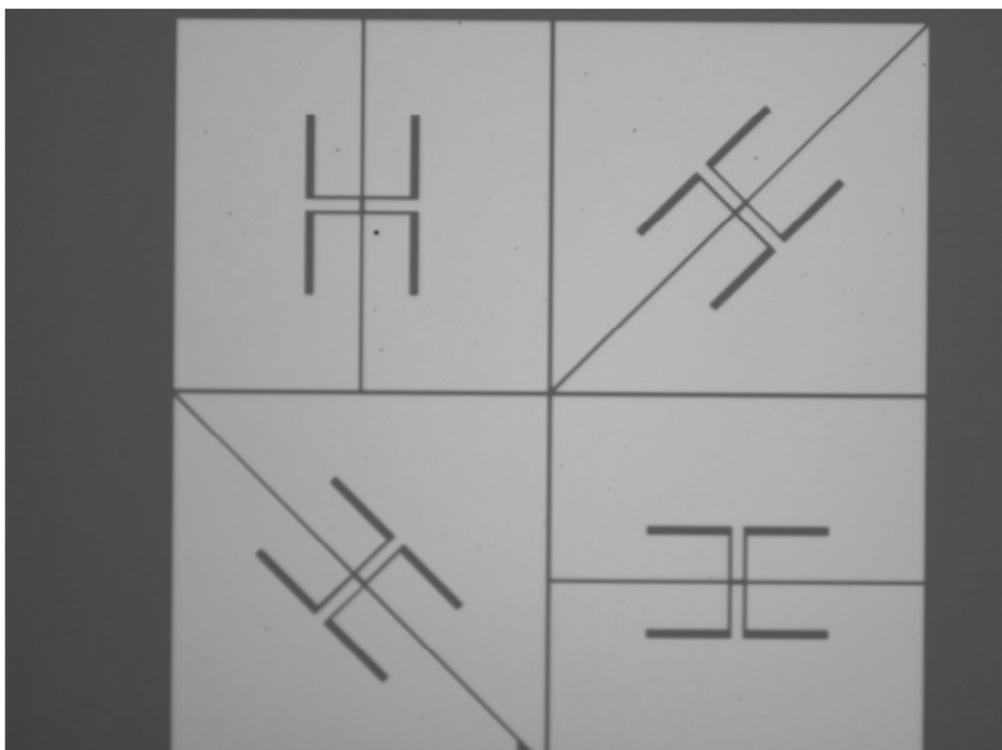


Рисунок 2. Фотография образца с четырьмя двойными щелевыми антеннами. Неизлучающие щели в середине каждой антенны имеют дополнительное емкостное шунтирование для уменьшения воздействия низкочастотного излучения вне полосы сигнала.

Образцы с четырьмя антеннами (Рис. 2) предназначены для измерения амплитуды и поляризации приходящего излучения. Оптимальный размер пикселя, согласно [6] составляет $0.5F\lambda=0.5*3.5*0.856=1.5$ мм, был разработан для проекта BOOMERANG с фокальным числом оптической системы $F=3.5$ на длину волны 0.856 мм. Образцы помещали в микрокриостат растворения [7], позволяющий проводить измерения в диапазоне температур 0.06-3 К. По измеренным ВАХ из отношения сопротивлений вычислялась электронная температура болометра по простому аналитическому выражению:

$$\frac{R_d}{R_n} = \sqrt{\frac{2kT_e}{\pi eV_\Delta}} \frac{\exp\left(\frac{eV_\Delta}{kT_e}\right)}{\cosh\left(\frac{eV}{2kT_e}\right)} \quad (1)$$

Лучшее значение отношения сопротивлений (Рис. 3) без сигнала составило 12000, что соответствует электронной температуре идеального СИН перехода 215 мК и указывает на остаточный перегрев болометров.

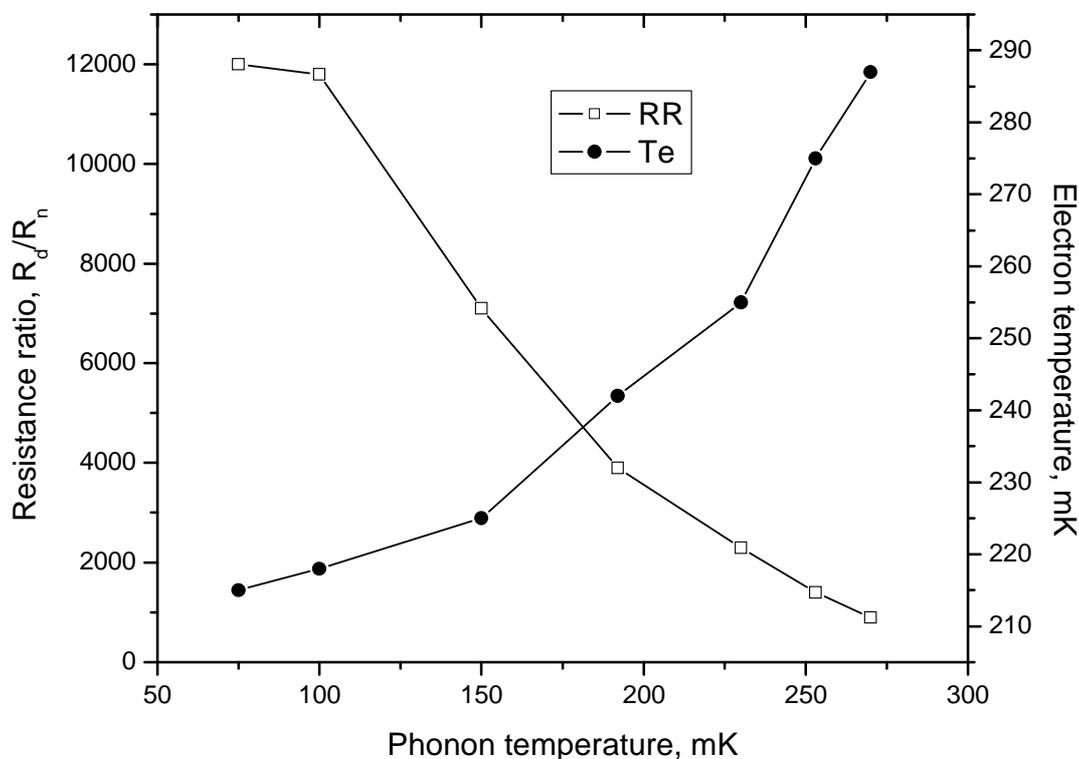


Рисунок 3. Зависимости отношения сопротивлений (RR) и электронной температуры (Te) от фоновой температуры при темновых измерениях.

Образцы с четырьмя антеннами на одном чипе помещали на плоской поверхности удлиненной сапфировой гиперполусферической линзы и облучали источником черного тела через полоснопропускающий фильтр с центральной частотой 350 ГГц и полосой 50 ГГц. Мощность облучения рассчитывалась по формуле Планка для одномодового режима:

$$P_{incident} = \frac{hf_0 * df}{exp\left(\frac{hf_0}{kT_R}\right) - 1} \quad (2)$$

где h постоянная Планка, f_0 центральная частота 350 ГГц, df полоса пропускания 50 ГГц, k постоянная Больцмана, T_R температура излучателя.

Зависимости мощности облучения, поглощенной мощности и отклика представлены на рис. 4. Поглощенная мощность определялась из электронной температуры болометра, для чего измеряли отношения сопротивлений и по формуле (1) вычисляли электронную температуру.

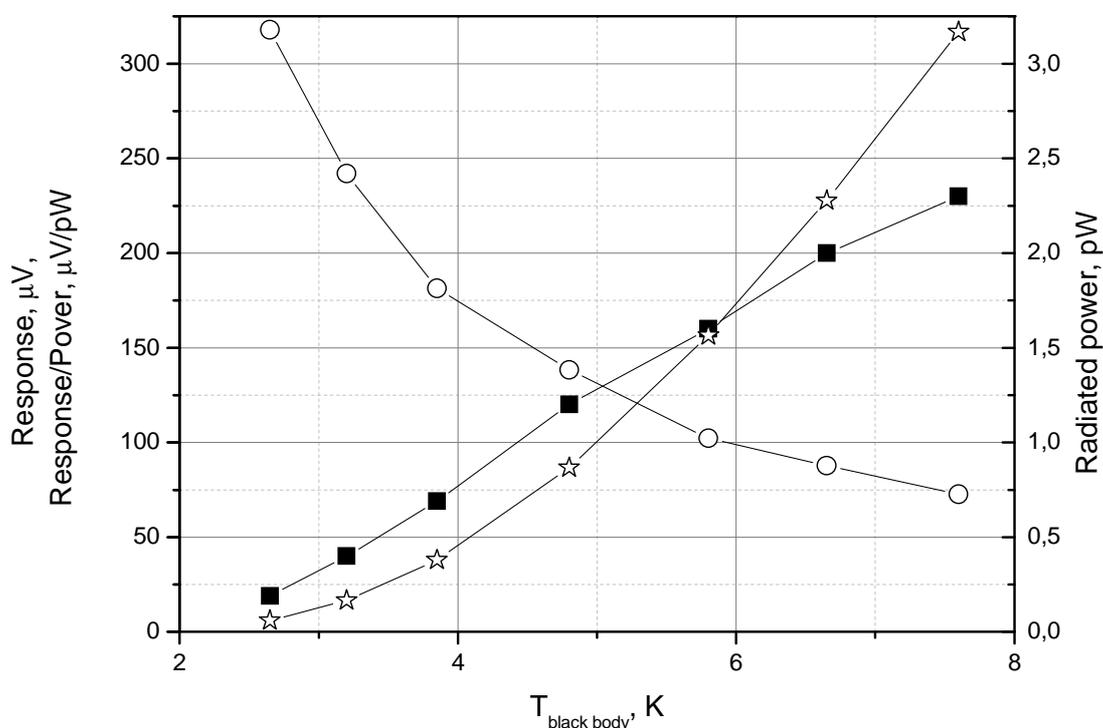


Рисунок 4. Мощность облучения в пиковаттах (звездочки), отклик по напряжению в микровольтах (квадратики) и вольтваттная чувствительность мкВ/пВт (кружочки) в зависимости от температуры излучателя.

Считая электрон-фононное взаимодействие основным механизмом охлаждения, получаем поглощенную мощность по формуле (3)

$$P_{ep} = \Sigma \nu (T_e^5 - T_p^5) \quad (3)$$

где $\Sigma = 2 \cdot 10^9 \text{ W/m}^{-3} \text{ K}^{-5}$ параметр материала, $\nu = 5 \cdot 10^{-20} \text{ м}^3$ объем абсорбера. Отношение мощности облучения и поглощенной мощности составило 0.6 и определяет эффективность согласования. Теоретические и экспериментальные зависимости отклика от температуры излучателя представлены на рис. 5. Эта зависимость достаточно резкая и указывает на необходимость снижения как уровня сигнала, так и температуры образца. Согласно [8] вольтваттная чувствительность (отклик) пропорциональна четвертой степени электронной температуры

$$S_v = dV/dP = k / [e \Sigma \nu T_e^4], \quad (4)$$

откуда получим темновую вольтваттную чувствительность для 100 мК равной $S_d(100 \text{ мК}) = 10^{10} \text{ В/Вт}$ и для 300 мК равной $S_d(300 \text{ мК}) = 1.1 \cdot 10^8 \text{ В/Вт}$.

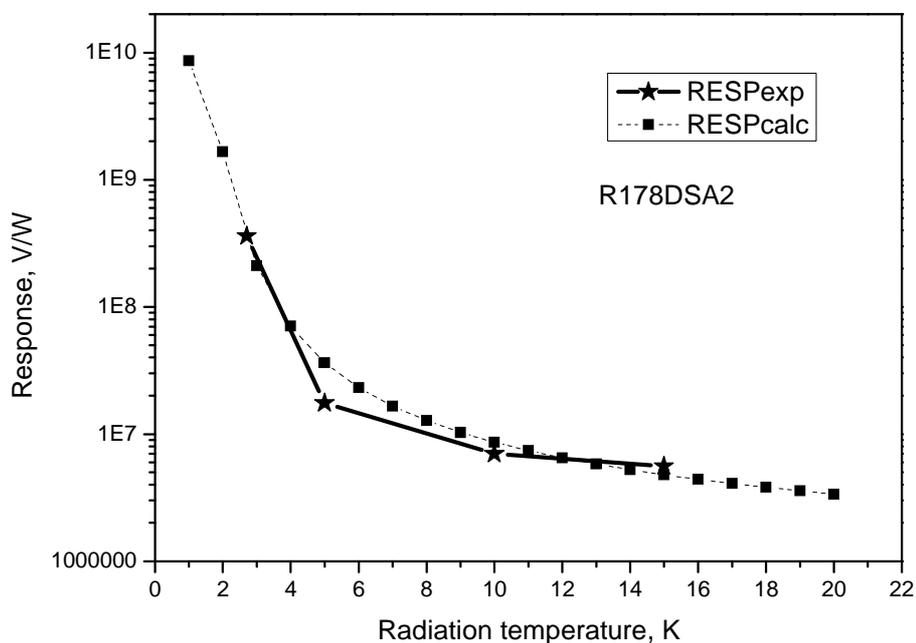


Рисунок 5. Теоретическая $RESP_{calc}$ и экспериментальная $RESP_{exp}$ зависимости вольтваттной чувствительности от температуры.

Аналогично можно рассчитать зависимость отклика от рассеиваемой мощности:

$$S_v = k / [e(\Sigma\nu)^{0.2} P^{0.8}] \quad (5)$$

что соответствует $S_v = 3 \cdot 10^8$ В/Вт при 100 фВт и $3.5 \cdot 10^7$ В/Вт при 1 пВт. Это означает, что в лучшем случае мы можем ожидать $MЭШ = 10^{-18}$ Вт/Гц^{1/2} при работе с усилителем с шумами 10 нВ/Гц^{1/2}.

Для сверхпроводниковых наноболометров на краю перехода были получены $MЭШ 3 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц^{1/2} [9], однако это достигается при существенно более низких уровнях фонового излучения менее 10 фВт, что препятствует применению таких болометров в реальных радиоастрономических проектах.

Еще один параметр для оценки предельных значений приемника – это уровень фотонных шумов, создаваемых самим входным сигналом

$$NEP_{phot} = (2 \cdot P \cdot hf)^{1/2}. \quad (6)$$

Для представленных экспериментальных результатов он не достигается, поскольку вклад от шумов стандартного усилителя оказывается существенно больше. Однако если снизить шумы системы считываения ниже 1 нВ/Гц^{1/2}, то появляется возможность работать в режиме ограничения фотонными шумами. Оценки предельно достижимых параметров БХЭ при различных уровнях принимаемой мощности и температурах болометра приведены в Таблице 1. Уровни 5 пВт и 38 пВт соответствуют оценкам фонового излучения для проектов аэростатных радиотелескопов BOOMERANG и OLIMPO.

Таблица 1. Оценки чувствительности и отклика БХЭ

Температура	100 мК	300 мК	100 мК	200 мК	300 мК	300 мК
Мощность	0.01	0.01	0.1 пВт	1 пВт	5 пВт	38 пВт
Отклик, В/Вт	10^{10}	10^8	$3 \cdot 10^8$	$3.5 \cdot 10^7$	10^7	$2 \cdot 10^6$
$MЭШ_{бол}$, Вт/Гц ^{1/2} $V_{намп} = 1$ нВ/Гц ^{1/2}	10^{-19}	10^{-17}	$3 \cdot 10^{-18}$	$2.9 \cdot 10^{-17}$	10^{-17}	10^{-16}
$MЭШ_{бол}$, Вт/Гц ^{1/2} $V_{намп} = 10$ нВ/Гц ^{1/2}	10^{-18}	10^{-16}	$3 \cdot 10^{-17}$	$2.9 \cdot 10^{-16}$	10^{-16}	10^{-15}
$MЭШ_{фотон}$, Вт/Гц ^{1/2}	$2 \cdot 10^{-19}$	$2 \cdot 10^{-19}$	$6.5 \cdot 10^{-18}$	$2 \cdot 10^{-17}$	$4.6 \cdot 10^{-17}$	$1.3 \cdot 10^{-16}$

Что касается измерения анизотропии космического фонового излучения на уровне 2.7 К, то важным критерием является температурная чувствительность (Noise Equivalent Temperature Difference), которую получаем исходя из экспериментальных значений зависимости отклика от температуры черного тела $dV/dT_{\text{rad}}=50$ мкВ/К (Рис. 4) и шумов усилителя $v_n=10$ нВ/Гц^{1/2}, $\delta T_n=v_n/(dV/dT_{\text{rad}})=2*10^{-4}$ К/Гц^{1/2}.

Отклик в реальных условиях определяется суммарным уровнем тепловой нагрузки P_{bg} за счет сигнала, фона, различных наводок. С увеличением мощности нагрузки растет температура и падает отклик. Чтобы увеличить отклик, согласно (5), нужно уменьшать объем, а это приводит к росту температуры (3) и дополнительному падению отклика, т.е. образуется замкнутый круг. Увеличение динамического диапазона можно достигнуть применением цепочки болометров, в этом случае рассеиваемая мощность в каждом болометре делится на число болометров, вольтваттная чувствительность каждого отдельного болометра сохраняется достаточно высокой, а отклик суммируется.

В качестве иллюстрации решения этого вопроса при рабочей температуре 280 мК поставим условие, что электронная температура под нагрузкой не должна превышать 300 мК при том же объеме абсорбера, это соответствует поглощенной мощности на уровне 0.07 пВт. Для приема сигнала мощностью 1 пВ эта мощность должна быть распределена между 14 болометрами, а если мощность возрастает до 10 пВ, то болометров должно быть уже не менее 143. Увеличение объема каждого из болометров большой выгоды не дает, поскольку отклик обратно пропорционален корню пятой степени из объема.

Для измерения сигналов при тепловой нагрузке выше 0.1 пВт в наших работах применяются последовательные цепочки болометров. В этом случае в одномодовой антенне приходящая мощность распределяется между отдельными болометрами и каждый из них сохраняет высокие значения чувствительности, как в случае [2] с цепочкой из 10 болометров в каждой поляризации. В данной работе в антенну включены три болометра, так что

динамический диапазон оказывается больше, чем для одиночного болометра, но меньше, чем для 10 болометров. Размещение более 10 болометров в одномодовой планарной антенне ограничено геометрическими размерами, поэтому в качестве альтернативы можно рассматривать планарную решетку антенн в фокальной плоскости, но при этом возникают проблемы рассогласования по мощности входного сигнала и рассогласования по выходному сигналу. Решением может быть применение параллельного соединения болометров по постоянному смещению и выходному сигналу. В этом случае появляется возможность работать в режиме заданного напряжения смещения и регистрировать отклик по току, но это потребует применение СКВИДов в качестве системы считывания. Пока такие схемы реализованы не были.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МОН РФ по гранту 11G34.31.0029, РФФИ 11-02-12145-ОФИ-М-2011, Шведского Института, Шведского космического агентства.

Литература

1. L.Kuzmin, I.Devyatov, D.Golubev, Cold-electron bolometer with electronic microrefrigeration and the general noise analysis, Proc. of SPIE, v. 3465, pp. 193-199.
2. M. Tarasov, L. Kuzmin, V. Edelman, S. Mahashabde, P. de Bernardis, Optical Response of a Cold-Electron Bolometer Array Integrated with a 345 GHz Cross-Slot Antenna, IEEE Trans.Appl.Supercond. vol.21, No.6, December 2011, pp. 3635-3639.
3. J.Zmuidzinas, H.G.LeDuc, Quasi-optical slot antenna SIS mixers, IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, v. 40, No 9, 1797-1804 (1992).

4. T.M.Weller, L.P.B.Katehi, G.M.Rebeiz, Single and double folded-slot antennas on semi-infinite substrates, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, v. 43, No 12, 1423-1428 (1995).
5. P.Day, H.G.Leduc, C.D.Dowell, R.A.Lee, A.Turner, J.Zmuidzinis, Distributed antenna-coupled TES for FIR detector arrays, *J. Low Temp. Phys.*, v. 151, pp. 477-482 (2008).
6. M.J.Griffin, J.J.Bock, W.K.Gear, Relative performance of filled and feedhorn-coupled focal-plane architectures, *Appl. Optics*, vol. 41, No 31, 6543-6554 (2002).
7. V.S.Edelman, G.V.Yakopov, A dilution microcryostat cooled by a refrigerator with a pulse tube, *Instr. and Exp. Techn.*, Vol. 56, No. 5, pp. 613-615 (2013).
8. D.Golubev, L.Kuzmin, Nonequilibrium theory of a hot-electron bolometer with normal-metal-insulator-superconductor tunnel junction, *J.Appl. Phys.*, vol. 89, No 11, 6464-6472 (2001)
9. B.S.Karasik, A.V.Sergeev, D.E.Prober, Nanobolometers for THz photon detection, *IEEE Trans. on THz Sci. and Technol.*, (2011).