

# МАТРИЦЫ ПЛАНАРНЫХ АНТЕНН С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ СИНИС БОЛОМЕТРАМИ ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Бейранванд Б.<sup>5</sup>, Вдовин В.Ф.<sup>4,6,7</sup>, Гунбина А.А.<sup>4,6</sup>, Ермаков А.Б.<sup>1,2</sup>, Лемзяков С.А.<sup>3,5</sup>, Мансфельд М.А.<sup>4,6</sup>, Махашабе С.<sup>2</sup>, Нагирная Д.В.<sup>1</sup>, Соболев А.С.<sup>1,5</sup>, Тарасов М.А.<sup>1,2</sup>, Фоминский М.Ю.<sup>1</sup>, Чекушкин А.М.<sup>1</sup>, Эдельман В.С.<sup>3</sup>, Юсупов Р.А.<sup>1</sup>, Якопов Г.В.<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Чалмерский технологический университет, Швеция

<sup>3</sup>Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН

<sup>4</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

<sup>5</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>6</sup>Институт прикладной физики РАН

[aleksandragunbina@mail.ru](mailto:aleksandragunbina@mail.ru)

<sup>7</sup>Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>8</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Разработаны, изготовлены и измерены приёмные матрицы на основе планарных антенн с интегрированными СИНИС (Сверхпроводник – Изолятор – Нормальный металл – Изолятор – Сверхпроводник) болометрами для радиоастрономических исследований. Были исследованы как различные конфигурации матриц (полуволновые антенны и метаматериалы), так и различные способы освещения матрицы (со стороны диэлектрической подложки и со стороны планарных антенн). Экспериментально измеренные характеристики: МЭШ  $=10^{-17}$  Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , вольтваттная чувствительность  $2 \times 10^9$  В/Вт, эквивалентная шуму разница температур (флуктуационная чувствительность) при уровне фона 2.7 К - 100 мкК/ $\sqrt{\text{Гц}}$ , показывают что такие устройства можно использовать для измерения анизотропии фонового излучения. Первое тестирование разработанных образцов в условиях реальной фоновой нагрузки предполагается на отечественной обсерватории БТА (Большой Телескоп Азимутальный) САО РАН [1].

## Введение

Наиболее высокие требования к чувствительности приемных систем предъявляет радиоастрономия. Болометры, а конкретно матрицы болометров, чрезвычайно востребованы в настоящее время радиоастрономами для исследований в СубТГц диапазоне частот, связанным с исследованиями реликтового микроволнового фона, холодных объектов – центров звездообразования, обнаружения эффекта Сюняева–Зельдовича и других актуальных астрофизических задач. В работе представлены результаты разработки приемных матриц, предназначенных для решения этих задач. Выполнены моделирование, изготовление и экспериментальное лабораторное тестирование. Отсутствие в настоящий момент отечественных телескопов СубТГц диапазона, но наличие серии перспективных отечественных и международных проектов делают представляемую работу весьма перспективной. Среди них следует упомянуть Миллиметрон, Суффу и QTT.

## Моделирование приёмных матриц

Моделирование приёмных матриц проводилось в программном пакете CST STUDIO SUITE. Разрабатываемые структуры представляют собой частотно-селективные поверхности (ЧСП) – периодическое расположение простых металлических повторяющихся структур, взаимодействующих с падающим электромагнитным излучением. Т.к. приёмные матрицы состоят из большого количества элементов, а расчеты проводятся для довольно малой длины волны (например, для диапазона 345 ГГц - 0,870 мм, а в кремнии еще меньше - 0.259 мм), то расчетная сетка имеет большое количество ячеек ( $\approx 10^9$ ). В таком случае, целесообразно использовать метод Флоке-портов и граничные условия UnitCell, что позволяет проводить расчет единичного элемента в бесконечной матрице и значительно сократить время моделирования. Единичным элементом матрицы является планарная кольцевая антенна с интегрированными СИНИС болометрами (2 или 4 болометра в каждой антенне). Для создания болометра в программе для моделирования использовали последовательное соединение дискретного порта (эквивалентен сопротивлению абсорбера болометра,  $\approx 40$  Ом) и сосредоточенного элемента (ёмкость болометра,  $\approx 25$  фФ). В качестве источника излучения использовали плоскую волну

на расстоянии 1 мм от структуры. Все элементы матрицы могут быть соединены как последовательно, так и параллельно, в зависимости от того, какое требуется асимптотическое сопротивление матрицы.

### Полуволновые антенны для различных диапазонов

В данном подразделе будут кратко представлены результаты моделирования для разрабатываемых ранее матриц полуволновых антенн для различных диапазонов 90, 145, 220, 240, 345 и 480 ГГц [2], Рисунок 1. Исследуемые структуры представляют собой планарные антенны из золота, толщиной 130 нм, расположены на кремниевой подложке. В качестве контррефлектора, расположенного на расстоянии  $\lambda/4$  от приёмной матрицы, в модели использовали идеальный проводник (т.н. PEC), в реальных же условиях, использовали алюминиевый скотч, наклеенный внутри держателя образца. Чтобы улучшить чувствительность и равномерность спектрального отклика дополнительно использовали антиотражающее покрытие – каптоновый скотч, наклеенный на обратную сторону кремниевой подложки. Путем скалирования единичного элемента матрицы – модель можно использовать для различных диапазонов частот.

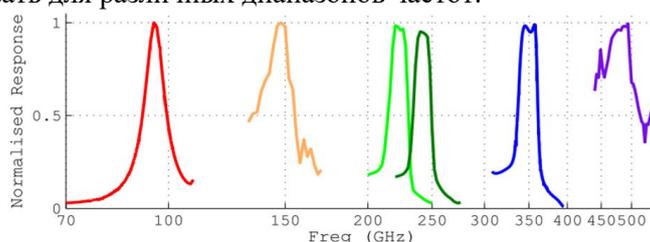


Рис. 1. Результаты моделирования приёмных матриц полуволновых антенн для различных диапазонов

### Различные способы облучения приёмной матрицы

В предыдущих работах, рассматривали облучение приёмной матрицы со стороны диэлектрической подложки. В следующем поколении разработанных образцов (для диапазона 345 ГГц) матрица с антеннами была повернута «лицом» к излучению. В данном случае не требуется антиотражающего покрытия, а контррефлектор наносится непосредственно на обратную сторону. Схематичное изображение различных типов освещения матрицы представлено на Рисунке 2, а сравнение результатов моделирования на рисунке 3.а. Наилучший результат показывают матрицы с облучением со стороны антенн: более равномерное поглощение в требуемой полосе частот. Забегая вперед, отметим, что и в экспериментальных результатах видим заметное улучшение в уровне поглощения при освещении матрицы со стороны антенн (Рисунок 3.б).

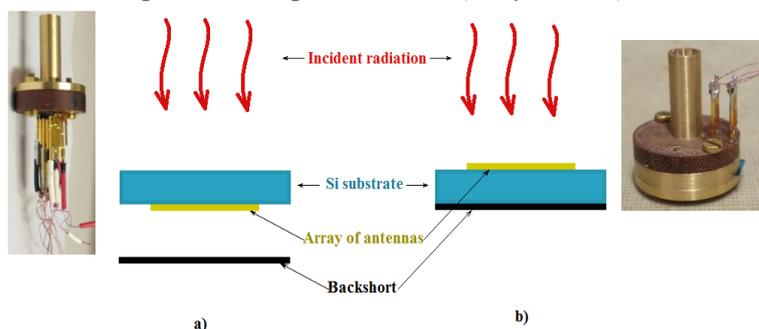
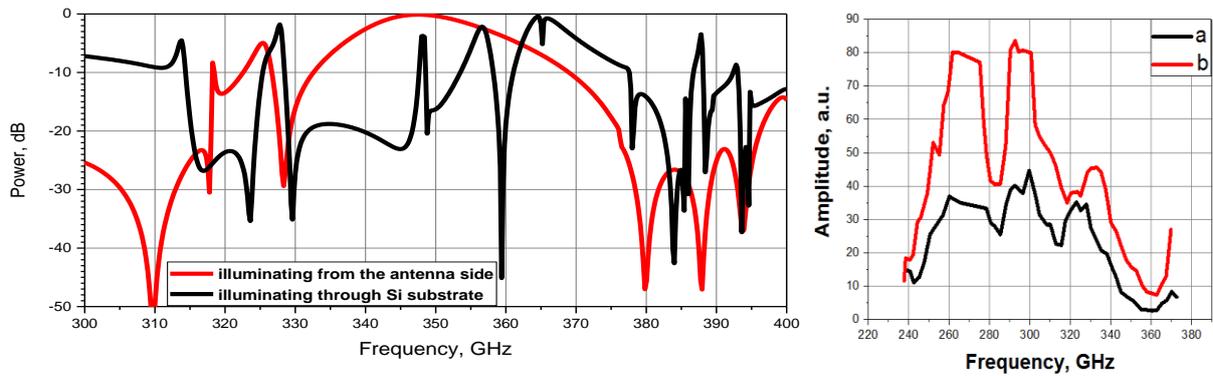


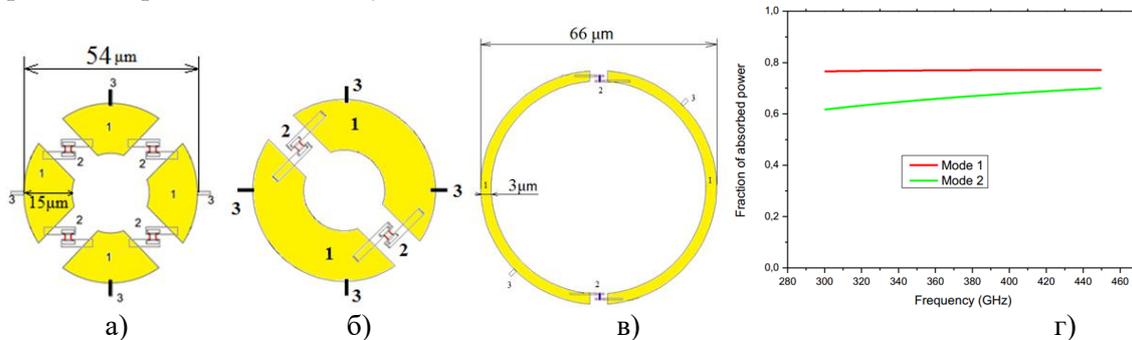
Рис. 2. Схематичное изображение различных типов облучения приёмной матрицы проходящим сигналом



**Рис. 3.** Сравнение результатов моделирования (слева) и эксперимента (справа) для различных типов освещения приёмной матрицы

### Матрицы метаматериалов

Метаматериалы в виде периодической матрицы проводящих элементов эффективно взаимодействуют с электромагнитным излучением, когда размеры элементов и их период существенно меньше длины волны. Модель единичного элемента такой структуры представлена на рисунке 1.б. Элементы такой матрицы плотно «упакованы» и матрица  $10 \times 10$  элементов занимает площадь всего  $621 \times 621$  мкм, сравнении с матрицами полуволновых антенн (матрица  $5 \times 5$  элементов занимает площадь  $2200 \times 2200$  мкм). Были проведены расчеты как для матрицы, расположенной в поясе одномодового рупора, так и для проведения экспериментальных измерений с линзой. Различные единичные элементы таких матриц – на Рисунке 5. Уровень поглощаемой мощности, полученный при моделировании, представлен на Рисунке 5.г.

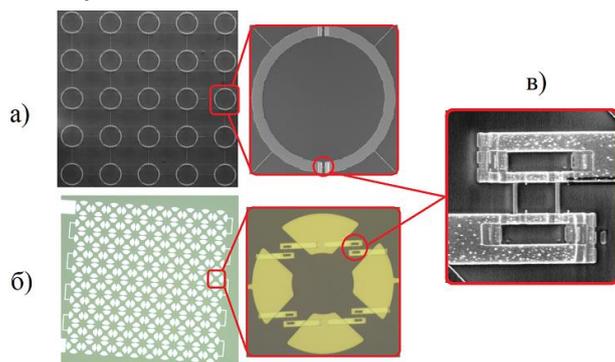


**Рис. 4.** Схематичное изображение единичных элементов матрицы метаматериалов: а), б) – Единичные элементы матриц, рассчитанных для измерений с рупором с четырьмя и двумя болометрами; в) – Единичный элемент матрицы метаматериалов, рассчитанной для измерений с линзой; г) – Результаты моделирования - доля поглощаемой мощности

### Технология изготовления приёмных структур

Технологию изготовления образцов можно разделить на два этапа: изготовление антенн, соединительных проводов, контактных площадок и изготовление болометров. Для изготовления первого слоя использовалась лазерная литография с электронно-лучевым или магнетронным напылением трёхслойки  $10\text{нм Ti}/100\text{нм Au}/20\text{нм Pd}$ . Для изготовления второго слоя с болометрами необходимо использовать электронный литограф, т.к. минимальный размер (ширина абсорбера) составляет 100 нм. Для напыления болометров применяется электронно-лучевое напыление с применением техники теневого напыления для образования

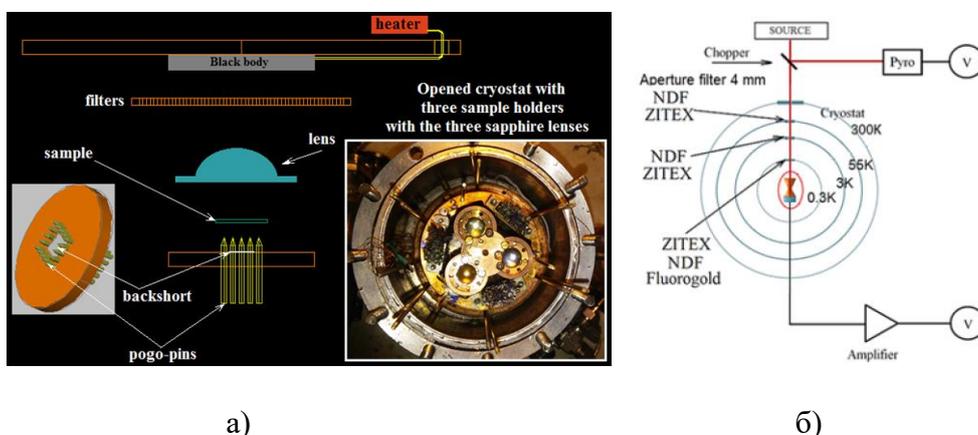
абсорберов и СИН-переходов в едином вакуумном цикле. Фотографии изготовленных образцов представлены на Рисунке 5.



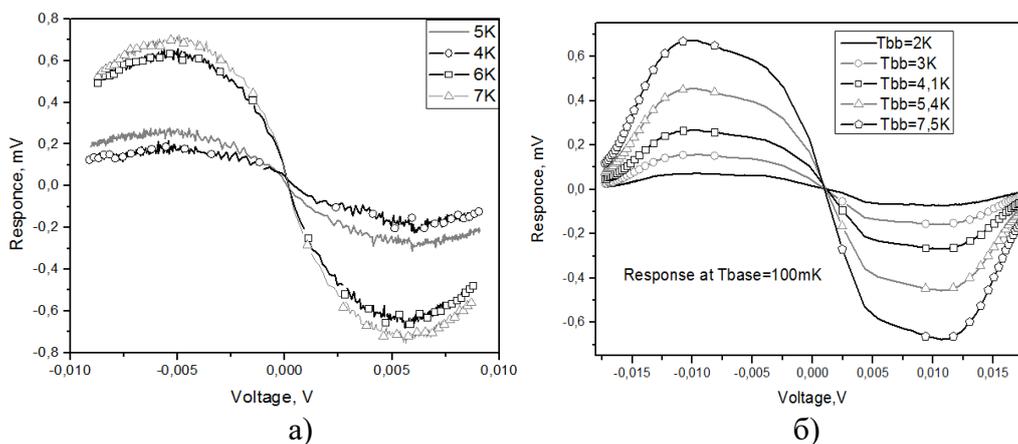
**Рис. 5.** Фотографии изготовленных образцов: а) Матрица полуволновых антенн; б) Матрица метаматериалов; в) СИНИС болометры

### Результаты экспериментальных измерений

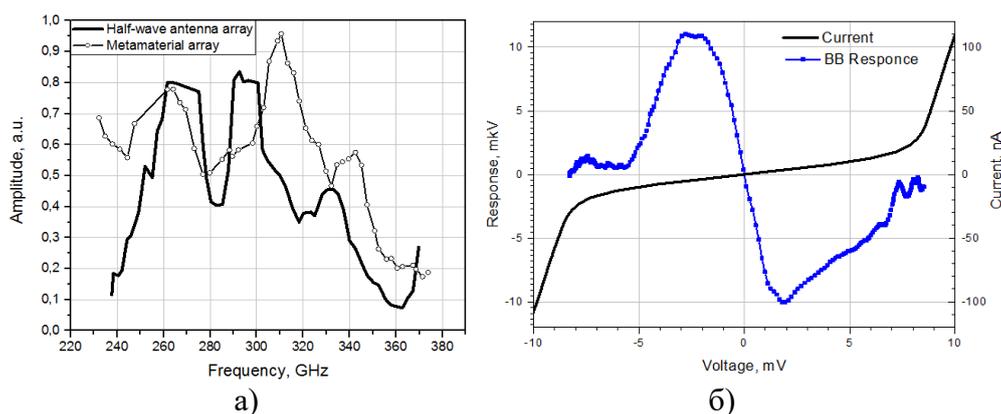
Схематично экспериментальная установка представлена на Рисунке 6. Измерения проводились в криостате растворения [3]. При измерении оптического отклика, источник излучения (Черное Тело - ЧТ) находился внутри криостата и нагревался от 2 К до 7 К. Изменяя температуру ЧТ при помощи нагревателя, измеряли отклик по напряжению (результаты измерения оптического отклика отображены на Рисунке 7). Для измерения спектрального отклика, в качестве источника излучения использовали лампу обратной волны (ЛОВ) диапазона 230 – 370 ГГц. Сигнал от ЛОВ попадает внутрь криостата через три оптических окна, ослабляясь примерно на 30 дБ. Одновременно измерялись два канала: сигнал с болометров и сигнал с пироэлектрического детектора, при помощи которого снимался сигнал ЛОВ и использовался в качестве опорного. Экспериментальные спектральные отклики показаны на Рисунке 8.а. По полученным результатам видим, что спектральный отклик метаматериала более широкополосный и более равномерный по сравнению с матрицей полуволновых кольцевых антенн. Повторяющиеся на обеих кривых неоднородности соответствуют потерям в квазиоптическом тракте, включающем окна и фильтры на трех температурных ступенях криостата. Также, дополнительно был проведен эксперимент с ЧТ, расположенным снаружи криостата при температурах ЧТ 300 К и 77 К для матриц полуволновых антенн (Рисунок 8.б).



**Рис. 6.** Схематичное изображение экспериментальной установки: а) Измерение оптического отклика; б) Измерение спектрального отклика



**Рис. 7.** Экспериментально измеренный оптический отклик: а) для матрицы полуволновых антенн с освещением со стороны антенн, б) для матрицы метаматериалов



**Рис. 8.** Измерения с источником излучения, находящимся снаружи криостата: а) Спектральный отклик матриц полуволновых антенн и метаматериалов; б) Отклик на ЧТ

### Заключение

Как основной результат работы, авторы представляют завершённую разработку высокоэффективных приемных матриц на основе SINIS болометров СубММ диапазона длин волн, характеристики которых, измеренные в лабораторных условиях, отвечают требованиям наземных обсерваторий. Следующим шагом наших разработок будет – создание полноценной приемной системы и проведение тестирований на отечественной обсерватории БТА в условиях реальной фоновой нагрузки.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 32 «Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологии» Проект "ПРИЗ" и ГЗ Института прикладной физики РАН No. 0035-2014-0021

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://www.sao.ru>
- [2] S. Mahashabde/ Frequency selective cold-electron bolometer arrays: Thesis for the degree of doctor of philosophy: 2015/ Chalmers University of Technology. Sweden, Göteborg, 2015.
- [3] V. S. Edelman, A dilution microcryostat-insert, Instrum. Exp. Tech. **52**, N2, 301-307 (2009), DOI: 10.1134/S002044120902033X.