

# Metamaterial-based array of SINIS bolometers

<sup>1</sup>Yusupov R.A., <sup>1,4</sup>Sobolev A.S., <sup>3,5</sup>Gunbina A.A., <sup>3,5</sup>Mansfeld M.A.,  
<sup>1</sup>Chekushkin A.M., <sup>3,5,6</sup>Vdovin V.F., <sup>1</sup>Tarasov M.A., <sup>2</sup>Edelman V.S.

<sup>1</sup>*V.Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS  
 125009, Russia, Moscow, Mokhovaya 11-7,  
 yusupovrenat@hitech.cplire.ru*

<sup>2</sup>*P.Kapitza Institute for Physical Problems RAS  
 117334, Russia, Moscow, Kosygina st., 2*

<sup>3</sup>*Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseeva  
 603950, Minina 24, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>4</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (State University)  
 141701, Moscow region, Dolgoprudnyy, Institutskii lane, 9.*

<sup>5</sup>*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences (IAP RAS)  
 603950, Nizhny Novgorod, Ulyanova, 46*

<sup>6</sup>*Astro Space Center of PN Lebedev Physics Institute (ASC LPI)  
 117997, Moscow, Profsoyuznaya, 84/32*

**Abstract:** *Metamaterial-based ring antennas with immersion silicon lens is developed and studied. Antennas were integrated with SINIS (Superconductor - Insulator - Normal Metal - Insulator - Superconductor) bolometers. Optical response and spectral sensitivity of such structures is measured. The optical response achieved is  $2 \cdot 10^9$  V / W at 100-300 mK and a power load 2 fW-7 pW. The spectral sensitivity is measured at 240-370 GHz range. Noise-equivalent temperature difference (NETD) is  $100 \mu\text{K} / \text{Hz}^{1/2}$  at the background level 2.7K. This result allows to measure anisotropy of the CMB.*

**Keywords:** *metamaterial, bolometers, planar antenna, antenna array, CMB, blackbody, spectral response.*

## Метаматериалы с интегрированными СИНИС болометрами

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

<sup>1</sup>*Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
 125009, Россия, Москва, Моховая улица, д.11, к.7  
 yusupovrenat@hitech.cplire.ru*

<sup>2</sup>*Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН  
 117334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2*

<sup>3</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603950, ул. Минина, д.24, Нижний Новгород, Россия

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>5</sup>Институт прикладной физики РАН  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

<sup>6</sup>Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32

**Аннотация:** Разработан и исследован метаматериал в виде матрицы кольцевых антенн, сопряженный с иммерсионной кремниевой линзой. В эксперименте были измерены оптический и спектральный отклик созданной структуры метаматериалов с интегрированными в неё болометрами на основе СИНИС структуры. При температурах образца 100 - 300 мК и мощности теплового излучения 2 фВт – 7 пВт измерен отклик на внешнее излучение, достигающий  $2 \cdot 10^9$  В/Вт. Измерена спектральная чувствительность в диапазоне 240 - 370 ГГц. Эквивалентная шуму разница температур (флуктуационная чувствительность) при уровне фона 2.7 К составляет  $100 \text{ мК/Гц}^{1/2}$ , что позволяет измерять анизотропию реликтового излучения.

**Ключевые слова:** метаматериал, болометры, планарная антенна, матрица антенн, реликтовое излучение, черное тело, спектральный отклик.

## 1. Введение

В настоящее время для различных радиоастрономических задач, в частности, для проектов, направленных на исследование реликтового излучения Вселенной, необходимы приемные системы субтерагерцового диапазона частот с противоречивой комбинацией требований: предельно высокая чувствительность, наряду с широким динамическим диапазоном, работоспособные при высокой фоновой мощности [1]. Данным критериям удовлетворяют матрицы приемных элементов. При согласовании матрицы планарных антенн с внешним излучением можно применять два подхода: матрица планарных антенн размером порядка половины длины волны каждая, либо существенно меньшие антенны в конфигурации метаматериала или распределенного абсорбера. В последнем случае удастся сделать матрицу более широкополосной и компактной, что позволяет поместить её на выходе одномодового рупора, либо в фокусе квазиэллиптической иммерсионной линзы. В качестве чувствительных элементов использованы болометры структуры Сверхпроводник – Изолятор – Нормальный металл – Изолятор – Сверхпроводник (СИНИС). Разработаны и изготовлены такие метаматериалы для диапазона 350 ГГц и испытаны с сапфировой линзой.

## 2. Матрица метаматериалов

Метаматериал в виде периодической матрицы проводящих элементов может эффективно взаимодействовать с электромагнитным излучением, когда размеры элементов и их период существенно меньше длины волны. Классическим примером таких структур является разрезанный кольцевой резонатор[2]. Для таких структур нет ограничения на минимальный размер порядка половины длины волны как в случае замкнутых кольцевых резонаторов. Качественно такой эффект аналогичен влиянию «укорачивающей» емкости для дипольной антенны. Объединяя такие элементы в плотную периодическую матрицу с сильным взаимодействием между элементами, удастся получить более эффективное взаимодействие с излучением. Ранее мы исследовали матрицы 5x5 стандартных кольцевых антенн диапазона 350 ГГц с внешним диаметром антенны 300 мкм, периодом 475 мкм, занимающие площадь 2200x2200 мкм [3-5]. В образцах типа метаматериала внешний диаметр колечка составлял 60 мкм, период 70 мкм, площадь матрицы 9x9 элементов составляет 621x621 мкм. В каждую планарную антенну (как для стандартного варианта, так и для метаматериалов) помещены два болометра на основе СИНИС структуры. Таким образом, на площади 0.38 мм<sup>2</sup> расположено 162 болометра, а на 4.8 мм<sup>2</sup> расположено 50 болометров, т.е. при одинаковой мощности насыщения на один болометр для матрицы метаматериалов допустимая мощность на единицу площади будет в 41 раз больше. При этом пиксели матрицы изображения можно располагать существенно ближе друг к другу.

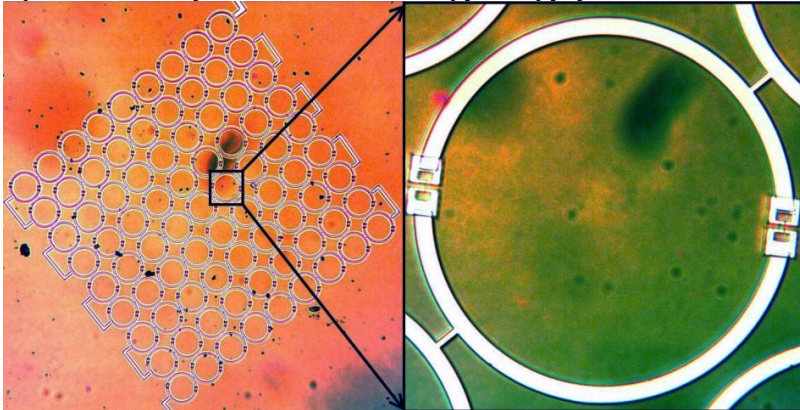


Рис. 1. Изображение матрицы изготовленных метаматериалов полученное в оптическом микроскопе.

Fig. 1. Metamaterial-based antennas matrix in an optical microscope

### 3. Эксперимент

Измерения тестовых образцов проводили в криостате при рабочей температуре 100 и 300 мК. Проводили два типа измерений: исследовали оптический отклик приемной структуры на различную температуру черного тела (ЧТ) и спектральный отклик.

Исследуемые образцы в держателе с кремниевой линзой исследовали в сорбционном криостате на гелии-3 при температуре 280 мК, а также в криостате растворения при температурах 100-300 мК. ЧТ, в виде напыленной пленки нихрома на кремниевой подложке (в поздних вариантах на подложке сапфира), расположено внутри криостата. Изменяя температуру ЧТ при помощи нагревателя от 2 до 7 К, измеряли отклик по напряжению на частоте 345 ГГц (оптический отклик). Мощность приходящаяся на структуру с учетом распределения Планка составила от 2 фВт-7 пВт. Измеренные кривые отклика приведены на рисунке 2. Полезную информацию о флуктуационной чувствительности можно получить из зависимости отклика от температуры излучателя. В нашем случае мы получаем  $dV(T=2.7K)/dT = 135$  мкВ/К. При шуме на выходе  $10$  нВ/Гц<sup>1/2</sup> эквивалентная шуму разность температур составит  $100$  мкК/Гц<sup>1/2</sup>. Если подавить паразитный фоновый сигнал и снизить электронную температуру до  $0.1$  К, то можно улучшить чувствительность еще на порядок.

При измерении спектрального отклика в качестве источника использовали лампу обратной волны (ЛОВ). Сигнал от ЛОВ, проходя через окна криостата, поступает на исследуемый образец. Измеренные спектральные отклики системы представлены на рисунке 3. Видно, что спектральный отклик метаматериала более широкий и более равномерный по сравнению с матрицей стандартных кольцевых антенн, а повторяющиеся на обеих кривых неоднородности соответствуют потерям в квазиоптическом тракте, включающем окна и фильтры на трех температурных ступенях криостата. 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.

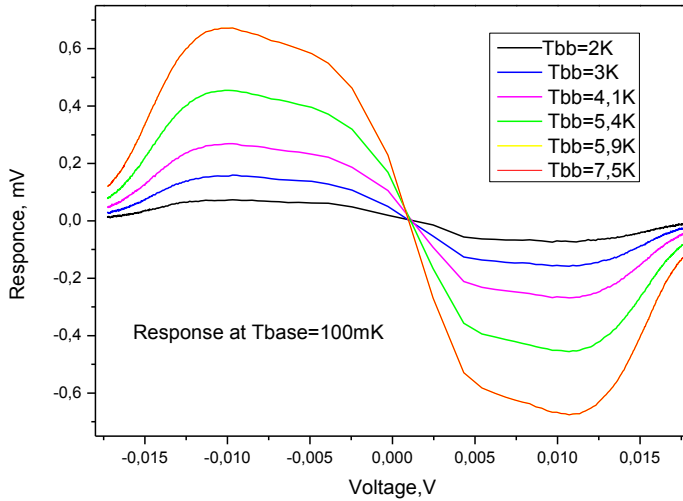


Рис. 2. Экспериментальные результаты: Отклик по напряжению на излучение черного тела при температурах от 2 К до 7.5 К.

Fig.2. Voltage response to blackbody radiation at temperatures from 2 K to 7.5 K.

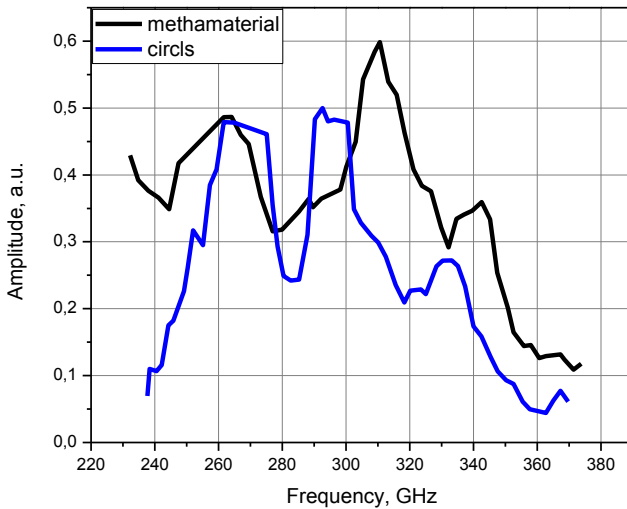


Рис. 3. Спектральный отклик структуры с метаматериалами (черная кривая) и стандартных образцов с размерами антенны порядка длины волны (синяя кривая).

Fig. 3. The spectral responses: metamaterial-based structure (black curve) and standard sample with half-wave ring antennas (blue curve)

## 4. Заключение

Разработаны, изготовлены и измерены матрицы болометров в конфигурации метаматериалов. Измерен отклик по напряжению на частоте 345 ГГц и спектральный отклик в диапазоне 240 – 370 ГГц. Экспериментально получена вольтваттная чувствительность  $2 \cdot 10^9$  В/Вт, флуктуационная чувствительность  $100 \text{ мкК/Гц}^{1/2}$ , полоса пропускания более 100 ГГц.

### Источники финансирования и выражение признательности

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

### Список литературы

- [1] Nati F., Ade P., Boscaleri A., et al., The OLIMPO experiment // *New Astronomy Reviews*. 2007. Т. 51. С. 385-389, Doi:10.1016/j.newar.2006.11.066.
- [2] Marques R., Mesa F., Martel J., F. Medina J. Comparative analysis of edge- and broadside- coupled split ring resonators for metamaterial design - theory and experiments // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2003. Т. 51, № 10. DOI:10.1109/TAP.2003.817562
- [3] Mahashabde S., Sobolev A., Bengtsson A., et al, A frequency selective surface based focal plane receiver for the OLIMPO balloon-borne telescope // *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technolgy*. 2015. Т. 5. №1. С. 145-152. doi: 10.1109/TTHZ.2014.2362010.
- [4] Mahashabde S., Sobolev A., Tarasov M., Tsydynzhapov G., Kuzmin L., Planar frequency selective bolometric array at 350 GHz // *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technolgy*. 2015. Т. 5. № 1. С. 37-43. doi: 10.1109/TTHZ.2014.2377247.
- [5] Mahashabde S., Tarasov M., Salatino M., et al., A distributed-absorber cold-electron bo-lometer single pixel at 95 GHz // *Appl. Phys. Lett.* 2015. Т. 107. 092602. doi: 10.1063/1.4929604.

### References

- [1] Nati F., Ade P., Boscaleri A., et al., The OLIMPO experiment, *New Astronomy Reviews* 51 (2007) 385-389, doi:10.1016/j.newar.2006.11.066.
- [2] R. Marques, F. Mesa, J. Martel, F. Medina, Comparative analysis of edge- and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design - theory and experiments, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume: 51, Issue: 10, 2003, DOI:10.1109/TAP.2003.817562
- [3] Mahashabde S., Sobolev A., Bengtsson A., et al, A frequency selective surface based fo-cal 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.
- [4] Mahashabde S., Sobolev A., Tarasov M., Tsydynzhapov G., Kuzmin L., 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.
- [5] Mahashabde S., Tarasov M., Salatino M., et al., A distributed-absorber cold-electron bo-lometer single pixel at 95 GHz, *Appl. Phys. Lett.*, 107, 092602 (2015), doi:10.1063/1.4929604.

### Acknowledgements

This work was supported by the Russian Academy of Sciences, Basic Research Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences No. 32 "Nanostructures: Physics, Chemistry, Biology, Technology Basics", project "PRIZE".