

МАТРИЦА КОЛЬЦЕВЫХ АНТЕНН С КРИОГЕННЫМИ БОЛОМЕТРАМИ ДИАПАЗОНА 345 ГГц В ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ ПОЛОСТИ

М.А. Тарасов^{1,2,3}, С. Махашабде², А.А. Гунбина^{4,6}, М.Ю. Фоминский¹, Р.А. Юсупов^{1,5},
А.Б. Ермаков¹, А.М. Чекушкин^{1,5}, А.С. Соболев^{1,5}, В.С. Эдельман³, М.А. Мансфельд⁶,
В.Ф. Вдовин^{4,6,7}

¹ Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, Москва, ул. Моховая улица, 11-7

² Чалмерский технологический университет, 41296, Гётеборг, Швеция

³ Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН
117334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2

⁴ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева
603950, ул. Минина, д.24, Нижний Новгород, Россия

⁵ Московский физико-технический институт (государственный университет)
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9

⁶ Институт прикладной физики РАН, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

⁷ Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.

Аннотация. Разработаны, изготовлены и измерены последовательные и параллельные матрицы кольцевых антенн с болометрами структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС). Образцы согласованы с внешним излучением диапазона 250-380 ГГц входным коническим рупором, круглым волноводом диаметром 0.9 мм и интегрирующей полостью в виде конического рупора с контррефлектором. Проведен численный расчет и измерены спектральные характеристики таких устройств. Применение антиотражающего покрытия на кремниевой подложке позволило улучшить чувствительность и однородность спектрального отклика. Измерения проведены в криостате растворения при температурах 80-350 мК. Для последовательной матрицы из 25 антенн с болометрами чувствительность по напряжению на излучение черного тела достигает $3 \cdot 10^9$ В/Вт; линейный отклик для входной мощности составляет более 5 пВт. Токовая чувствительность для матрицы из 25 параллельно соединенных антенн с болометрами составляет $2 \cdot 10^4$ А/Вт. Эквивалентная шуму мощность в обоих случаях составляла $(3 \dots 5) \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2}.

Ключевые слова: СИН переход, криогенный болометр, интегрирующая сфера, кольцевая антенна, матрица антенн, распределенный абсорбер, ММ и СубММ волны, криогенные приемники для радиоастрономии.

Abstract. Series and parallel arrays of ring antennas with bolometers of superconductor-insulator-normal metal-insulator-superconductor (SINIS) structures are designed, manufactured and experimentally studied. The samples are matched to the external radiation in the range of 250-380 GHz by an input conical horn, a circular waveguide with a diameter of 0.9 mm and an integrating cavity in the form of a conical horn with a counter-reflector (backshort). Spectral characteristics of such devices are numerically modelled and measured using Backward Wave Oscillator radiation source. The use of an antireflection coating on a silicon substrate improves the sensitivity and uniformity of the spectral response. The measurements were carried out in a dilution cryostat at temperatures in the range of 80-350 mK. For a series array of 25 antennas with bolometers, the voltage responsivity to blackbody radiation approaches $3 \cdot 10^9$ V/W; the linear response observed for the input power up to 5 pW. Current responsivity for a matrix of 25 parallel antennas with bolometers is $2 \cdot 10^4$ A / W. Noise equivalent power in both cases was in the range of $(3 \dots 5) \cdot 10^{-17}$ W/Hz^{1/2}.

Keywords: NIS junction, cryogenic bolometer, integrating sphere, annular antenna, antenna array, distributed absorber, MM and SubMM waves, cryogenic receivers for radio astronomy.

1. Введение

Радиоастрономия в последние годы активно развивается в направлении освоения субтерагерцового диапазона частот, охватывающего коротковолновую часть миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Ограничения пропускания атмосферы для этих волн приводят к проблемам выбора и строительства телескопов, выведения их за наиболее активно поглощающие слои атмосферы. Поэтому радиотелескопы этих волн либо располагаются в высокогорье, либо в космосе; имеются варианты промежуточного размещения на борту самолетных или баллонных

обсерваторий. Среди них следует упомянуть OLIMPO, LSPE, Миллиметрон и т.д. Острый дефицит наземных инструментов этого диапазона позволяет нам предложить добавить к этому списку Большой Телескоп Альт-азимутальный (БТА) – 6 метровый оптический рефлектор САО РАН, на котором возможно проведение измерений в субТГц диапазоне, более привычно именуемого оптиками как дальний ИК диапазон. Для перечисленных наземных, баллонных и космических телескопов требуются высокочувствительные детекторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн.

Одиночный болометр на основе структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС) насыщается на уровне мощности выше 1 пВт. Для увеличения динамического диапазона использованы матрицы из 50 болометров, между которыми распределяется мощность излучения. Разработана модель частотно-селективной поверхности [1-3] в виде матрицы кольцевых антенн с интегрированными СИНИС болометрами. Для согласования приемной матрицы с внешним излучением используется конструкция встречных рупоров, т.н. back-to-back horn (рис.1.). Такой рупор можно условно разделить на три части: конический приемный рупор, согласованный с геометрией антенны телескопа, фрагмент регулярного круглого волновода – фильтра-формирователя волноводной моды, которым возбуждается передающий рупор (чертеж и фотография рупора представлены на рис.2). Выходной рупор облучает подложку с матрицей антенн, позади которой находится контррефлектор). Эта конструкция аналогична используемой в приемнике космического телескопа Планк [4]. Многократные отражения от стенок рупора и контррефлектора приводят к улучшению поглощения излучения, которое попало во внутреннюю полость. Такая конфигурация эквивалентна интегрирующей сфере (рис.3). Интегрирующая сфера – известный способ детектирования волн ИК диапазона, и такие устройства коммерчески доступны от нескольких компаний, например [5].

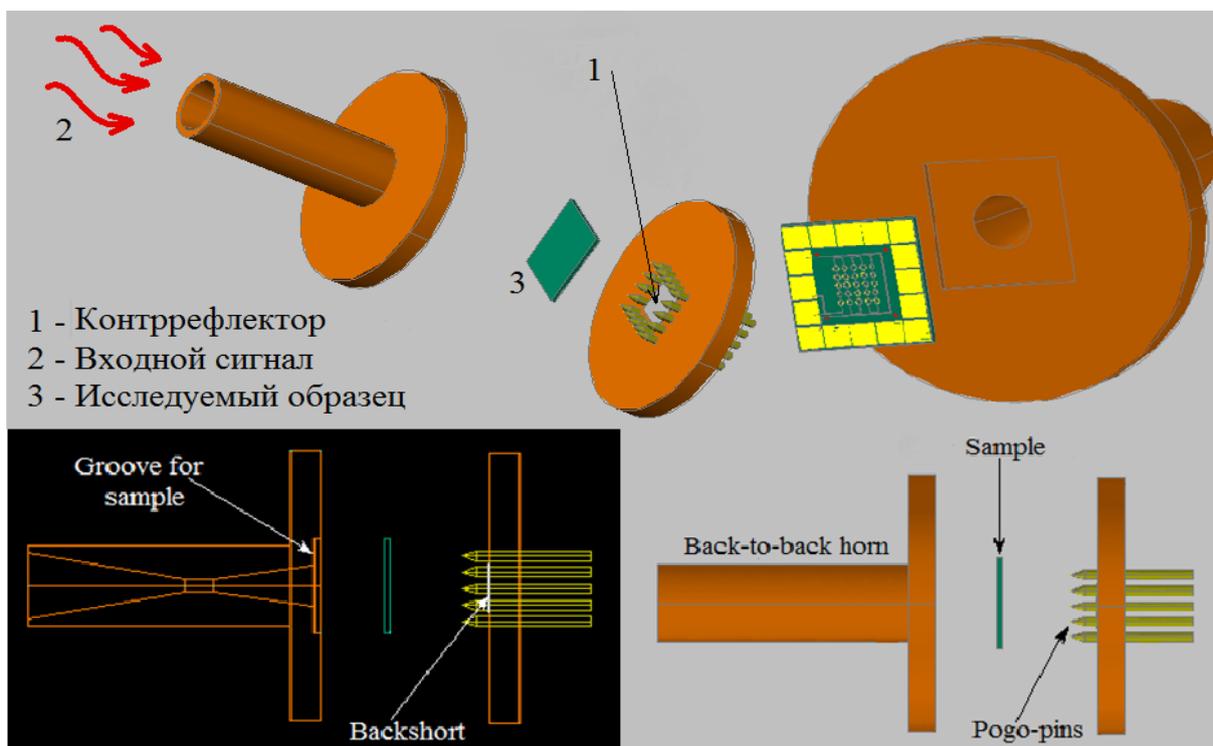


Рис. 1. 3-D и 2-D модель держателя образцов

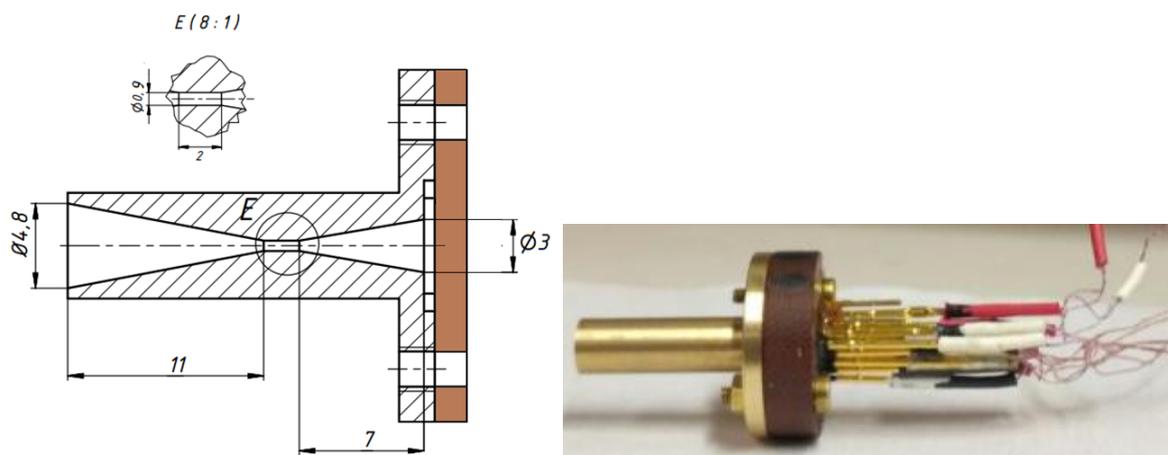


Рис.2. Чертеж и изготовленное согласующее устройство: приемный конический рупор длиной 11 мм, круглый волновод длиной 2 мм и диаметром 0,9 мм и выходной конический рупор длиной 7 мм

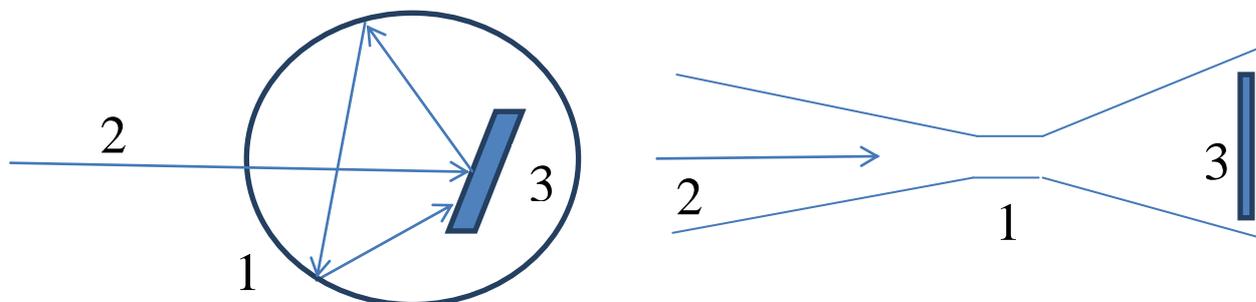


Рис. 3. Интегрирующая сфера (1) освещается пучком (2) который поглощается детектором (3) напрямую; отраженная часть через несколько отражений от стенок сферы также полностью поглощается детектором.

2. Экспериментальные образцы и результаты измерений

Были проведены измерения изготовленной матрицы планарных кольцевых антенн с центральной частотой 345 ГГц. Единичный элемент матрицы в виде кольцевой антенны представлен на рисунке 4 и имеет следующие размеры: внутренний диаметр – 256 мкм, внешний – 300 мкм. Для получения высокого выходного сопротивления, что является оптимальным для измерений отклика по напряжению, элементы матрицы соединены последовательно. В этом случае для считывания используются полевые транзисторы, обеспечивающие необходимые шумовые характеристики.

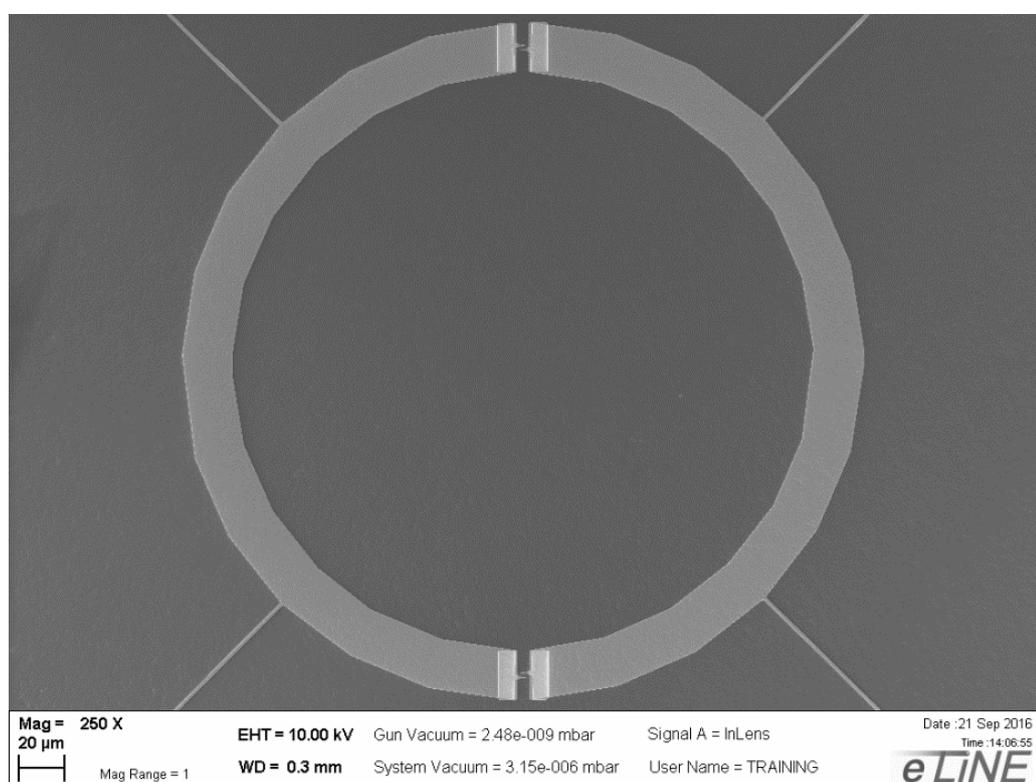


Рис 4. Изображение единичного элемента матрицы в сканирующем электронном микроскопе.

Измеренное при температуре 280 мК дифференциальное сопротивление последовательно соединенной матрицы приведено на рисунке 6 слева, в этом случае асимптотическое сопротивление составляет 50 кОм и максимальное дифференциальное сопротивление 4 МОм. Для задания смещения по напряжению и считывания тока были изготовлены образцы с параллельным соединением 25 кольцевых антенн (схематично изображено на рисунке 5), в

этом случае нормальное сопротивление образца составляет 14 Ом, что на 3 порядка меньше по сравнению с последовательным подключением. В случае задания смещения по току сопротивление в рабочей точке с наибольшим откликом составляет около 500 кОм, а при задании смещения по напряжению в точке максимального отклика по току дифференциальное сопротивление составляет около 10 Ом (рис. 6 справа). Поэтому в первом случае для считывания подходят полевые транзисторы, которые обеспечивают наилучшие шумовые характеристики, а во втором случае оптимальным будет использование сверхпроводящего квантового интерферометра (СКВИДа) или биполярного транзистора с криогенным согласующим трансформатором.

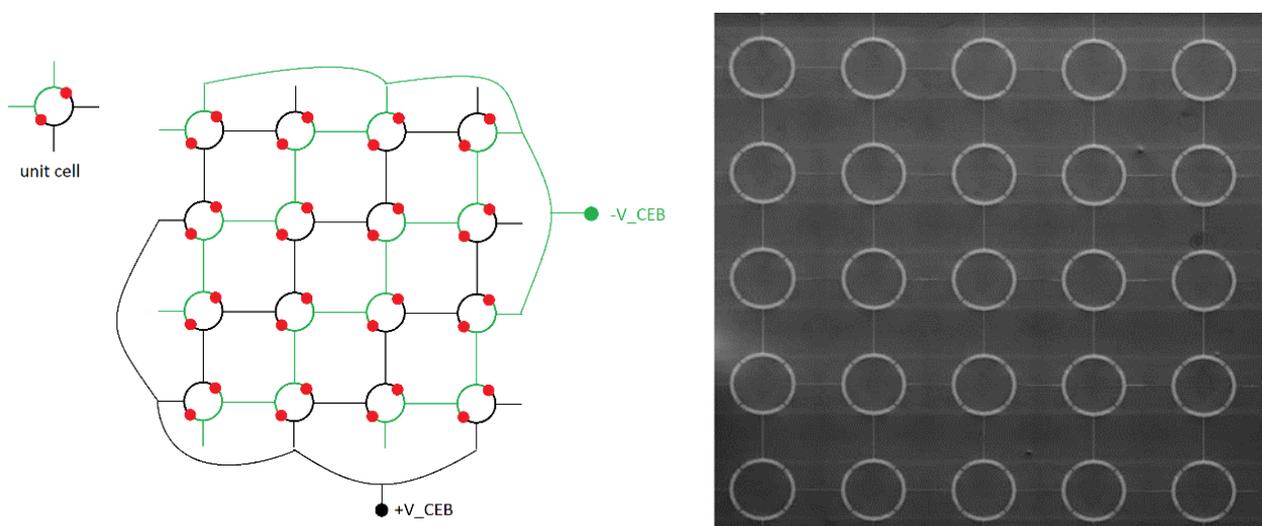


Рис 5. Схематичное изображение матрицы с параллельным соединением всех колец и изображение всей матрицы в СЭМ.

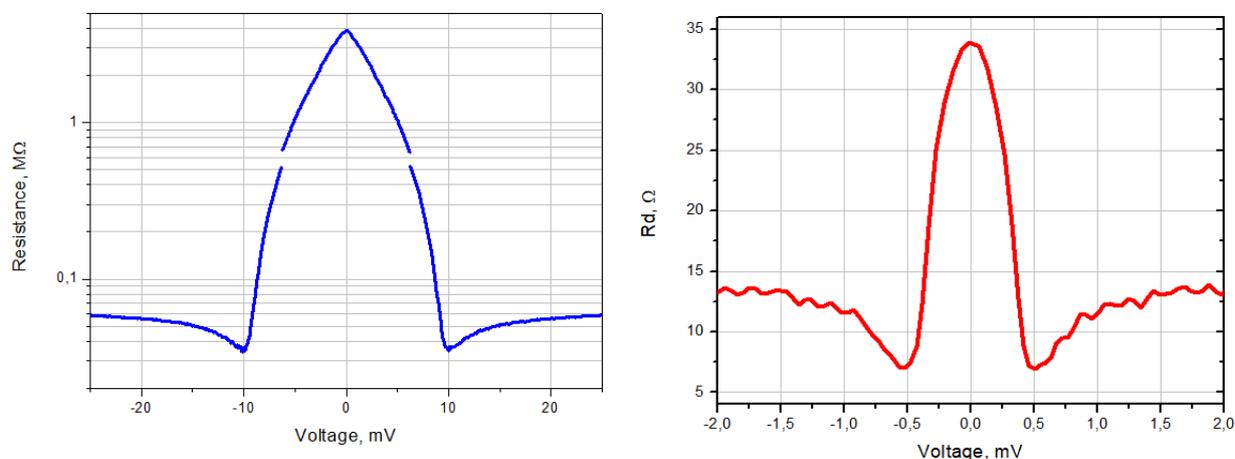


Рис 6. Дифференциальное сопротивление структуры из 25 колец соединенных последовательно (слева) и параллельно (справа).

Для измерения квазистатического оптического отклика в качестве источника излучения использовалось черное тело, установленное внутри криостата (рис. 7). Чувствительность при измерении оптического отклика параллельной матрицы на излучение черного тела температурой 10 К через полосовой фильтр достигла значений $dV/dP = 8 \cdot 10^8$ В/Вт. Отклик по току и напряжению приведен на рисунке 8.

Измерен оптический отклик в случае, когда источник находился снаружи криостата (схема эксперимента приведена на рисунке 9). Модулированный сигнал излучения черного тела 77/300 К подавался на образец через фторопластовое окно криостата диаметром 50 мм. Полученный результат представлен на рисунке 10. В случае измерений отклика на излучение холодной и теплой нагрузки 77/300 К перед окном криостата необходимо учитывать ослабление аттенюаторов в оптическом тракте, выбранное из требования не перегружать болометры фоновой нагрузкой. Система фильтров располагалась на трех температурных ступенях: 55 К первая ступень охладителя на импульсных трубках, 3 К вторая ступень, 0.3 К ступень охлаждения Гелия-3. На первой ступени располагалась ограничивающая медная апертура с диаметром отверстия 4 мм, ФНЧ ИК диапазона ZITEX G108 и нейтральный ослабитель в виде тонкой пленки нихрома на каптоновой основе с ослаблением 10 дБ. На второй ступени располагалась комбинация следующих фильтров: ФНЧ ИК диапазона FLUOROGOLD, медная апертура с диаметром отверстия 4 мм, нейтральный ослабитель 10 дБ, ФНЧ ИК диапазона ZITEX G108, еще один нейтральный ослабитель 10 дБ. На ступени 300 мК располагался собственно встречный рупор с ФНЧ 600 ГГц на входе. Суммарное ослабление сигнала на пленочных аттенюаторах составляет 30 дБ, ослабление пучка на апертурах еще 20 дБ, ослабление на всех ИК ФНЧ 10 дБ. В итоге суммарное ослабление можем оценить в районе 60 дБ. Если считать полной полосу облучения от 200 до 400 ГГц, то мощность излучения от черного тела с температурой 300 К по формуле Планка в одной моде составляет 0.6 нВт. Это значит, что на входе

рупора в пяти модах будет порядка 3 фВт, и при отклике 10 мкВ вольтваттная чувствительность достигать $3 \cdot 10^9$ В/Вт.

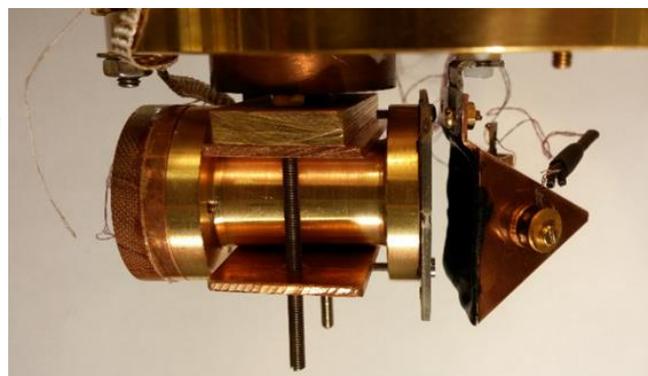
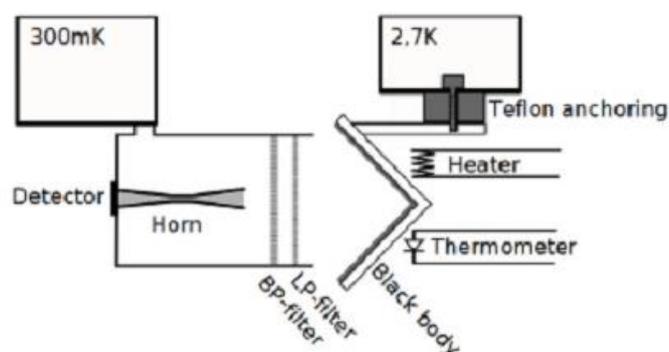


Рис. 7. Слева: схематическое изображение установки для измерения квазистатического оптического отклика с источником излучения черного тела внутри криостата. Справа фото держателя образца и черного тела, смонтированных на холодной ступени криостата.

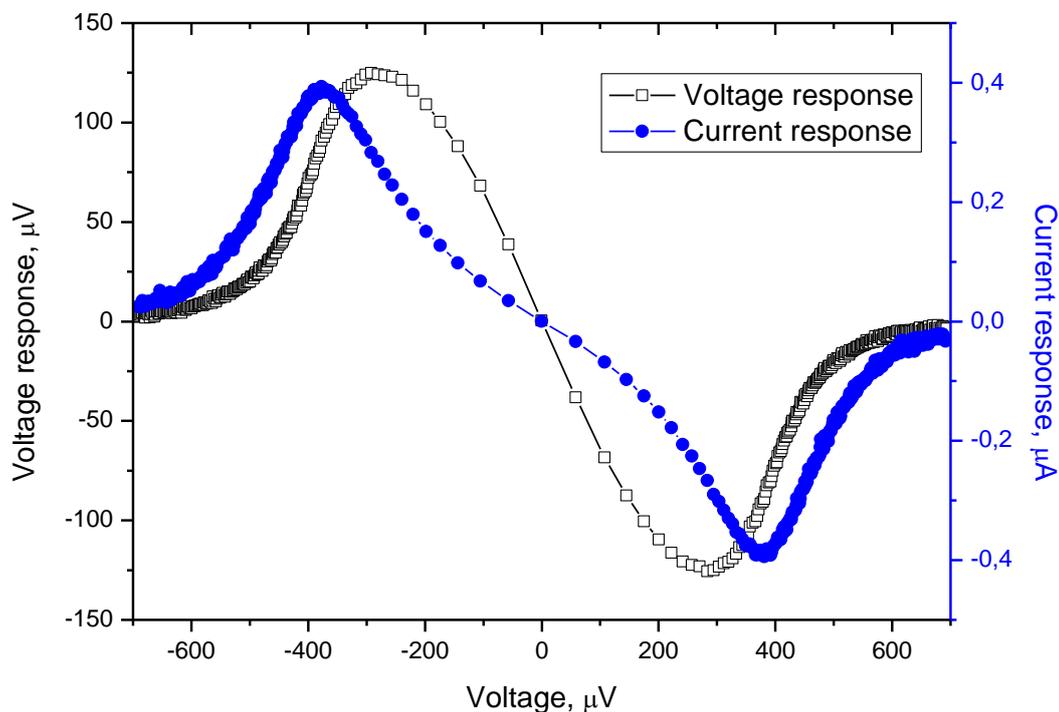


Рис. 8. Оптический отклик матрицы параллельно соединенных антенн на излучение черного тела температурой 10 К, расположенного внутри криостата

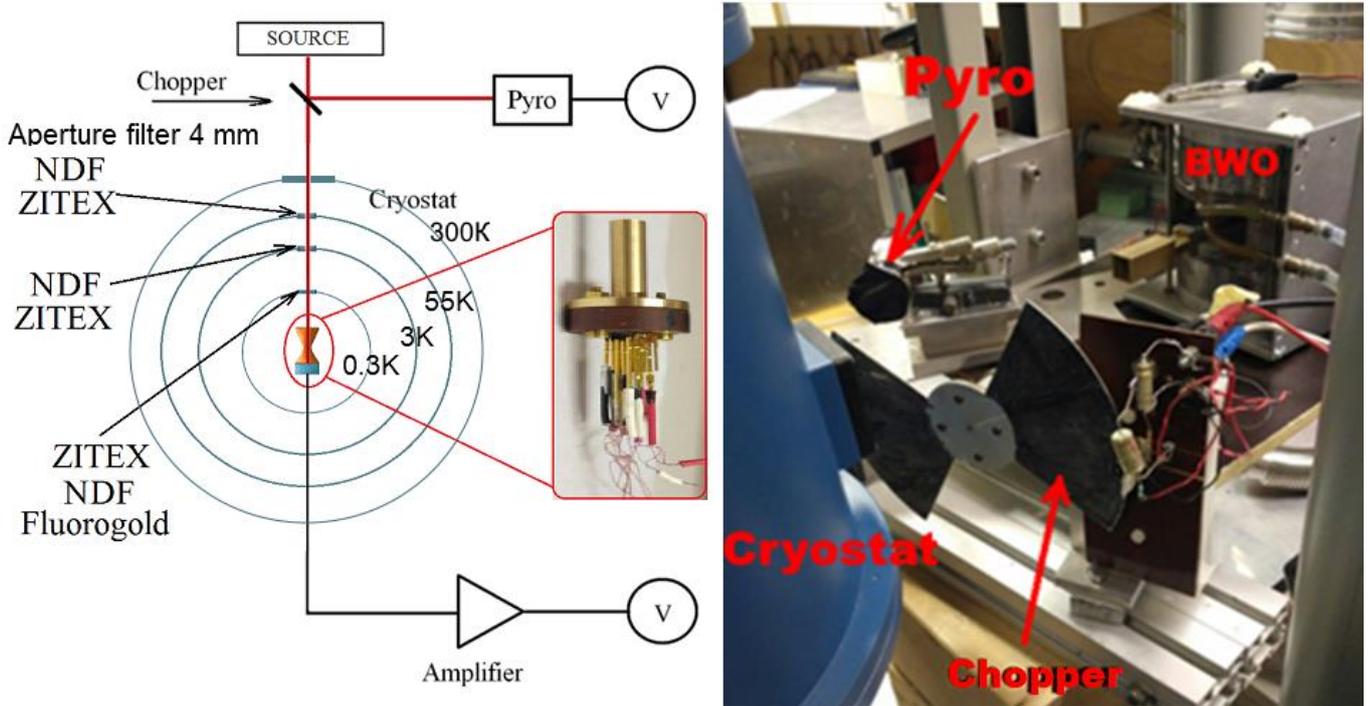


Рис. 9. Схема и фотография экспериментальной установки с источником находящимся снаружи криостата. На фотографии в качестве источника лампа обратной волны (BWO).

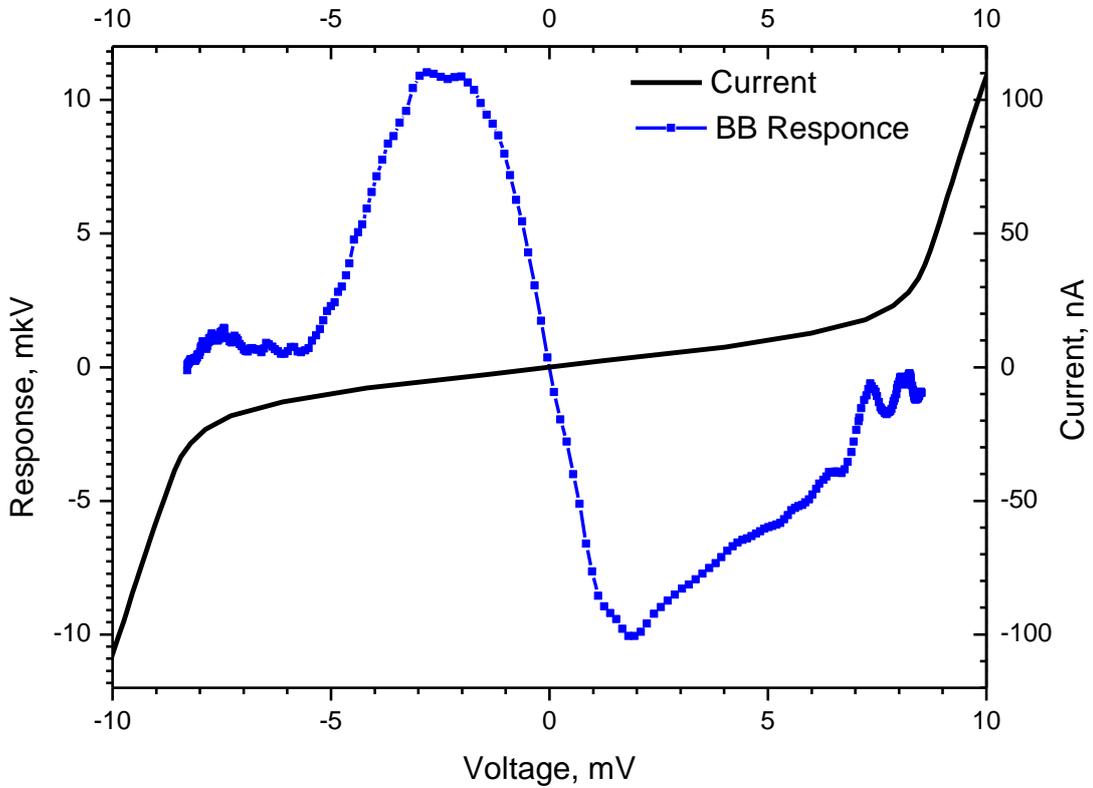


Рис. 10. Оптический отклик матрицы последовательно соединенных антенн на излучение черного тела, расположенного снаружи криостата

3. Спектральные измерения

Для измерений спектрального отклика в качестве источника излучения использована лампа обратной волны в диапазоне 230-380 ГГц (схематично экспериментальная установка представлена на рисунке 9). Излучение проходит через три квазиоптических аттенюатора, размещенных на радиационных экранах с температурами 55 К, 3 К, 0,3 К с ослаблением более 30 дБ, фильтр низких частот и полосно-пропускающий фильтр (добротность 15%, центральная частота 320 ГГц). Одновременно измерялись сигнал от болометра и от пироэлектрического детектора, с помощью которого контролировался уровень входной мощности. Экспериментальные спектры для образца с матрицей антенн на кремниевой подложке приведены на рис. 11.

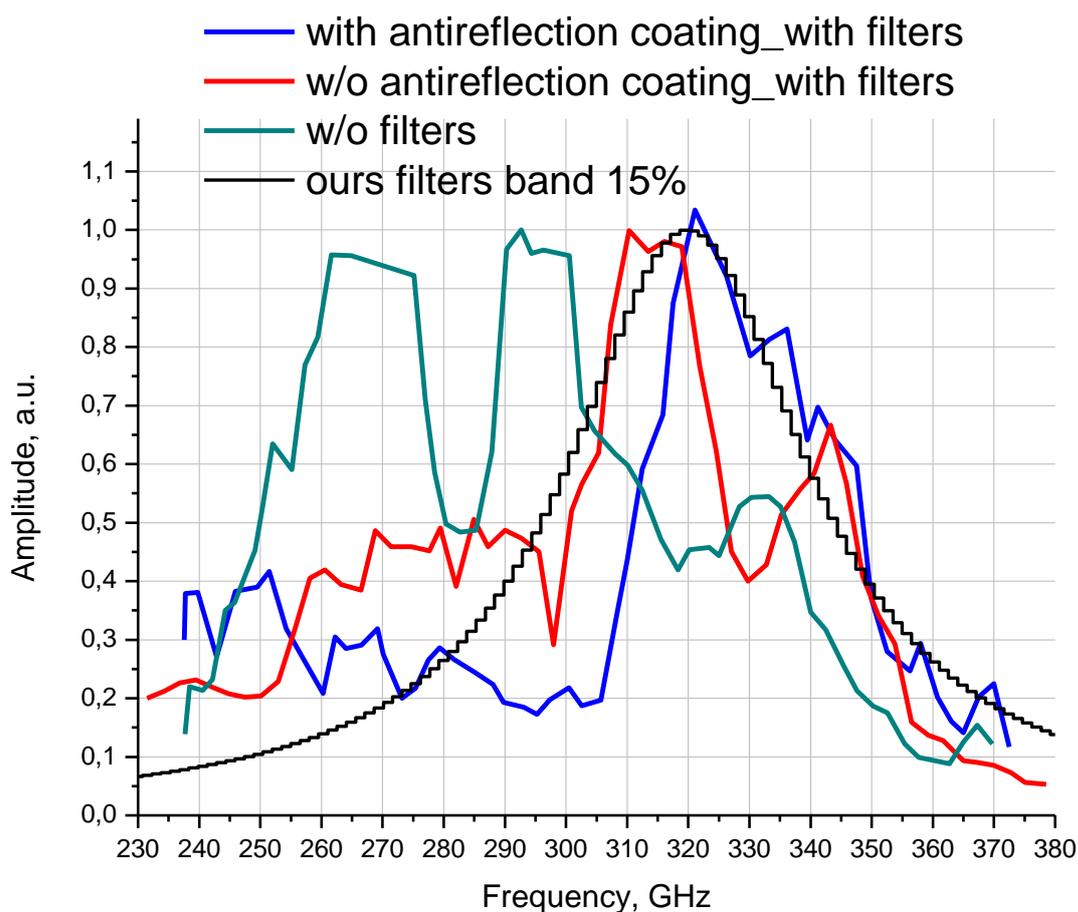


Рис 11. Спектральные характеристики матрицы. Отклики нормированы на максимальный сигнал.

Также были проведены исследования влияния четвертьволнового антиотражающего покрытия, рассчитанного на частоту около 300 ГГц. В качестве просветления использовалось два слоя капронового скотча общей толщиной около 130 мкм. Было показано, что оно улучшает чувствительность и равномерность спектрального отклика (красная кривая на рисунке 11).

Для сравнения проведено численное моделирование максимальной принимаемой мощности одного сегмента матрицы кольцевых антенн. Расчеты проведены в CST Studio 2016. Использовался Frequency Domain solver и граничные условия Unitcell (Расчет одного элемента в бесконечной матрице). К сожалению, данный способ не учитывает все особенности перераспределения полей в данной структуре, но позволяет сильно снизить время расчетов по сравнению с моделированием целой матрицы с 25 кольцами. Источник поля – плоская волна на расстоянии 1 мм. Отклик изучался на портах, интегрированных в кольцо, конфигурация расчета приведена на рисунке 12. Сопротивление порта (болметра) по умолчанию составляло 50 Ом. Емкость болметра учитывалась в постобработке результатов и составляла 70 фФ последовательно с портом. Параметры кольца: внешний диаметр 300 мкм, внутренний 256 мкм, материал золото (из библиотеки CST), толщина 500 нм. Кольцо расположено на кремниевой подложке 280 мкм с просветляющим покрытием, контррефлектор - пластинка из PEC (абсолютно проводящий материал, абстракция) на расстоянии $\lambda/4$ для частоты 345 ГГц. На рисунке 13 приведен расчет S-параметров для одного порта в кольце. На полученной кривой много резонансных провалов, связанных в первую очередь с особенностями моделирования: резонансы из-за размера ячейки, резонансы, связанные со всеми характерными толщинами при моделировании и т.д. В реальном эксперименте с большой подложкой данные особенности себя не проявляют.

Несмотря на высокую неравномерность поглощения в данной полосе частот по результатам численного моделирования, при использовании интегрирующей сферы, как в эксперименте, происходит поглощение в широкой полосе 250-

380 ГГц. И, благодаря 25 антеннам, встроенным в интегрирующую полость, суммарный уровень поглощения может превышать 50%.

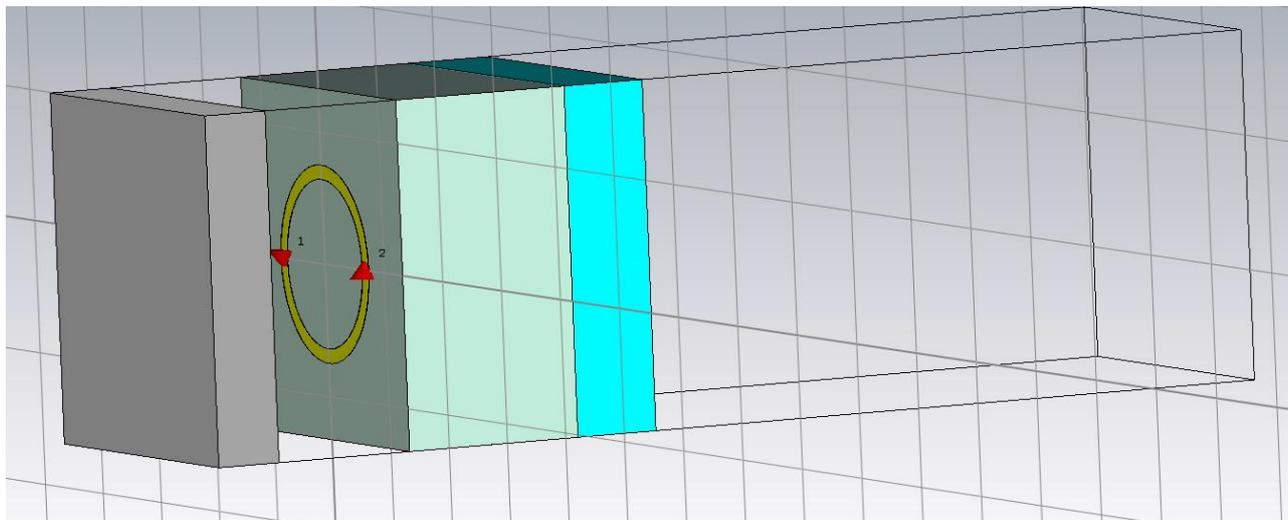


Рис. 12. Вид моделируемой структуры в программе CST Studio.

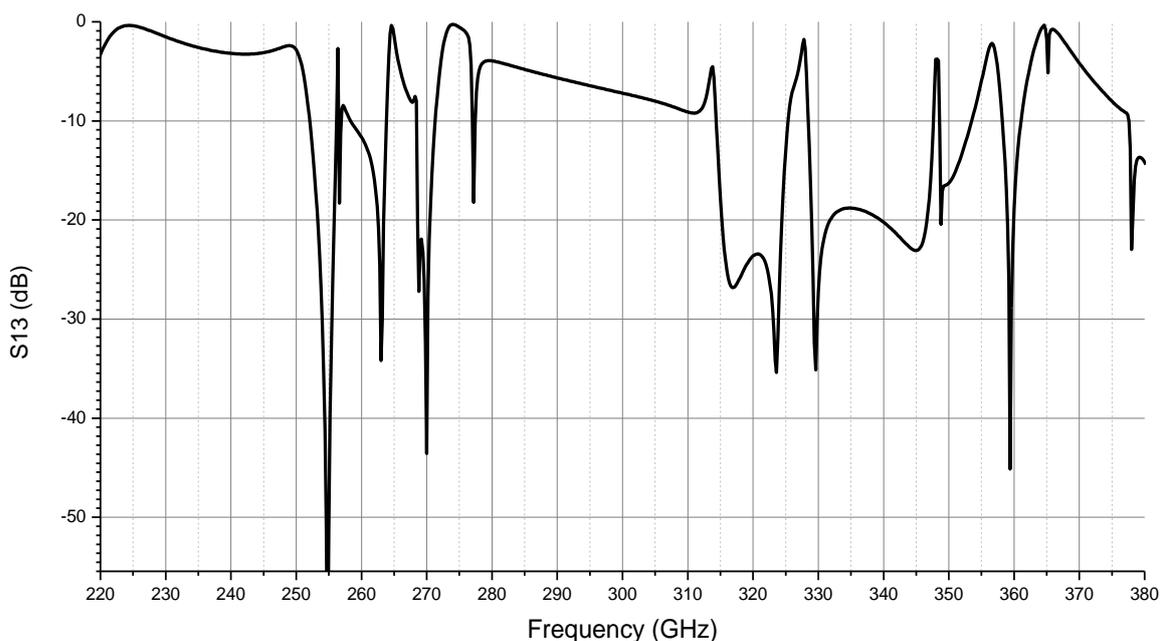


Рис. 13. Расчетные спектральные характеристики одиночного кольца на подложке с рефлектором через $\lambda/4$, освещаемого плоской волной

4. Заключение

Проведенные измерения показали, что схема распределенного поглотителя в виде матрицы антенн с болометрами и интегрирующей полостью является эффективным методом согласования с излучением в полосе 250-350 ГГц. Для высокоомной системы считывания сигнала на основе полевых транзисторов

антенны в массиве соединяются последовательно, а для низкоомной системы считывания и смещения по напряжению оптимальным является параллельное соединение болометров. Для последовательной матрицы из 25 антенн с болометрами чувствительность по напряжению на излучение черного тела достигает $3 \cdot 10^9$ В/Вт; линейный отклик для входной мощности составляет более 5 пВт. Мощность эквивалентную шуму (МЭШ) можно оценить из максимального уровня шума в данной системе измерений $100 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$. МЭШ составляет порядка $3 \cdot 10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$. Токовая чувствительность для матрицы из 25 параллельно соединенных антенн с болометрами составляет $2 \cdot 10^4$ А/Вт. Собственный дробовой шум в такой системе составляет примерно $1 \cdot 10^{12} \text{ А/Гц}^{1/2}$. МЭШ соответственно $5 \cdot 10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$. Так же в эксперименте было показано, что применение антиотражающего покрытия на кремниевой подложке позволило улучшить чувствительность и однородность спектрального отклика.

Благодарности

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 32 «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологии» - проект "ПРИЗ".

Литература

1. S.Mahashabde, A.Sobolev, A.Bengtsson, D.Andren, M.Tarasov, M.Salatino, P. de Bernardis, S.Masi, L.Kuzmin, A frequency selective surface based focal plane receiver for the OLIMPO balloon-borne telescope, IEEE Trans. on Terahertz Science and Technolgy, vol. 5, No 1, 2015, pp. 145-152, DOI 10.1109/TTHZ.2014.2362010.
2. S.Mahashabde, A.Sobolev, M.Tarasov, G.Tsydynzhapov, L.Kuzmin, Planar frequency selective bolometric array at 350 GHz, IEEE Trans. on Terahertz Science and Technolgy, vol. 5, No 1, 2015, pp. 37-43, DOI 10.1109/TTHZ.2014.2377247.
3. S.Mahashabde, M.Tarasov, M.Salatino, A.Sobolev, S.Masi, L.Kuzmin, P. de Bernardis, A distributed-absorber cold-electron bolometer single pixel at 95 GHz, Appl. Phys. Lett., 107, 092602 (2015), doi: 10.1063/1.4929604.

4. J.-M. Lamarre, J.-L. Puget, P. Ade, F. Bouchet, G. Guyot, A. Lange, F. Pajot, A. Arondel, K. Benabed, J.-L. Benny, et al., Planck prelaunch status: The HFI instrument, from specification to actual performance, *Astronomy and Astrophysics*, vol 520, 2010.

5. Integrating spheres, PIKE Technologies, www.piketech.com

Ссылка на статью:

М.А. Тарасов, С. Махашабде, А.А. Гунбина, М.Ю. Фоминский, Р.А. Юсупов, А.Б. Ермаков, А.М. Чекушкин, А.С. Соболев, В.С. Эдельман, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин. Матрица кольцевых антенн с криогенными болометрами диапазона 345 ГГц в интегрирующей полости. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2018. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/5/text.pdf>