

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 520.8.056

СОГЛАСОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С МАТРИЦЕЙ ПЛАНАРНЫХ АНТЕНН С СИНИС-БОЛОМЕТРАМИ В ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ ПОЛОСТИ¹

© 2020 г. М. А. Тарасов^a, А. М. Чекушкин^{a, *}, Р. А. Юсупов^a, А. А. Гунбина^{b, c}, В. С. Эдельман^d

^aИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

^bНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603950 Российская Федерация

^cИнститут прикладной физики РАН,
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950 Российская Федерация

^dИнститут физических проблем им. П.Л. Капицы РАН,
ул. Косыгина, 2, Москва, 119334 Российская Федерация

*E-mail: chekushkin@hitech.cplire.ru

Поступила в редакцию 11.07.2019 г.

После доработки 11.07.2019 г.

Принята к публикации 19.07.2019 г.

Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы приемные матрицы планарных кольцевых антенн диапазона 345 ГГц с интегрированными болометрами структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС). Для повышения эффективности поглощения согласование сигнала источника с матрицей осуществлялось при помощи пары встречных рупоров с контррефлектором. Исследована эффективность приемной структуры в зависимости от направления облучения: через подложку и со стороны антенны, а также в зависимости от толщины подложки. Описана методика нормировки принимаемого сигнала с использованием опорного канала снаружи и внутри криостата. Лучшие результаты были получены при освещении матрицы со стороны антенны при толщине подложки, эквивалентной четверти длины волны в диэлектрике и с запылением обратной стороны пленкой золота (контррефлектор). Полоса эффективного согласования в основном диапазоне составила более 50 ГГц, вольт-ваттная чувствительность достигает 10^9 В/Вт.

DOI: 10.31857/S0033849420010064

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается астрономия в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. Исследования в этой области направлены на изучение реликтового излучения, “холодной” Вселенной, процессов звездообразования и многое другое. Для таких задач создаются высокогорные наземные, баллонные и космические обсерватории, например, ALMA, Olimpo, Millimetron и др. Детектирование сигнала, собираемого зеркалом телескопа, осуществляется высокочувствительными детекторами. При создании приемных систем для различных обсерваторий одной из ключевых задач является согласование сигнала, приходящего с зеркала телескопа, с детектором. В качестве согласующих устройств могут выступать различные конструкции зеркал, рупоров и линзовых систем. В данной статье представлено экспе-

риментальное исследование согласования приемной матрицы планарных антенн с болометрами структуры сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник (СИНИС) с внешним излучением при помощи пары встречных рупоров с контррефлектором.

1. ПАРА ВСТРЕЧНЫХ РУПОРОВ С КОНТРЕФЛЕКТОРОМ В КАЧЕСТВЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ ПОЛОСТИ

Конструкция в виде пары встречных рупоров применяется для согласования приемника с телескопом в целом ряде радиоастрономических инструментов, например, таких как Европейская космическая обсерватория Планк (проект ESA Planck), итальянский баллонный телескоп OLIMPO и др. Как отмечалось в классическом обзоре [1], поглощительная способность большинства болометров по сравнению с черным телом меньше единицы и для повышения эффективности поглощения

¹ Работа удостоена премии на 15-м конкурсе молодых ученых имени Ивана Анисимкина.

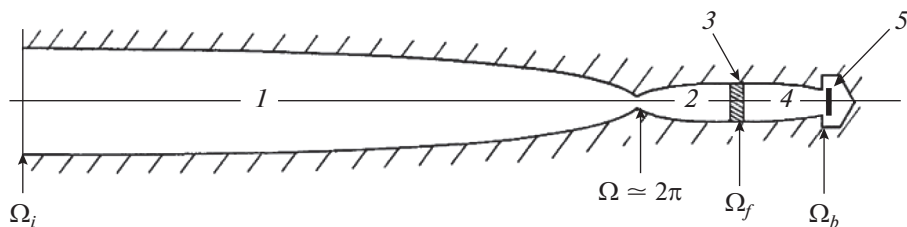


Рис. 1. Конструкция оптической системы: 1 – концентратор Винстона, определяющий пропускную способность $A\Omega$, 2 – второй концентратор, 3 – облучающий фильтр, 4 – третий конус, 5 – непосредственно облучающий болометр в третьей полости.

принимаемого излучения приходится использовать интегрирующую полость. В такой полости присутствует множество стоячих волн, что делает очень сложным точный численный анализ подобной структуры, в связи с чем большая роль приобретает экспериментальные исследования, результаты которых представлены в данной работе. Один из подходов в рамках модели случайных фотонов был предложен в [2] для полостей произвольной формы размерами много больше длины волны. Предполагается, что фотон может быть поглощен несколькими путями. При произвольном распределении фотонов поглощение пропорционально эффективной площади черного тела, равной произведению реальной площади на поглощающую способность (степень черноты). Предполагается, что эффективная площадь черного тела абсорбера больше площади всех отверстий и эффективной черноты стенок. С этой точки зрения использование концентратора света соответствует уменьшению относительной площади согласующего отверстия. Согласно [3] телесный угол, под которым болометр видит свое отражение в стенках полости, должен быть меньше телесного угла, под которым он видит источник. Если полость освещается частично коллимированным пучком, то детектор следует наклонить, чтобы отраженный луч не вернулся наружу, а остался в полости и был поглощен после многократных отражений. Классическая конструкция такой системы была разработана в [4] (рис. 1).

Еще одна конструкция рупоров с интегрирующей полостью (рис. 2) была реализована для теле-

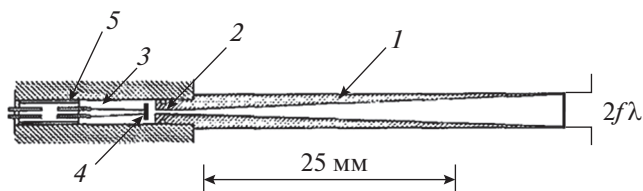


Рис. 2. Конструкция рупоров с интегрирующей полостью: 1 – рупор в виде прямого конуса, 2 – круглый волновод, 3 – интегрирующая полость для NTD-Ge болометров (4) SCUBA.

скопа JCMT и болометра SCUBA [5], в ней применяется прямой рупор и матрица из 91 болометра для диапазонов 438 и 855 мкм. Здесь необходимость применения длинных проводов приводит к увеличению области за болометром больше желательного для высокой оптической эффективности.

Одной из простейших конструкций интегрирующей полости является цилиндрическая (рис. 3) [6], разработанная и изготовленная в Лаборатории микрорайонных устройств Калифорнийского технологического университета (Jet Propulsion Lab Micro Devices Laboratory). Коэффициент поглощения в такой камере достигает 95% при перекрестных помехах между пикселями менее 1% и полосой пропускания $\Delta f/f = 0.33$. Сопротивление на квадрат в абсорбере может варьироваться в диапазоне 150...700 Ом на квадрат.

Можно еще упомянуть реализацию встречных рифленых рупоров для центральной частоты 90 ГГц для высокочастотного инструмента (High Frequency Instrument, HFI) COBRAS/SAMBA (позднее – Планк) [7], где полоса пропускания составила 25%, длина цилиндрической части узкого одномодового круглого волновода 2λ , радиус 0.6λ .

Детальный теоретический анализ работы встречных рупоров проведен в работе [8], где отмечено, что резкий скачок импеданса на краю

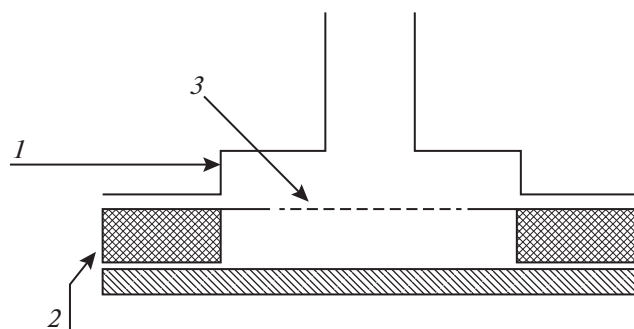


Рис. 3. Схема болометрической камеры 1 диапазона 214 ГГц, включающая кремниевую подложку 2 толщиной 400 мкм, протравленную до металлизации (поглотителя 3).

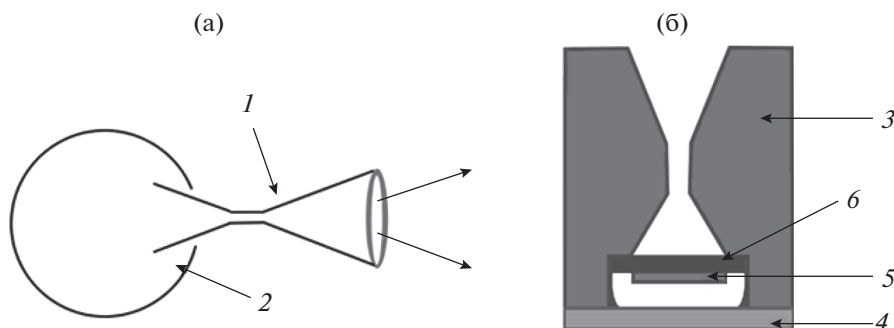


Рис. 4. Эскизы: а – рупорного согласующего устройства 1 НФИ с интегрирующей полостью 2 космического телескопа PLANCK Surveyor Satellite; б – нашей конструкции встречных рупоров 3 и плоского контррефлектора 4 с матрицей планарных антенн 5 с интегрированными СИНИС-боллометрами на кремниевой подложке 6.

волновода и интегрирующей полости приводит к отражениям и снижает эффективность согласования с широкополосным источником. Применение второго плавного рупора существенно улучшает равномерность спектральной характеристики. Такие рупоры используются в каналах 550 и 850 ГГц НФИ космического телескопа PLANCK Surveyor Satellite. Эскиз этой конструкции приведен на рис. 4а, эскиз нашей конструкции со встречными рупорами и контррефлектором – на рис. 4б. Расчет диаграммы направленности в дальней зоне сводится к суммированию в квадратурах, т.е. к сложению мощностей всех незатухающих мод. Численным расчетом показано, что форма расширяющихся рупоров как квадрат синуса позволяет получить наиболее узкую диаграмму направленности такого одномодового рупора $\pm 5^\circ$. Сравнимый результат можно получить для существенно более длинного прямого конического рупора.

Таким образом, интегрирующая сфера или полость является простым решением проблемы эффективного согласования в случае фокусировки сигнала источника на детектор. Главные причины применения интегрирующей полости следующие:

- потребность создания однородной диаграммы направленности (ДН) для детектора с неоднородной ДН;
- необходимость обеспечения изотропного приема даже детекторами с избирательными направлениями поглощения;
- уменьшение поляризационных эффектов из-за размера/формы детектора;
- возможность использования в предложенной структуре всей диаграммы направленности детектора, включая боковые и задние лепестки.

Интегрирующая сфера представляет собой отражающую поверхность, внутри которой детектор помещается так, чтобы сигнал, приходящий в полость, многократно отражался от стенок полости, и в итоге большая часть приходящего сигнала

поглощалась детектором. Таким образом, интегрирующая полость повышает эффективность детектирования сигнала за счет мультипликации излучения, попадающего в полость. Тем самым улучшается согласование приходящего излучения с детектором. Одной из характеристик интегрирующей полости является коэффициент множителя сферы (M), который связан с коэффициентом отражения от стенок (ρ_ω) и отношением входного окна сферы к ее общей площади следующими соотношениями:

$$M = \rho_\omega / [1 - \rho_\omega(1 - f)],$$

где $f = A_\omega / A_s$. Для $\rho_\omega = 1$, $M = A_s / A_\omega$. На практике площадь входного окна составляет около 5% от общей площади сферы, отражение от стенок 95...99% и результирующий коэффициент множителя сферы может быть от 10 до 50. Плотность потока внутри интегрирующей полости в M раз больше по сравнению с прямым облучением.

В нашем случае приемная матрица согласуется с внешним сигналом с помощью конструкции встречных рупоров, соединенных круглым волноводом с диаметром 0.9 мм и длиной 2 мм, и контррефлектора (рис. 5), представляющей собой некий эквивалент интегрирующей полости. Сигнал от источника попадает в рупор, многократно отражается от его стенок и контррефлектора и поглощается приемной матрицей на основе болометров структуры СИНИС. Наличие металлических стенок можно рассматривать как зеркала, в которых отражается изображение нашей матрицы болометров (схематическое изображение см. на рис. 5а).

2. МАТРИЦЫ ПЛАНАРНЫХ АНТЕНН С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ СИНИС-БОЛОМЕТРАМИ

СИНИС-болометр представляет собой тонкую пленку абсорбера (поглотителя) из нормального металла и два перехода сверхпровод-

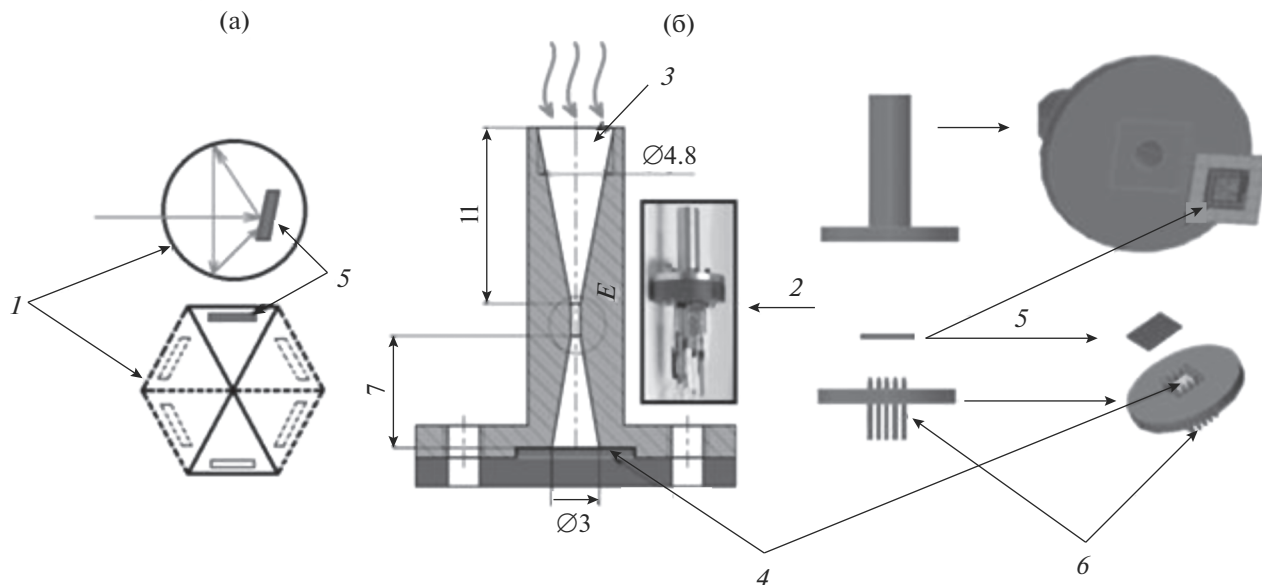


Рис. 5. Схема интегрирующей полости 1 (а) и разрез 3D-модели используемого держателя 2 образцов (б) в виде конструкции встречных рупоров 3 с контррефлектором 4. Исследуемый образец 5 зафиксирован в держателе при помощи прижимных контактов 6.

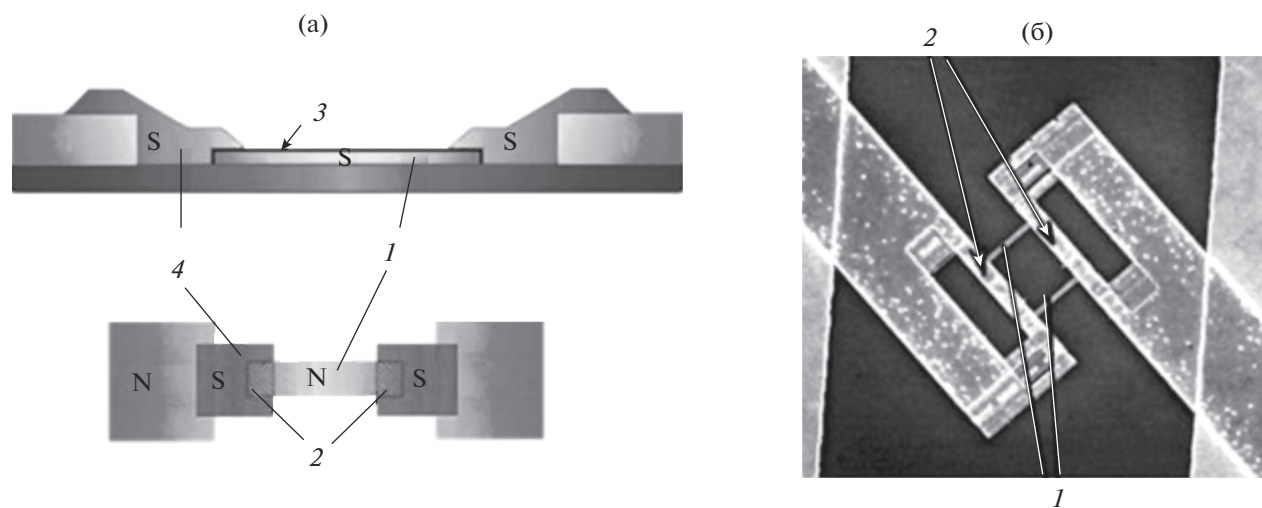


Рис. 6. Схема (а) и фотография (б) СИНИС-болометра: 1 – тонкая пленка абсорбера (поглотителя) из нормального металла (алюминий с подслоем железа), 2 – два СИН-перехода. Слой изолятора 3 образуется путем окисления алюминия в камере, после чего напыляется сверхпроводящий алюминий 4.

ник–изолятор–нормальный металл (СИН) (рис. 6). Приходящее излучение поглощается абсорбером, вследствие чего возрастает его электронная температура, измеряемая СИН-переходом.

В условиях работы на реальных обсерваториях фоновая мощность достигает десятков пиковатт. Одиночный СИНИС-болометр насыщается на уровне поглощаемой мощности менее 1 пВт, но при объединении десятков таких болометров в матрицу можно значительно повысить мощность

насыщения, так как приходящая мощность будет распределяться между болометрами.

Моделирование разрабатываемых структур проводилось в программном пакете CST STUDIO SUITE. Смоделировать реальную приемную структуру и составить полную электродинамическую картину не удалось из-за очень большого количества пространственных мод. В системе рупор–контррефлектор возникает огромное количество отражений и происходит взаимодействие

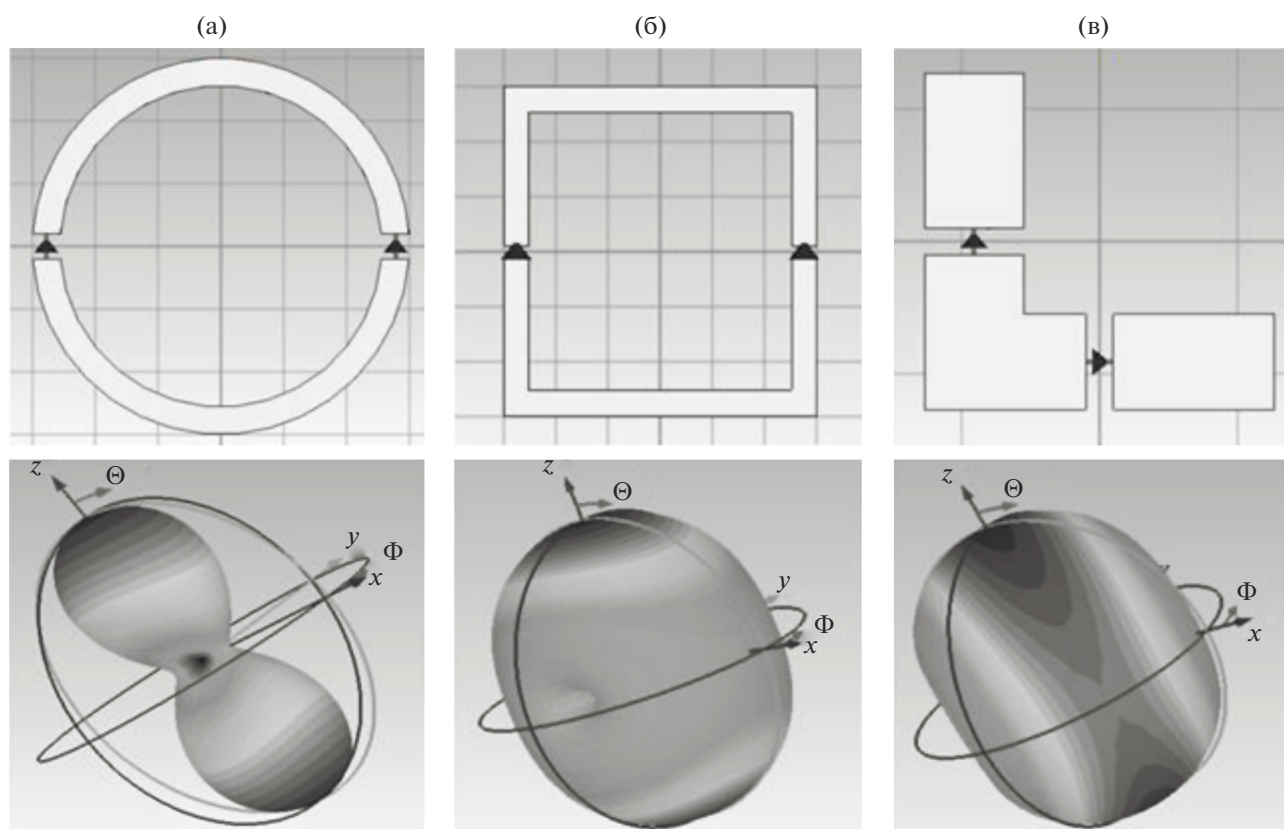


Рис. 7. Моделируемые структуры (верхний ряд) и полученные диаграммы направленности (нижний ряд): а – кольцевая антенна; б – квадратная антенна; в – L -антенна.

между 50 антеннами матрицы и модами сигнала. Мы можем провести приблизительное качественное моделирование для предварительной оценки разрабатываемых структур, чтобы определить некоторые параметры матриц. Все остальные корректировки вводятся после экспериментальных исследований.

Для рассматриваемых задач единственный элемент матрицы должен отвечать следующим требованиям: отсутствие селективности по поляризации, возможность интегрирования СИНИС-боллометров и наличие такой диаграммы направленности (ДН), которая не создает так называемых подложечных мод. В качестве единичного элемента были рассмотрены различные антенны: кольцевая, квадратная и L -антенна. Смоделированные ДН представлены на рис. 7. По полученным результатам можем сделать вывод, что планарная кольцевая антенна (см. рис. 7а) лучше других удовлетворяет перечисленным требованиям. В случае L -антенны (см. рис. 7в) часть ДН ориентирована в плоскость подложки, что будет создавать подложечные моды.

Определившись с выбором единичного элемента, мы можем такие антенны объединить в

матрицу, так называемую частотно-селективную поверхность [9].

Эффективность поглощения проходящего сигнала в разрабатываемых структурах зависит от толщины подложки, на которой изготавливается матрица антенн, а также от расстояния до контррефлектора. Мы смоделировали (рис. 8) ДН кольцевой антенны на кремниевых подложках различной толщины Z_{sub} : $64.5 \text{ мкм} (\lambda^*/4)^2$, $129 \text{ мкм} (\lambda^*/2)$, 280 и 380 мкм (стандартные толщины подложек). Подложка полуволновой толщины (см. рис. 8в) способствует образованию подложечных мод, что снижает эффективность поглощения проходящего сигнала. Наиболее оптимальный вариант – подложка толщиной в четверть длины волны (см. рис. 8б). На практике, для получения требуемой толщины используется процесс травления кремния в газе SF_6 (фото подложки с вытравленными мембранами см. на рис. 8е). Такой процесс не всегда доступен, трудно контролируем, и, кроме того, подложка становится хрупкой. Если нет возможности изготовить травленную подложку, то ее можно заменить на стандартную с толщиной 380 мкм (см. рис. 8д).

² λ^* – длина волны в диэлектрике.

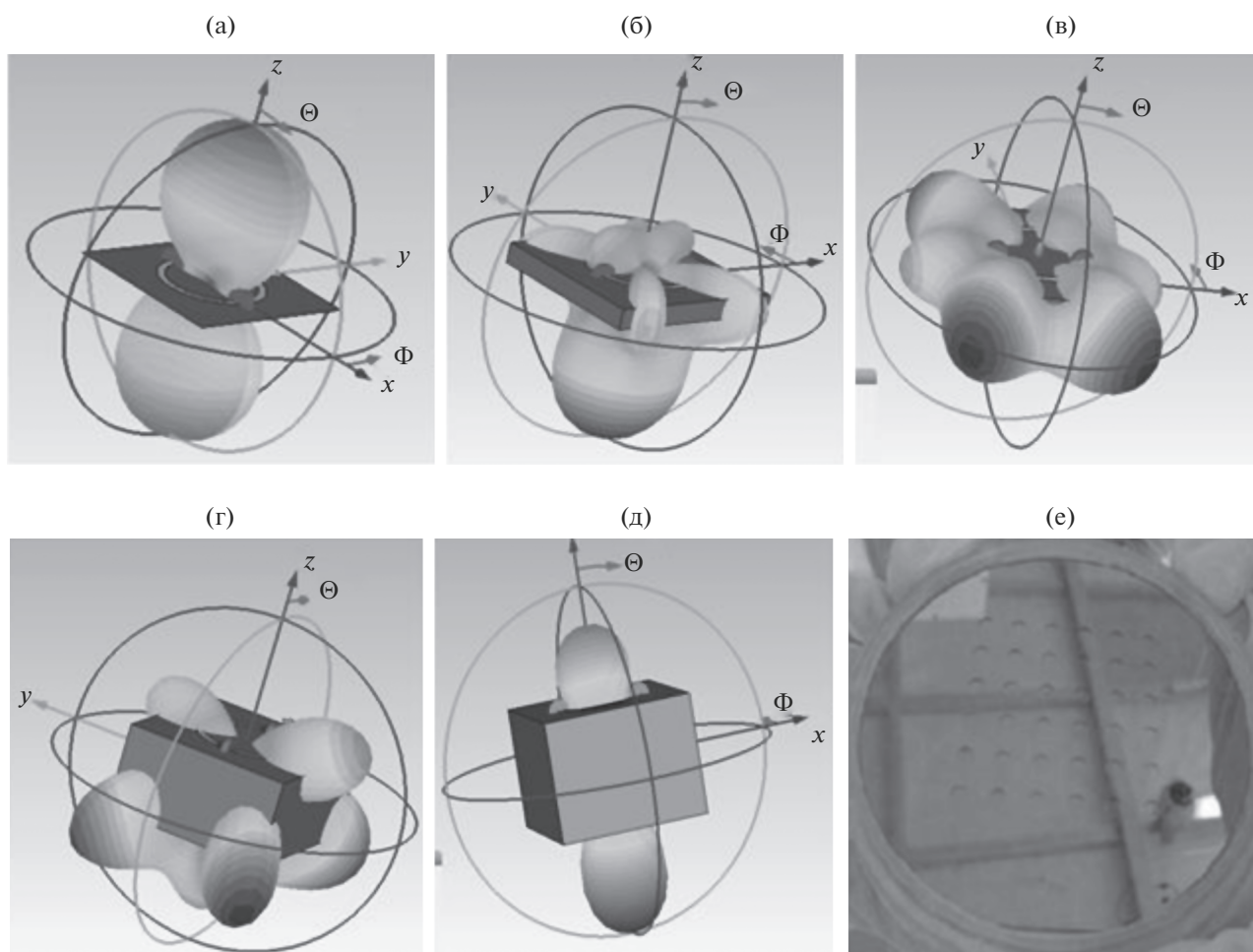


Рис. 8. Диаграммы направленности кольцевой антенны на кремниевой подложке различной толщины: $Z_{\text{sub}} = 0$ (а), 64.5 (б), 140 (в), 280 (г), 380 мкм (д); и фотография вытравленных мембран (е).

Изготовление таких болометрических матриц осуществляется в три технологических цикла: травление кремния; формирование первого слоя, состоящего из планарных антенн, соединительных проводов и контактных площадок; формирование второго слоя, состоящего из матрицы болометров. Первый слой может изготавливаться путем электронной (или лазерной) литографии, а затем напыляются три слоя методом электронно-лучевого напыления – 10 нм Ti/100 нм Au/20 нм Pd. Слой, в котором находятся СИНИС-болометры изготавливается с применением техники теневого напыления. Формирование резистивной маски для слоя с болометрами осуществляется только путем электронной литографии из-за малых размеров поглотителя (минимальный размер болометрических структур – ширина поглотителя, составляющая 100 нм). Сначала под прямым углом напыляется тонкая пленка абсорбера из нормального металла (15 нм Fe/Al), затем формируется слой изолятора путем напуска кислорода в каме-

ру, а потом напыляются сверхпроводящие алюминиевые электроды под углами $\pm 45^\circ$.

Были изготовлены матрицы кольцевых антенн, состоящие из 25 кольцевых планарных антенн с интегрированными двумя или четырьмя СИНИС-болометрами. Матрица 5×5 кольцевых антенн с центральной частотой в 345 ГГц геометрически вписывается в раскрыв рупора диаметром 3 мм. Элементы в матрице могут быть соединены как последовательно, так и параллельно, в зависимости от того, какая предполагается система считывания. Последовательное соединение элементов обеспечивает высокое выходное асимптотическое сопротивление (15 кОм), в этом случае в рабочей точке сопротивление матрицы составит порядка 500 кОм и оптимальной будет система считывания на основе полевых транзисторов с полупроводниковым затвором. При параллельном соединении элементов нормальное сопротивление матрицы будет около 15 Ом, что позволяет использовать сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД) или биполярный тран-

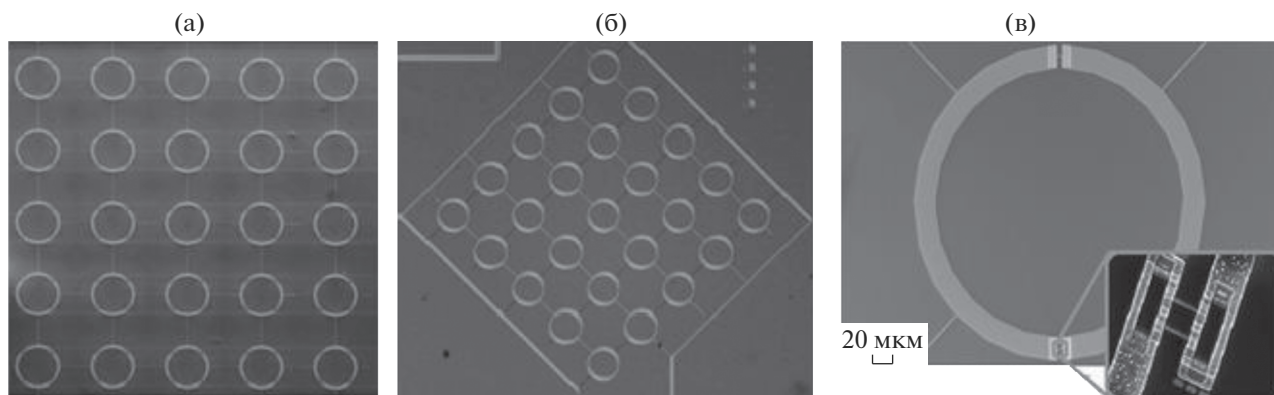


Рис. 9. Фотографии изготовленных болометрических матриц: а – матрица с последовательным соединением элементов, б – матрица с параллельным соединением элементов, в – единственный элемент матрицы, на вставке-СИНИС-болометр.

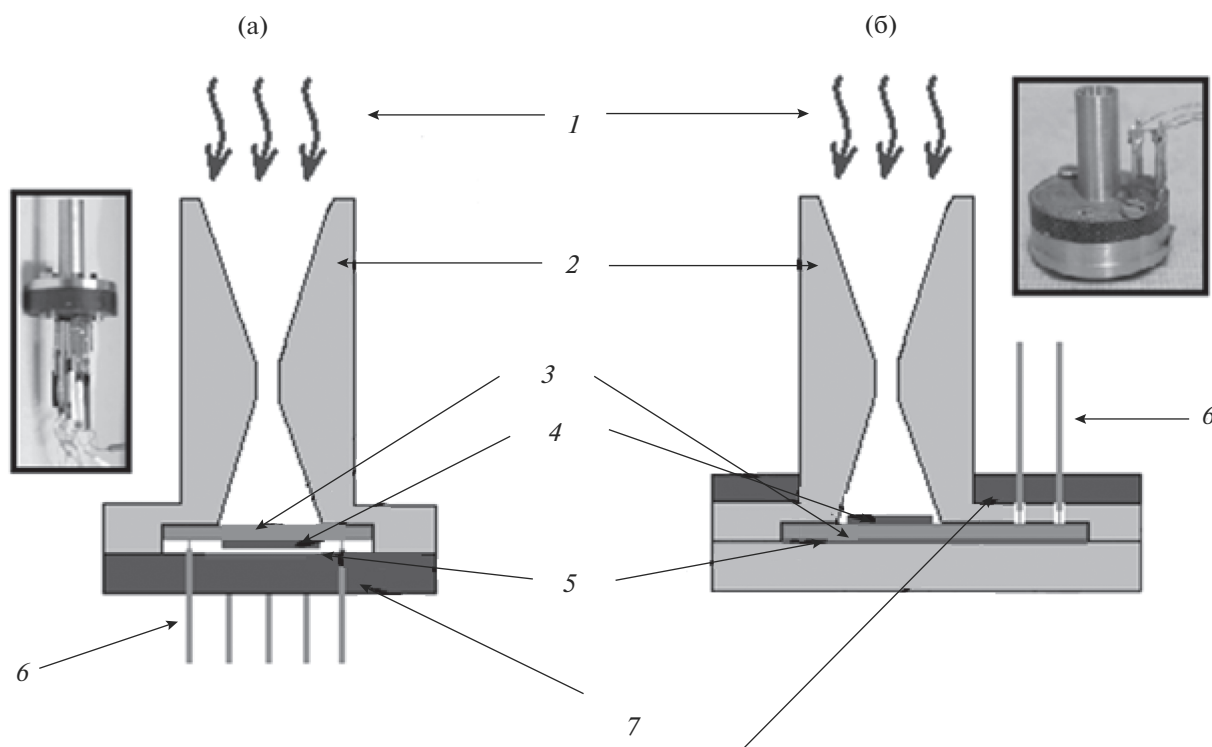


Рис. 10. Схематичное изображение и фотографии реальных образцов для различных способов облучения приемной матрицы: а – со стороны кремния, б – со стороны антенн. 1 – входящее излучение, 2 – встречные рупора, 3 – кремниевая подложка, 4 – приемная матрица, 5 – контррефлектор, 6 – прижимные контакты, 7 – стеклотекстолитовая вставка для вклеивания прижимных контактов.

зистор с криогенным согласующим трансформатором для считывания сигнала. Фотографии изготовленных образцов представлены на рис. 9.

3. СПОСОБЫ ОБЛУЧЕНИЯ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ

Было рассмотрено два типа облучения приемной матрицы: через диэлектрическую подложку (рис. 10а) [10] и со стороны антенн (рис. 10б). В первом случае при моделировании контррефлектор устанавливался на расстоянии $\lambda/4$. На прак-

тике же такой контррефлектор представляет собой кусочек алюминиевого скотча, наклеенного на держатель образцов (схематично показано на рис. 5). Во втором случае, когда матрица облучается со стороны антенн, контррефлектор наносится непосредственно на подложку с обратной стороны путем напыления толстого слоя (100 нм) золота. Компьютерное моделирование (рис. 11) показало, что вариант с облучением со стороны антенн дает лучшие результаты – более равномерный отклик и лучшее согласование. Сравнение с экспериментальными данными будет представлено в следующем

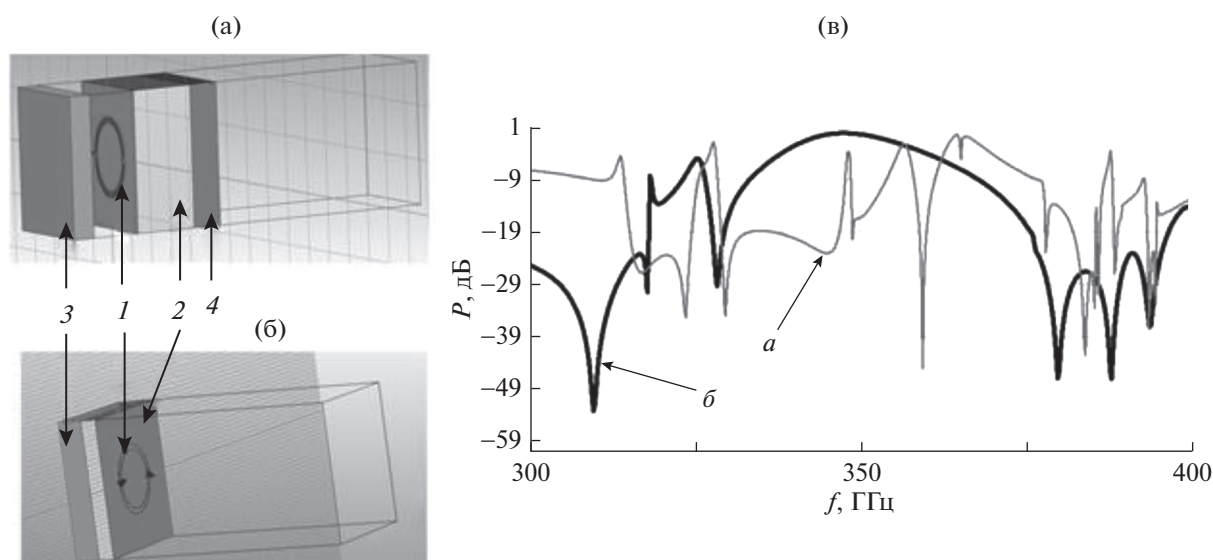


Рис. 11. Внешний вид моделируемых структур при облучении через диэлектрическую подложку (а) и со стороны антенн (б): 1 – кольцевая антенна, 2 – кремниевая подложка, 3 – контррефлектор, 4 – антиотражающее покрытие; а также результаты моделирования (в), полученные соответственно при облучении со стороны антенн (б) и через диэлектрическую подложку (а).

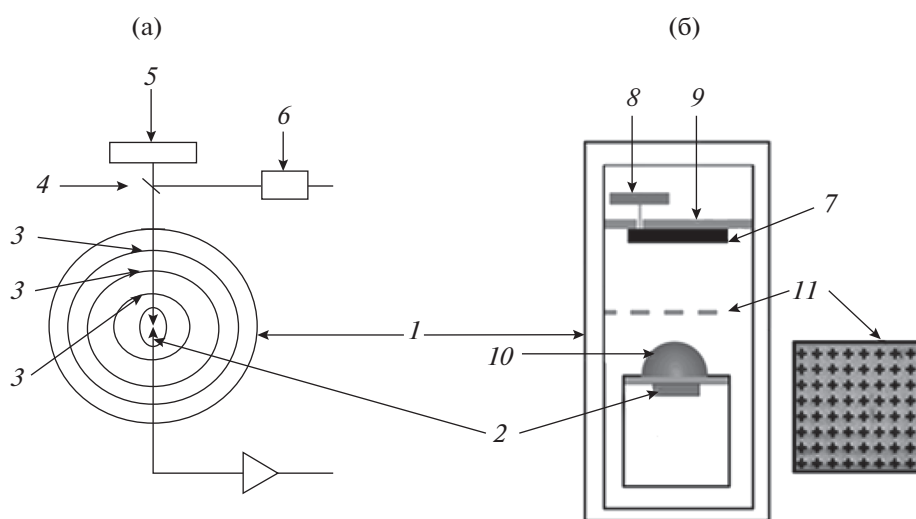


Рис. 12. Схематичное изображение экспериментальных установок: 1 – криостат (300 мК (а) и 100 мК (б)), 2 – исследуемый образец, 3 – оптические фильтры в окнах криостата, 4 – модулятор обтюраторного типа, 5 – источник излучения (ЛОВ), 6 – пирозлектрик, 7 – источник излучения (ЧТ), 8 – нагреватель, 9 – плата криостата с температурой 0.5 К, 10 – линза, 11 – полосовой фильтр.

разделе. Для улучшения равномерности спектрального отклика в случае облучения со стороны диэлектрической подложки было использовано антиотражающее покрытие, на практике в качестве такого покрытия было использовано два слоя каптонового скотча.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Схематичные изображения экспериментальных установок представлены на рис. 12. Исследо-

вание образцов проводили при рабочей температуре 100 мК в погружном криостате растворения [11] и при 300 мК в криостате фирмы Oxford Instruments – He3 Refrigerator – Heliox AC–V. Держатель с рупором и образцом устанавливался на холодную плиту криостата. Проводилось два типа измерений: измерение спектрального отклика, когда в качестве источника излучения использовали лампу обратной волны (ЛОВ) диапазона 230...380 ГГц и измерение оптического отклика на излучение черного тела (ЧТ).

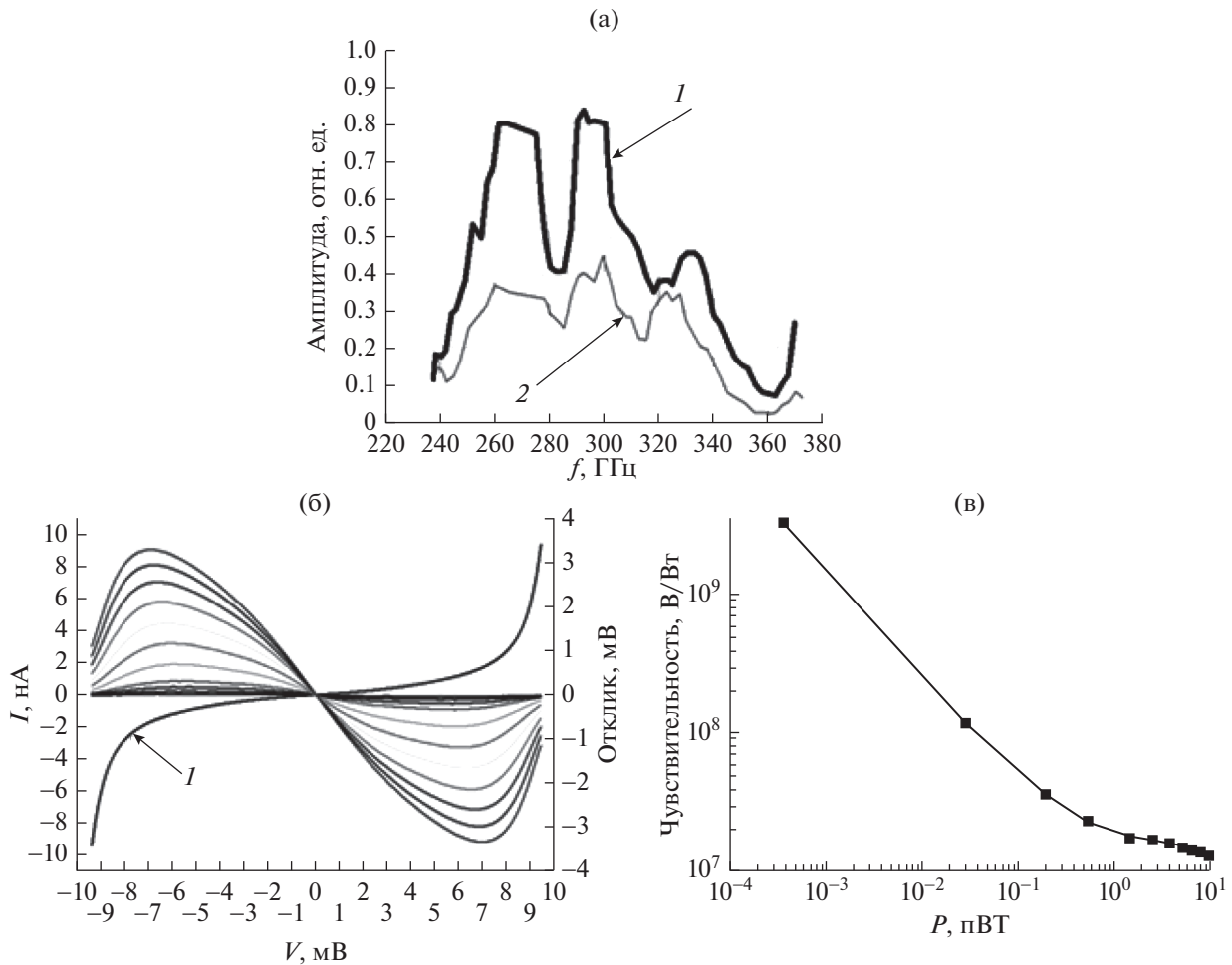


Рис. 13. Результаты экспериментальных измерений: а – спектральный отклик образцов на входящий сигнал от ЛОВ в случае облучения со стороны антенн и через диэлектрическую подложку; б – отклик матрицы последовательно соединенных элементов на излучение ЧТ различной температуры, кривые от меньшей к большей – $T_{\text{ЧТ}}$ (в К): 0.7, 2, 3, 4, 6, 7.5, 9, 10.7, 12.4, 14, 15.5; в – вольт-ваттная чувствительность.

4.1. Измерение спектрального отклика

Сигнал от источника излучения, находящийся в комнате, поступал к образцу через три оптических окна криостата (см. рис. 12а). Одновременно детектировался сигнал с болометра и опорный сигнал с ЛОВ при помощи пироэлектрического приемника, после чего сигнал с болометра нормировался на опорный сигнал. При исследовании спектрального отклика матриц с различными типами облучения для сравнения уровня принимаемого сигнала образцы измеряли в едином экспериментальном цикле (рис. 13).

4.2. Измерение оптического отклика

При измерении оптического отклика использовали в качестве источника сигнала ЧТ, представляющее собой тонкую пленку нихрома, напыленную на сапфир или кремний. Черное тело устанавливали на плите криостата с температурой

0.5 К, оно могло нагреваться до 7 К. Чтобы “вырезать” необходимую полосу из спектра излучения ЧТ и избавиться от паразитной ИК-засветки, перегревающей болометра, между источником сигнала и приемной матрицей располагали полосовые фильтры [12]. Результаты измерения показаны на рис. 13б, 13в.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При измерении спектрального отклика сигнал от источника излучения (ЛОВ) претерпевает множественные отражения на пути к приемной матрице. В наших ранних работах сигнал, измеряемый с болометрической матрицы, нормировался на опорный сигнал, измеряемый пироэлектрическим приемником, расположенным снаружи криостата (см. рис. 12а). Для того чтобы более точно измерить спектральный отклик, необходима дополнительная калибровка на опорный сигнал,

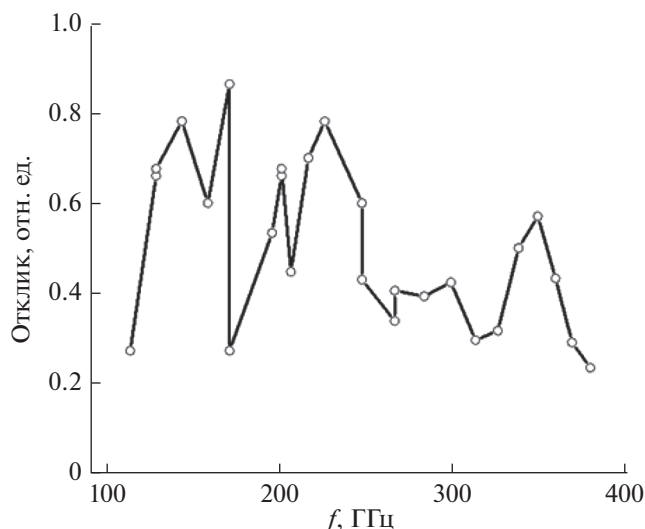


Рис. 14. Спектральная характеристика матрицы 350 ГГц на сапфировой линзе в диапазоне частот 100...400 ГГц.

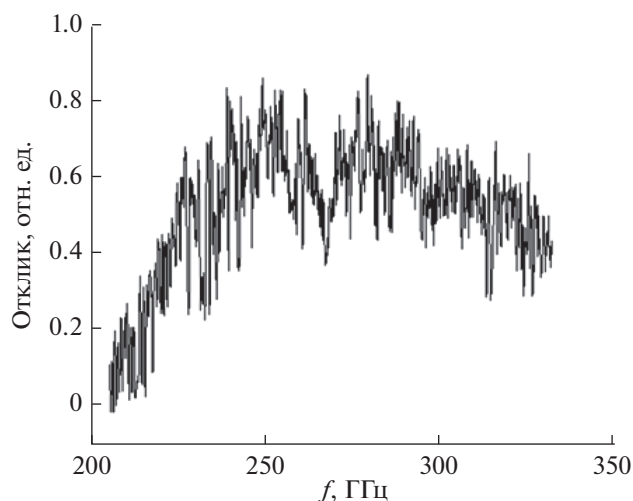


Рис. 15. Спектральная характеристика одиночного колечка, рассчитанного на центральную частоту 240 ГГц.

который необходимо измерять внутри криостата. Такая методика была реализована в двух вариантах: с использованием резистора для поверхностного монтажа на основе оксида рутения [13] и с использованием последовательной цепочки СИН-переходов. Как видно из эксперимента (рис. 14), собственно матрица является существенно более широкополосным приемником, что было показано в экспериментах с иммерсионной сапфировой линзой и калибровкой по резистору внутри криостата (см. рис. 14). Основной расчетный максимум находится в районе 350 ГГц, а также на субгармониках и комбинационных частотах, поскольку к каждой антенне подключены элементы соседних антенн и наблюдаются резонансы на ха-

рактерных размерах больше половины эквивалентной длины волны в диэлектрике на частотах в районе 230 и 160 ГГц.

Нормировка принимаемого сигнала на отклик длинной последовательной цепочки СИН-переходов и непрерывная развертка частоты источника позволяют получить достаточно гладкие зависимости принимаемого сигнала (рис. 15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы матрицы кольцевых планарных антенн с интегрированными СИНИС-боллометрами. Для согласования приходящего сигнала с приемной матрицей эффективно использовать интегрирующую полость. Показано, что в случае облучения матрицы со стороны антенн заметно возрастает уровень принимаемого сигнала. Чтобы получить более точный спектральный отклик приемной матрицы необходима дополнительная нормировка на опорный сигнал, измеряемый внутри криостата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания и при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-32-50002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Richards P.L. // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. № 1. P. 1.
2. Lamb W.E. // Phys. Rev. 1946. V. 70. № 5–6. P. 308.
3. Hildebrand R.H. // Opt. Engineering. 1986. V. 25. № 2. P. 252323.
4. Nishioka N.S., Richards P.L., Woody D.P. // Appl. Opt. 1978. V. 17. № 10. P. 1562.
5. Cunningham C.R., Gear W.K. // Instrumentation in Astronomy VII. Intern. Soc. Optics and Photonics. 1990. V. 1235. P. 515.
6. Glenn J., Chattopadhyaya G., Edgington S. et al. // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 1. P. 136.
7. Church S.E., Philhour B., Lnage A.E. // Submillimetre and Far-Infrared Space Instrumentation. 1996. V. 388. P. 77.
8. Murphy J.A., Colgan R., O'Sullivan C. et al. // Infrared Phys. Technol. 2001. V. 42. № 6. P. 515.
9. Munk B.A. // Frequency selective surfaces: theory and design. N.Y.: John Wiley & Sons, 2005.
10. Mahashabde S., Sobolev A., Bengston A. et al. // IEEE Trans. 2015. V. TST-5. № 1. P. 145.
11. Эдельман В.С. // ПТЭ. 2009. № 2. С. 159.
12. Тарасов М.А., Громов В.Д., Богомолов Г.Д. и др. // ПТЭ. 2009. С. 85.
13. Лемзяков С.А., Эдельман В.С. // ПТЭ. 2016. № 4. С. 146.