УДК 538.9

# ИССЛЕДОВАНИЕ УЗКОПОЛОСНОЙ ПРИЁМНОЙ СИСТЕМЫ БОЛОМЕТРОВ НА ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ДЛЯ КАНАЛОВ 220 И 240 ГГц С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА УВСО

Л. С. Ревин <sup>1,2</sup>\*, Д. А. Пиманов <sup>1</sup>, А. В. Благодаткин <sup>1</sup>, А. В. Гордеева <sup>1</sup>, В. О. Зброжек <sup>1</sup>, Д. В. Мастеров <sup>1,2</sup>, А. Е. Парафин <sup>2</sup>, С. А. Павлов <sup>2</sup>, А. Л. Панкратов <sup>1,2</sup>, И. В. Ракуть <sup>1</sup>, И. А. Филькин <sup>1</sup>, А. В. Чигинев <sup>1,2</sup>, Л. С. Кузьмин <sup>1,3</sup>, С. Маси <sup>4</sup>, П. де Бернардис <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева;
<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия
<sup>3</sup> Технический университет Чалмерса, г. Гётеборг, Швеция
<sup>4</sup> Университет ла Сапиенца, г. Рим, Италия

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования резонансных свойств одиночной ячейки приёмной системы на основе болометров на холодных электронах (БХЭ) с двухщелевой антенной и изогнутыми копланарными линиями, предназначенной для приёма сигнала в диапазоне 220÷240 ГГц с шириной полосы 5%. Измерения резонансных свойств БХЭ, расположенного на плите криостата с температурой 0,3 К, проведены с помощью генератора на основе высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) ҮВСО, расположенного внутри этого же криостата на плите с температурой 4 К, что позволило получить гладкие амплитудно-частотные характеристики.

### ВВЕДЕНИЕ

Задачей, на решение которой направлена данная работа, является создание болометрической системы с антенной и фильтром на чипе для применения в составе сверхвысокочувствительных стратостатных приёмных комплексов, разрабатываемых и планируемых к запуску для исследований реликтового излучения, которые важны и актуальны в современной астрономии и космологии. Large Scale Polarization Explorer (LSPE) [1] — это эксперимент Итальянского космического агентства для изучения картины поляризации В-моды реликтового излучения. В данном эксперименте предполагается вести наблюдение на центральной частоте 145  $\Gamma\Gamma$ ц с шириной полосы в  $30\,\%$ от неё, а также на частотах 220 и 240 ГГц (с шириной полосы в 5% от них). Частота 145 ГГц является основной для проведения измерений реликтового излучения. Частоты 220 и 240 ГГц относятся к вспомогательным частотным каналам. Они необходимы для оценки влияния излучения космической пыли на результат измерений реликтового излучения [2]. Основной сложностью данного проекта является создание двухканальной системы на частотах 220 и 240 ГГц с малой шириной полосы, 5% от центральной частоты на уровне –3 дБ. В качестве чувствительных датчиков излучения предлагается использование болометров на холодных электронах (БХЭ) [3–5], где для создания фильтров, обеспечивающих узкую полосу, используются резонансные свойства щелевой антенны и копланарных линий. Данные детекторы обладают рядом преимуществ: широким динамическим диапазоном ввиду наличия эффективного электронного охлаждения [5 ,6], высокой чувствительностью к принимаемому полезному сигналу [6] и нечувствительностью к космическим лучам благодаря малому объёму абсорбера и слабой связи его электронной и фононной подсистем при низких температурах [7]. Кроме того, БХЭ имеют компактный размер

<sup>\*</sup> rls@ipmras.ru

(порядка нескольких микрометров), что позволяет разместить их в щели антенны или копланарной линии, а также интегрировать фильтры на чипе за счёт использования ёмкостей туннельных SIN-контактов и реактансов антенн и копланарных линий.

#### 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОДЕЛЬ

Прототипом описываемой в статье планарной двухщелевой резонансной антенны с изогнутыми копланарными линиями является планарная антенная система [8–10]. Данная система представляет собой комбинацию вложенных двухщелевых антенн, предназначенную для приёма сигналов на разных частотах и обладающую чувствительностью к поляризации принимаемой волны. Основная функция копланарной линии — согласование импедансов между низкоомным болометром и высокоомной щелевой антенной. Достоинством этого прототипа является узкая полоса рабочих частот одного частотного канала, что является одним из ключевых требований к антенной системе для вспомогательных каналов проекта LSPE. К недостаткам рассматриваемого варианта приёмной системы относится то, что каждый частотный канал для одной поляризации двухщелевой антенны нагружен на один БХЭ, что при большой оптической нагрузке приводит к переходу БХЭ в режим насыщения.

Предлагаемая антенная система способна работать с большей оптической нагрузкой до перехода БХЭ в режим насыщения, что является актуальным для стратостатных радиотелескопов. Такой результат достигается объединением нескольких приёмных ячеек в матрицу, элементы которой связаны между собой по постоянному току либо последовательно, либо параллельно в зависимости от предполагаемой к использованию системы считывания. В антенной системе для LSPE будет применён двунаправленный рупор с центральным сужением [11, 12]. С помощью этого рупора предполагается формировать диаграмму направленности приёмной системы, а также осуществлять частотную фильтрацию принимаемого сигнала. При этом роль фильтра низких частот играет центральное сужение, отсекающее сигнал на частотах ниже критической частоты круглого волновода заданного диаметра. Фильтр высоких частот предполагается установить в раскрыве рупора, обращённом к источнику излучения. Матрица планарных антенн, описанная в данной работе, будет размещена в противоположном раскрыве рупора.

Важнейшим преимуществом двухщелевой антенны с изогнутыми копланарными линиями является то, что каждая система щелевых антенн предназначена для работы на одной заданной частоте. Это позволяет подстраивать каждую систему антенн независимо, не меняя при этом характеристик элементов антенны, ответственных за работу на соседних частотах. Ещё одним практическим преимуществом предложенной антенны является то, что соединение щелевых антенн и детекторов с помощью копланарных линий может быть осуществлено без пересечений линий, что упростит и ускорит технологический процесс изготовления такой системы антенн и детекторов.

Дизайн антенны для одной частоты показан на рис. 1. Антенна состоит из двух резонансных щелевых антенн, соединённых изогнутыми копланарными линиями с БХЭ. Длина копланарных линий была выбрана исходя из условия получения необходимой рабочей частоты. Расстояние между щелевыми антеннами было выбрано так, чтобы обеспечить необходимую полосу пропускания. Длина щелевых антенн подбирается приближённо равной  $\lambda/2$ , т. е.- половине длины волны на рабочей частоте. Сопряжение щелевой антенны и копланарной линии осуществляется с помощью отрезка копланарной линии, расположенного посередине щелевой антенны и оканчивающегося сосредоточенной ёмкостью. Также копланарная линия проходит непосредственно в щелевой антенне. К сосредоточенным ёмкостям подключаются проводники, обеспечивающие смещение БХЭ по постоянному току или напряжению и соединяющие одиночные антенные ячейки в по-





Рис. 1. Дизайн антенной системы, выполненный в пакете электромагнитного моделирования: 1 щели, 2 — принимающий порт (болометр), 3 — металлический слой, 4 — диэлектрик

Рис. 2. Эквивалентная схема двухщелевой антенны, соединённой с БХЭ: І — БХЭ, ІІ — щелевые антенны и копланарные линии

следовательный или параллельный массив соответственно.

Численное моделирование одиночной антенной ячейки проведено в программном пакете CST Microwave Studio. Эквивалентная схема двухщелевой антенны, соединённой с БХЭ, показана на рис. 2. Мы проводим расчёт в частотной области, чтобы смоделировать частотные характеристики одиночной ячейки. Сначала рассчитываются электродинамические S-параметры элементарной ячейки, а затем получаются Z-параметры при постобработке. Чтобы смоделировать БХЭ, мы используем RC-цепочку, где  $R_{\rm abs}$  — сопротивление абсорбера,  $C_{\rm SIN}$  — ёмкость болометрической системы. Используя Z-параметры, вычисляются значения  $R_{\rm abs}$  и  $C_{\rm SIN}$  с использованием соотношения  $C_{\text{SIN}} = [2\pi f_0 \,\text{Im}Z(f_0)]^{-1}, R_{\text{abs}} = \text{Re}Z(f_0),$  где  $Z(f_0)$  — диагональная составляющая Z-матрицы на рабочей частоте  $f_0$ , рассчитанная при решении электродинамической задачи. Здесь значения C<sub>SIN</sub> выбраны так, чтобы общие ёмкости C<sub>SIN</sub> и C<sub>e</sub> образовывали последовательный резонанс с индуктивностью L<sub>e</sub> на рабочих частотах 220 и 240 ГГц соответственно. Этот метод подбора параметров применим только тогда, когда  ${\rm Im}Z(f_0) > 0$  и  $|S_{{\rm mn}}(f_0)| \ll 1$ , где  $S_{{\rm mn}}$  – недиагональные компоненты матрицы S-параметров, которая рассчитана при решении электродинамической задачи. Данные соотношения приводят к резонансу на рабочей частоте  $f_0$ . При численном моделировании учитывается влияние проводников постоянного тока на электродинамику антенны. Они моделируются сосредоточенными ёмкостями, которые соединяются между копланарными линиями и заземлением. Значение этих ёмкостей, использованное в моделировании, равно 350 фФ.

Для настройки антенны на две и более частоты необходимо добавление новых элементов системы, аналогичных одиночной ячейке, но имеющих иную ёмкость SIN-перехода в БХЭ или иную длину центральной копланарной линии. В ходе моделирования проверялось влияние изменения данных параметров системы на рабочую частоту. Полученные теоретические результаты приведены на рис. 3.



Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики приёмных систем БХЭ с двухщелевой антенной, полученные в результате численного моделирования (α — коэффициент поглощения; на графике приведены значения длин копланарных линий и ёмкостей C<sub>SIN</sub>)

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Образцы БХЭ с антенными системами были изготовлены в Техническом ниверситете Чалмерса. Подложка выполнена из кремния, диэлектрический слой — из SiO<sub>2</sub>. На рис. 4 приведена фотография фрагмента чипа, представляющего собой несколько ячеек с исследуемыми структурами БХЭ с двухщелевой антенной и копланарными линиями различной длины.

Для исследования резонансных свойств БХЭ использовался охлаждаемый генератор на основе высокотемпературных джозефсоновских переходов, подобно тому, как это было сделано авторами [13]. Образцы распределённых джозефсоновских переходов на основе плёнок YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> были изготовлены с помощью магнетронного напыления методом задающей маски [14, 15]. Предварительно на подложку наносилась задающая маска, и при дальнейшем напылении сверхпроводящей плёнки в модифицированных областях происходил рост изолятора, а в немодифицированных — сверхпроводящей плёнки. Таким образом формировался рисунок планарной структуры сверхпроводящего генератора на подложке. При этом на границе бикристалла фианита (циркония, частично стабилизированного иттрием,  $Zr_{1-x}Y_xO_2$ ) сверхпроводящая плёнка не росла, в результате чего формировалась структура сверхпроводник—слабая связь—сверхпроводник, являющаяся джозефсоновским переходом. При пропускании через такую структуру постоянного тока возникает переменное напряжение (переменное электромагнитное поле), причём частота генерации связана джозефсоновским соотношением со средним напряжением (рабочим током) в переходе и находится в диапазоне 50÷800 ГГц. Таким образом, джозефсоновские переходы являются эффективными генераторами для исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) болометрических и детекторных систем.

На рис. 5 представлены фотография и схема эксперимента. Чип генератора состоял из нескольких джозефсоновских переходов, интегрированных с дипольными антеннами на различные диапазоны частот. Подложка с образцом была установлена на держатель с кремниевой линзой, рас-

Л. С. Ревин, Д. А. Пиманов, А. В. Благодаткин и др.

626



Рис. 4. Фотография чипа с несколькими структурами БХЭ и различной длиной копланарных линий (от щели до болометра)



Рис. 5. Фотография экспериментальной установки (*a*); схематическое изображение эксперимента (*б*): 1 — катушка, 2 — YBCO-генератор с линзой, 3 — БХЭ с рупором, 4 — экран, 5 — хладопровод

положенной на плите (с температурой 4 K) криостата. Управляющее магнитное поле, перпендикулярное границе джозефсоновского перехода, создавалось током, протекающим через катушку



Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики приёмных систем БХЭ с двухщелевой антенной и копланарными линиями различной длины L: L = 220 мкм (символы **П**), 270 мкм ( $\blacklozenge$ ), 200 мкм ( $\blacklozenge$ )

из медной проволоки. Болометрическая система со сверхразмерным рупором на обратной стороне кремниевой подложки была помещена на плиту криостата с температурой 300 мК. Поглощающий экран для БХЭ использовался, чтобы избежать переотражений сигнала генератора.

Изменяя ток через джозефсоновский контакт, мы регистрировали болометрический отклик (dV<sub>CEB</sub>), а также напряжение  $V_{\rm YBCO}$  на генераторе YBCO (частоту джозефсоновского излучения  $f = 2eV_{\rm YBCO}/\hbar$ , где e — элементарный заряд,  $\hbar$  — постоянная Планка). Генератор был прокалиброван независимо широкополосным приёмником, и было проведено сравнение с откликом от лампы обратной волны. Используя связь частоты и напряжения на генераторе (джозефсоновй системы.

ское соотношение), мы получили АЧХ приёмной системы. На рис.6 представлены результаты экспериментального исследования резонансных свойств

на рис. 6 представлены результаты экспериментального исследования резонансных своиств приёмных систем БХЭ с двухщелевой антенной и копланарными линиями различной длины L. Измерения проводились с малым шагом по частоте. Видно, что все характеристики имеют чётко выраженный пик на разных частотах с шириной около 15 ГГц. Полученная полоса 6% практически соответствует требованиям для приёмной системы эксперимента LSPE, в то время как центральные частоты сдвинуты вверх от диапазона 220÷240 ГГц и в некоторых случаях существенно отличаются от расчётных значений. Такое отличие вызвано конфигурацией копланарных линий, а также влиянием подводящих проводов, обеспечивающих смещение БХЭ по постоянному току и не учтённых в моделировании. В последующих дизайнах будет изменена разводка подводящих проводов и копланарных линий для корректировки центральных частот каналов. Следует отметить, что благодаря использованию источника на основе ВТСП, расположенного рядом с рупором приёмной системы, удалось получить плавные АЧХ, чего крайне сложно добиться при измерениях с помощью внешнего источника на основе лампы обратной волны, расположенного снаружи криостата [9], т. к. в этом случае из-за переотражений сигнала между окнами и экранами криостата возникает изрезанная АЧХ.

#### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан прототип одиночной приёмной ячейки в виде двухщелевой узкополосной антенны для использования в качестве элемента антенного массива для эксперимента LSPE. На данном этапе отрабатывались технологические вопросы изготовления данного вида антенн, проверялось влияние длины копланарных линий и ёмкостей SIN-переходов на рабочую частоту приёмной системы. Достигнуто удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных параметров.

Двухщелевая антенна с изогнутыми копланарными линиями представляет собой уникальный тип планарной антенны, который благодаря компактности, гибкости подстройки, удобству и простоте изготовления, а также избирательности частотных характеристик может быть использован для широкого круга задач, в том числе для будущих космических миссий и исследования реликтового излучения.

Л. С. Ревин, Д. А. Пиманов, А. В. Благодаткин и др.

628

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты госзадания НГТУ 16.2562.2017/ПЧ и ИПФ РАН 0035–2014–0205 и 0035–2014–0206).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Aiola S., Amico G., Battaglia P., et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8446. Art. no. 84467A.
- 2. Adam R., Ade P. A. R., Adhanim R., et al. // Astron. Astrophys. 2016. V. 586. P. A133.
- Kuzmin L. S. // International Workshop On Superconducting Nano-Electronics Devices, May 2001. Boston: Springer, 2002. P. 145.
- 4. Kuzmin L. S. // J. Phys. 2008. V. 97. Art. no. 012310.
- Tarasov M. A., Kuzmin L. S., Edelman V. S., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21. P. 3635.
- 6. Kuzmin L. S., Pankratov A. L., Gordeeva A. V., et al. // Comm. Phys. 2019. V.2, No. 104. P.1.
- 7. Salatino M., de Bernardis P., Kuzmin L. S., et al. // J. Low Temp. Phys. 2014. V. 176. P. 323.
- Kuzmin L. S., Chiginev A. V., Matrozova E. A., et al. // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2016. V. 26. Art. no. 2300206.
- Kuzmin L. S., Blagodatkin A. V., Mukhin A. S., et al. // Supercon. Sci. Technol. 2019. V. 32. Art. no. 035009.
- 10. Mukhin A. S., Kuzmin L. S., Chiginev A. V., et al. // AIP Advances. 2019. V. 9. Art. no. 015321.
- 11. Legg S., Lamagna L., Coppi G., et al. // Proc. SPIE. 2016. V. 9914. Art. no. 991414-1.
- Kuzmin L. S., Pimanov D. A., Gordeeva A. V., et al. // Supercon. Sci. Technol. 2019. V. 32. Art. no. 084005.
- 13. Stepantsov E., Tarasov M., Kalabukhov A., et al. // J. Appl. Phys. 2004. V. 96. P. 3 357.
- Masterov D. V., Parafin A. E., Revin L. S., et al. // Supercon. Sci. Technol. 2017. V.30. Art. no. 025007.
- 15. Revin L. S., Pankratov A. L., Masterov D. V., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercon. 2018. V. 28. Art. no. 1100505.

Поступила в редакцию 24 апреля 2019 г.; принята в печать 5 июля 2019 г.

## A STUDY OF A NARROW-BAND RECEIVING SYSTEM OF BOLOMETERS ON COLD ELECTRONS FOR THE 220 AND 240 GHz CHANNELS USING AN OSCILLATOR ON THE BASIS OF THE HIGH-TEMPERATURE YBCO SUPERCONDUCTOR

L. S. Revin, D. A. Pimanov, A. V. Blagodatkin, A. V. Gordeeva, V. O. Zbrozhek, D. V. Masterov, A. E. Parafin, S. A. Pavlov, A. L. Pankratov, I. V. Rakut', I. A. Filkin, A. V. Chiginev, L. S. Kuzmin, S. Masi, and P. de Bernardis

We present the results of theoretical and experimental studies of the resonant properties of a single cell of a receiving system based on cold-electron bolometers (CEBs) with a double-slot antenna and curved coplanar lines, which is intended for receiving a signal in the range 220–240 GHz with a bandwidth of 5%. The resonant properties of a CEB, which was located on the cryostat plate with a temperature of 0.3 K, were measured using an oscillator on the basis of the high-temperature superconductor (HTSC) of yttrium barium copper oxide (YBCO), which was located inside the same cryostat on a plate with a temperature of 4 K, which allowed one to obtain smooth amplitude-frequency characteristics.