## Matching of the planar antenna array with SINIS bolometers to the 350 GHz radiation

 Vdovin V.F.<sup>1,2,3</sup>, Gunbina A.A.<sup>1,2</sup>, Mansfel'd M.A.<sup>1,2</sup>, Yakopov G.V.<sup>4</sup>, Yusupov R.A.<sup>5</sup> Chekushkin A.M.<sup>5</sup>, Edelman V.S.<sup>6</sup>, Tarasov M.A.<sup>5</sup>
<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
<sup>2</sup>Institute of Applied Physics RAS
<sup>3</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
<sup>4</sup>Special Astrophysical Observatory RAS
<sup>5</sup>V.Kotelnikov Institute of Radio Engineering an d Electronics RAS
<sup>6</sup>P.Kapitza Institute for Physical Problems RAS

**Abstract:** The planar antenna arrays of 350 GHz band were modeled, fabricated and studied. The array is a series connection of annular planar antennas with SINIS bolometers. Samples are mounted in a back-to-back horn with counter-reflector that is equivalent to integrating cavity. Different types of array illuminating were investigated: illuminating through the dielectric side (arrays on Si-substrates with different substrate thicknesses were investigated) and illuminating from the antennas side. It is shown experimentally that the second configuration has higher efficiency, wider and more uniform bandwidth.

**Keywords:** planar antenna array, SINIS bolometers, MM and SubMM waves, cryogenic receivers for radio astronomy

## Согласование матрицы планарных антенн с СИНИС болометрами с излучением диапазона 350 ГГц

Вдовин В.Ф.<sup>1,2,3</sup>, Гунбина А.А.<sup>1,2</sup>, Мансфельд М.А.<sup>1,2</sup>, Якопов Г.В.<sup>4</sup>, Юсупов Р.А.<sup>5</sup>, Чекушкин А.М.<sup>5</sup>, Эдельман В.С.<sup>6</sup>, Тарасов М.А.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева <sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН

vdovin\_iap@mail.ru

<sup>3</sup>Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,

Москва

<sup>4</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН <sup>5</sup>Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН <sup>6</sup>Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН

Аннотация: Разработаны, изготовлены и исследованы матрицы кольцевых планарных антенн диапазона 350 ГГц. Матрица представляет собой последовательное соединение кольцевых планарных антенн с двумя СИНИС болометрами. Образцы помещали в интегрирующую полость в виде пары встречных рупоров с контррефлектором. Исследованы различные варианты облучения матрицы сигналом: со стороны диэлектрика (рассматривались матрицы на кремниевой подложке различной толщины) и со стороны антенн. Экспериментально показано, что последняя конфигурация обладает более высокой эффективностью и широкополосностью.

*Ключевые слова:* матрица планарных антенн, СИНИС болометры, ММ и СубММ волны, криогенные приемники для радиоастрономии

### 1. Введение

Обширный интерес радиоастрономического сообщества к субмиллиметровому диапазону длин волн вызвало реализацию обширного перечня международных, в том числе с российским участием проектов обсерваторий этого диапазона. Среди них следует упомянуть HERSHEL, PLANK, МИЛЛИМЕТРОН (космические), BOOMERANG, OLIMPO, LSPE (баллонные), ALMA, SPO, Суффа (наземные). Космические, баллонные и в еще большей мере наземные радиотелескопы субмиллиметрового диапазона длин волн накладывает чрезвычайно высокие и зачастую противоречивые требования к характеристикам приемных систем. Оптимальными с точки зрения достижения предельной чувствительности приемными системами для подобных телескопов являются криогенные болометры, создаваемые рядом групп разработчиков в различных идеологиях болометрических структур. Противоречивость требований состоит в том, что с одной стороны, необходима предельно высокая чувствительность на уровне не хуже  $10^{-16}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>для наземных, и еще на два порядка выше для космических телескопов. С другой стороны нужен широкий динамический диапазон, поскольку уровень фонового излучения атмосферы (для наземных телескопов) даже в одномодовом режиме может составлять десятки пиковатт в диапазоне 0.8 мм. Фоновая нагрузка для выводимых за атмосферу баллонных или космических телескопов оказывается на уровне (для баллонов) и даже на порядок ниже (для космоса). Однако в совокупности с требованием к чувствительности, к примеру, для космического телескопа Миллиметрон, не хуже  $10^{-17}$ — $10^{-18}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> дает практически тот же уровень требований к динамическому диапазону приемной структуры. Фак-

тически уровень чувствительности эквивалентен способности приемника надежно детектировать отдельные кванты приходящего излучения. Повышение чувствительности болометра достигается уменьшением размера абсорбера, в нашем случае менее 0.026 мкм<sup>3</sup>, а расширение динамического диапазона - использованием матрицы до 50 таких болометров. При таком наборе высоких требований самое критическое значение приобретает проблема согласования приемной структуры с антенной телескопа. В субмиллиметровом диапазоне наряду с традиционными рупорными облучателями антенн используются линзовые системы. Разрабатываемые матрицы болометров, интегрированных с планарными антенными структурами, также могут согласовываться с выходным пучком телескопа либо с помощью иммерсионной линзы с антиотражающим покрытием, либо с помощью рупора, в частности, интегрирующей полостью. В качестве такой конструкции использован встречный рупор с контррефлектором (back-to-back horn) – в этом случае имеем т.н. интегрирующую полость.

### 2. Моделирование

Приемные структуры представляют собой квадратную матрицу 5х5 последовательно соединенных кольцевых антенн с болометрами структуры Сверхпроводник – Изолятор - Нормальный металл – Изолятор -Сверхпроводник (СИНИС) аналогичные [1, 2]. В данной работе рассмотрено два варианта расположения и согласования приемных матриц с внешним излучением: облучение сигналом от источника на приемную матрицу со стороны диэлектрика и обратный вариант с облучением матрицы со стороны антенн. Схематичное изображение освещения приемных матриц сигналом от источника и фотографии держателей образцов представлены на рисунке 1. Моделирование таких приемных структур было выполнено в программном пакете CST STUDIO SUITE с использованием Frequency Domain solver и граничных условий Unitcell, что позволяет проводить расчет единичного элемента в бесконечной матрице. Кольцевая планарная антенна располагается на кремниевой подложке толщиной 280 мкм. Размеры моделируемой антенны: внешний диаметр - 300 мкм, внутренний диаметр – 256 мкм, период матрицы – 475 мкм. Результаты моделирования представлены на рисунке 2. Путем масштабирования размеров единичного элемента, описываемая матрица планарных антенн может быть использована для других диапазонов частот. В каждую антенну

интегрировано два СИНИС болометра. В моделируемом проекте, для задания болометра, использовали дискретный порт с сопротивлением 50 Ом – эквивалентен сопротивлению абсорбера и ёмкости 25 фФ – эквивалентна ёмкости СИН-переходов, оптимизированных для разрабатываемой структуры. В моделируемом проекте для случая, когда матрица антенн облучается со стороны диэлектрика, контррефлектор сделанный из идеального проводника (РЕС) расположен на расстоянии  $\lambda/4$  для частоты 345 ГГц от матрицы, а для второго случая – непосредственно нанесен на обратную сторону кремниевой подложки. В реальных же условиях в качестве контррефлектора используется алюминиевый скотч, наклеенный на держатель образца (для первого случая) или напыляется слой золота (100 нм) на обратную сторону кремниевой подложки (для второго случая). Для улучшения равномерности спектрального отклика и улучшения чувствительности было использовано антиотражающее покрытие для случая, когда матрица облучается со стороны диэлектрика (в эксперименте был использован каптоновый скотч, наклеиваемый на обратную сторону кремниевой подложки). В качестве источника излучения в моделируемом проекте используется плоская волна на расстоянии 1 мм от структуры. Результаты моделирования демонстрируют лучшие результаты с точки зрения полосы и значений рассогласования для структуры с облучением со стороны антенны. Вместе с тем моделирование не может учесть все детали картины электромагнитной обстановки в реальном приемном комплексе, например, такие как переотражения внутри криостата, и полностью просчитать всю систему с рупором, который дает нам интегрирующую полость и т.п. невозможно. В связи с чем, результаты моделирования использовались только для создания первого приближения проектируемой системы, отрабатывавшейся в дальнейшем в эксперименте.

В разработанных структурах было использовано последовательное или параллельное соединение описанных выше единичных элементов. Выбор принципа соединения элементов обуславливается тем, какую систему считывания предполагается использовать. В случае последовательного соединения имеем высокое выходное сопротивление (~50 кОм нормального сопротивления соответствуют 300-500 кОм дифференциального сопротивления в рабочей точке), для считывания оптимально использовать полевые транзисторы с полупроводниковым затвором (ПТПЗ или JFET), обеспечивающие необходимые шумовые характеристики на уровне 10 нВ/Гц<sup>1/2</sup> для шумов напряжения. Для параллельного соединения элементов асимптотическое сопротивление матрицы составляет 14 Ом, что позволяет использовать для считывания сигнала сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД) или биполярный транзистор с криогенным согласующим трансформатором.



Puc.1. Схематичное изображение двух типов образцов. Fig.1. The schematic image of two types of samples





Fig. 2. The results of modeling: illuminating of array from the dielectric side (red curve), illuminating of array from the antenna side (black curve)

### 3. Технология изготовления исследуемых образцов

Технология изготовления идентична для двух типов образцов: литография первого слоя (антенны, подводящие провода и контактные площадки) была сделана лазерной литографией и электронно-лучевым напылением. В качестве первого слоя напылялась трехслойка 10nm Ti/ 100nm Au/ 20nm Pd (Ti используется в качестве адгезивного слоя для золота, Pd – напыляется для последующего слоя сверхпроводящих алюминиевых элек-

тродов болометров, интерфейс Pd/Al имеет маленькое контактное сопротивление). Для изготовления второго слоя (СИНИС-болометры) применяли электронно-лучевую литографию и электронно-лучевое напыление с применением техники теневого напыления. В качестве нормального метала абсорбера использовали алюминий с подслоем железа, изолятор – окисление слоя алюминия, для сверхпроводника – напыление алюминия под углами ±45°. Принципиальное отличие в технологии изготовления образцов заключается в том, что для случая, когда матрица облучается со стороны антенн, первой технологической операцией является травление кремниевой подложки до толщины  $\lambda/4$  (64 мкм) и напыление слоя золота, выполняющего функции контррефлектора. Конфигурация антенн и болометров одинаковы для каждого типа образцов. Фотографии изготовленных структур представлены на рисунке 3.



Рис. 3. Исследуемые образцы (слева) и фотография единичного элемента и болометра в сканирующем электронном микроскопе (справа).

Fig. 3. The investigated samples (left) and photo of single element and bolometer in scanning electron microscope (right)

### 4. Эксперимент

Измерения образцов проводили в криостате при рабочей температуре 100-300 мК. Смонтированный в держатель с рупором образец крепился на холодную плиту криостата. Схематичное изображение экспериментальной установки представлено на рисунке 4. Измерены оптический и спектральный отклики тестовых образцов. Сделано два типа измерений: с расположением источника тестового сигнала внутри или снаружи криостата. Также были проведены измерения с ЧТ снаружи криостата (теплая/холодная нагрузка).

В случае измерения оптического отклика в качестве источника излучения использовали черное тело (ЧТ), размещенное вместе с приемни-

ком внутри криостата [3] (рисунок 4а). При нагреве источника до 10 К вольтваттный отклик составил  $dV/dP = 8 \cdot 10^8$  В/Вт. Отклик по току и напряжению представлен на рисунке ба. Также были проведены измерения с ЧТ снаружи криостата (теплая/холодная нагрузка). Были измерены ВАХи при ЧТ комнатной температуры и ЧТ в жидком азоте. Полученный отклик представлен на рисунке 5b.

Для измерения спектрального отклика в качестве источника использовали лампу обратной волны (ЛОВ) диапазона 230 – 380 ГГц. Сигнал от ЛОВ поступает к образцу через окна криостата. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 4b. Примерное ослабление сигнала, проходящего через квазиоптические аттенюаторы на окнах, составляет около 30 дБ. В ходе измерений одновременно детектировался сигнал с болометров и опорный сигнал с ЛОВ (контроль осуществляется пироэлектрическим детектором МГ30). Измеренный сигнал с болометра нормировался на опорный сигнал. Были проведены измерения следующих образцов: стандартные образцы (облучение матрицы антенн через диэлектрик) с различными толщинами кремниевой подложки и образцы, облучаемые со стороны антенн. Для сравнения уровня сигнала, принимаемого такими образцами, был проведен эксперимент в одном измерительном цикле (результаты измерений такого типа представлены на рисунке 7).



Рис. 4. Экспериментальная установка: а) – Схематичное изображение экспериментальной установки, когда источник излучения находится внутри криостата, источник – ЧТ,
b) – Схематичное изображение экспериментальной установки, когда источник излучения находится снаружи криостата.

Fig. 4. The experimental setup: a) – The schematic illustration of experimental setup when the radiation source is mounted inside the cryostat; the source is BB, b) - The schematic illustration of experimental setup when the radiation source is mounted outside the cryostat



Рис. 5. Измеренный оптический отклик: а) – Оптический отклик в случае, когда ЧТ находится внутри криостата и было нагрето до 10 К; b) – ВАХ и отклик исследуемой структуры в случае, когда ЧТ находится снаружи криостата.

Fig. 5. Measured optical response: a) – Optical response when the BB source is mounted inside the cryostat and was heated to 10 K; b) – IV and response of investigated structure when the BB source is mounted outside the cryostat



Рис. 6. Измеренный спектральный отклик матриц освещаемых через диэлектрик и со стороны матриц.

Fig. 6. Measured spectral response of arrays with illuminating through dielectric and from the array side

Copyright © 2018 for this paper by its authors. Copying permitted for private and academic purposes. Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2018) Sevastopol, Russian Federation, September 9–15, 2018

1570

# 5. Практическое использование матриц для радиоастрономических наблюдений

Диапазон длин волн 0.8 мм несмотря на чрезвычайно обширный интерес астрономов, является не очень обеспеченным реальными инструментами, практически все действующие и разрабатываемые проекты перечислены во введении. В России сегодня вообще нет ни одного работающего радиотелескопа этого диапазона. Среди строящихся - космический телескоп Миллиметрон и совместный проект 70-ти метрового телескопа на плато Суффа. Авторы настоящей работы ставят перед собой амбициозную задачу стать разработчиками болометрических приемников для обоих проектов. Приведенные в работе лабораторные эксперименты дают все основания для реалистичности поставленной цели. Вместе с тем, чтобы доказать обоснованность претензии лабораторных тестов недостаточно.



Рис. 7. Адаптивный радиотелескоп РТ-70, диапазон 0,8мм – 60мм [4]

Fig. 7. Adaptive radio telescope RT-70, the bandwidth is 0.8 mm – 60 mm [4]



Рис. 8. Космический телескоп Миллиметрон [5]

Fig. 8. The Space telescope MILLIMETRON [5]

В связи с чем авторами совместно со специалистами САО РАН прорабатывается создания приемника на представленных в работе болометрах на оптическом телескопе БТА (Большой Телескоп Азимутальный) – крупнейший оптический телескоп в Евразии с монолитным стеклянным, покрытым алюминием зеркалом диаметром 6 м. Идеи использования этого оптического телескопа для субтерагерцовых наблюдений прорабатывались авторами еще вначале 90-х годов, однако из-за финансовых и организаци-

онных трудностей того периода, проект до конца не был реализован. Группой исследователей из ИРЭ РАН с участием одного из авторов настоящей работы была сделана попытка создания матрицы болометров для БТА, также не дошедшая до практического применения [6] также по причинам дефицита финансирования. В настоящий момент, команда авторов работы является единственным коллективом в коллаборации проекта Суффа, предлагающие болометрические приемники диапазона 0.8 мм столь высокой степени проработки. Проект имеет четко обозначенные на межгосударственном уровне планы финансирования, включая 7 млн.долларов на развитие приемников, и не сомнений, что он будет реализован. Отработка на БТА в режиме практических радиоастрономических наблюдений прототипов приемников Суффы является ключевым элементом апробации будущего комплекса для Суффы. Перспективы возможности использования поверхности БТА для работы в субТГц диапазоне были исследованы на образцах - свидетелях группой В.В.Паршина (не опубликовано) и продемонстрировали отражательную способность в субТГц диапазоне более 95%. Авторами работы был разработан и изготовлен образец, состоящий из 23-х таких приемных матриц, облучаемых внешним сигналом через рупора и + 1 «темновой» матрицы, скрытой от излучения (изготовленный образец представлен на рисунке 8). Разработана конструкция держателя, позволяющая проводить измерения одного и того же образца как стандартным образом (облучение со стороны диэлектрика) так и с облучением со стороны металлизации, пригодная для установки на БТА.



Рис. 8. Разработанный и изготовленный образец, состоящий из 23-х матриц. Fig. 8. Developed and fabricated sample consisting of 23 arrays

### 6. Заключение

Разработаны, изготовлены и исследованы приемные матрицы планарных кольцевых антенн с интегрированными СИНИС-болометрами. Измерены отклик по напряжению на излучение черного тела и спектральный отклик таких структур. Новый тип образцов, когда матрица освещается сигналом со стороны антенн, как и предполагалось, имеет широкий спектр и уровень принимаемого сигнала значительно больше, чем в стандартной конфигурации. Разработан и изготовлен образец, состоящий из 23-х таких матриц для установки и проведения практических радиоастрономических измерений на БТА с перспективой использования в качестве штатного приемника строящихся телескопов обсерватории Суффа и миссии Миллиметрон.

#### Источники финансирования и выражение благодарности

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 32 «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологии» Проект "ПРИЗ" и ГЗ Института прикладной физики РАН отдела радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии

### Список литературы

[1] S.Mahashabde, A.Sobolev, A.Bengtsson, et al, A frequency selective surface based focal plane receiver for the OLIMPO balloon-borne telescope// IEEE Trans. on Terahertz Science and Technolgy. 2015. T.5, No 1, C. 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, T. 5, No 1. 2015. C. 37-43, DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2377247

[3] V. S. Edelman, A dilution microcryostat-insert. Instrum. Exp. Tech. **52**, N2, 301-307 (2009), DOI: 10.1134/S002044120902033X.

[4] http://www.asc.rssi.ru/suffa/iraos.htm

[5] Wild, Wolfgang; Kardashev, Nikolay S.; Likhachev, S. F.; Babakin, N. G.; Arkhipov, V. Y.; Vinogradov, Millimetron-a large Russian-European submillimeter space observatory// Experimental Astronomy. 2009. T. 23, No 1, C. 221-244.

[6] Vystavkin, A. N.; Shitov, S. V.; Bankov, S. E.; Kovalenko, A. G.; Pestriakov, A. V.; Cohn, I. A., High sensitive 0.13-0.38 THz TES array radiometer for the Big Telescope Azimuthal of Special Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences// 2007 Joint 32<sup>nd</sup> International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics, VOLS 1 AND 2. (2007). C. 115- Scopus id - 2-s2.0-84954041360 WoS id - WOS:000257936900045

### References

[1] S.Mahashabde, A.Sobolev, A.Bengtsson, et al, A frequency selective surface based focal plane receiver for the OLIMPO balloon-borne telescope, *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technolgy*. 5 (2015) 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*, 5 (2015) 37-43, DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2377247

[3] V. S. Edelman, A dilution microcryostat-insert, *Instrum. Exp. Tech.* 52 (2009) 301-307, DOI: 10.1134/S002044120902033X.

[4] http://www.asc.rssi.ru/suffa/iraos.htm

[5] Wild, Wolfgang; Kardashev, Nikolay S.; Likhachev, S. F.; Babakin, N. G.; Arkhipov, V. Y.; Vinogradov, Millimetron-a large Russian-European submillimeter space observatory, *Experimental Astronomy*. 23 (2009), 221-244

[6] Vystavkin, A. N.; Shitov, S. V.; Bankov, S. E.; Kovalenko, A. G.; Pestriakov, A. V.; Cohn, I. A., High sensitive 0.13-0.38 THz TES array radiometer for the Big Telescope Azimuthal of Special Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences, 2007 Joint 32<sup>nd</sup> International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 15<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics, VOLS 1 AND 2. (2007). C. 115- Scopus id - 2-s2.0-84954041360 WoS id - WOS:000257936900045

### Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the Basic Research Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 32 "Nanostructures: Physics, Chemistry, Biology, Technology Basics". Project "PRIZE" and Project of Institute of Applied Physics RAS, Department of radio receiver devices and millimeter radioastronomy.