

УДК 537.86.029.65/.79

С. А. Кузнецов^{1,2}, А. В. Аржанников^{1,2},
А. В. Гельфанд³, А. В. Зоренко⁴, Б. П. Горшунов⁵

¹Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

²Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: S.A.Kuznetsov@inp.nsk.su

³Новосибирский филиал Института физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН "КТИПМ"
пр. Акад. Лаврентьева, 2/1, Новосибирск, 630090, Россия

⁴Научно-исследовательский институт "Орион"
ул. Потье, 8а, Киев, 03057, Украина

⁵Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия

МНОГОКАНАЛЬНАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Описана 4-канальная радиометрическая система для регистрации импульсов субмиллиметрового излучения в диапазоне частот 210–530 ГГц. Система построена по квазиоптической схеме с поляризационным демультимплексированием каналов, в которой частотная фильтрация обеспечивается квазиоптическими полосовыми фильтрами, а детектирование субмиллиметровых сигналов – быстродействующими детекторами на базе диодов Шоттки. Система имеет частотное и временное разрешение каналов ~ 30–50 ГГц и ~ 2 нс соответственно и предназначена для регистрации эмиссии электромагнитного излучения в окрестности двойной плазменной частоты, возникающего при турбулентном нагреве плотной плазмы в многопробочной магнитной ловушке ГОЛ-3 мощным релятивистским электронным пучком 10-микросекундной длительности.

Ключевые слова: субмиллиметровое излучение, радиометрия, квазиоптические селективные элементы, сеточные фильтры, детекторы Шоттки, фотолитография.

Введение

С 1990-х гг. в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН ведутся уникальные эксперименты по нагреву и удержанию плотной субтермоядерной плазмы ($n = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T \approx 1 - 2 \text{ кэВ}$) в многопробочной магнитной ловушке ГОЛ-3 [1; 2]. Ключевая особенность установки ГОЛ-3 заключается в реализации эффективного нагрева плазмы мощным сильноточным релятивистским электронным пучком (РЭП) 10-микросекундной длительности. Высокий инкремент двухпотоковой неустойчивости

РЭП в плазме приводит к его быстрой релаксации [3], обеспечиваемой за счет эффективной передачи кинетической энергии релятивистских электронов ленгмюровским колебаниям плазмы через черенковский резонанс: $\omega_p \cong (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}_{\text{beam}})$, где ω_p – электронная плазменная частота, \mathbf{k} – волновой вектор ленгмюровской волны, \mathbf{v}_{beam} – скорость электронов РЭП. Вследствие высокого уровня ленгмюровской турбулентности, при котором относительная доля энергии плазмонов W_l составляет заметную величину от тепловой энергии nT плазмы ($W_l / nT \sim 10^{-2} - 10^{-1}$), на установке ГОЛ-3 реализуется уникальная

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (грант 2.1.1/3983).

возможность проявления эффектов генерации электромагнитного излучения в окрестностях плазменной и двойной плазменной частот за счет плазмон-фотонной конверсии. В случае ω_p -процесса электромагнитный квант с частотой, близкой к плазменной, генерируется при рассеянии ленгмюровских волн на флуктуациях плотности. В случае $2\omega_p$ -процесса слияние двух плазмонов приводит к образованию фотона с частотой, близкой к удвоенной плазменной. Указанные эффекты хорошо идентифицированы в солнечных радиовсплесках III типа, возникающих при распространении пучков ускоренных электронов в плазме солнечного ветра [4; 5], однако являются слабо изученными в лабораторных условиях.

Исследование ω_p - и $2\omega_p$ -процессов при нагреве плазмы ГОЛ-3 мощным микросекундным РЭП представляется важной задачей и в фундаментальном, и в диагностическом аспектах, поскольку спектр, мощность, поляризация конверсионного излучения и их динамика содержат информацию о параметрах турбулентной плазмы, включая плотность n , температуру T_e , спектр $\{\vec{k}^l\}$ и плотность энергии турбулентности W_l и др. В пересчете на характерную плотность плазмы $n = 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ линейная частота ω_p - и $2\omega_p$ -эмиссии для установки ГОЛ-3 составляет

$$\omega_p / 2\pi = \sqrt{4e^2 n / \pi m} \cong 90 \div 283 \text{ ГГц}$$

и

$$2\omega_p / 2\pi \cong 180 \div 566 \text{ ГГц}$$

соответственно, приходясь на диапазон миллиметровых и субмиллиметровых волн. Характерной особенностью данного диапазона является возможность сочетания в аппаратуре принципов как СВЧ-, так и оптической техники, что позволяет реализовывать сравнительно недорогие и эффективные инструментальные решения.

В настоящей работе описана оригинальная радиометрическая система для измерения спектра мощности излучения из плазмы ГОЛ-3 в окрестности двойной плазменной частоты. Система построена по квазиоптической схеме и предназначена для регистрации излучения в диапазоне 210–530 ГГц в 4-х параллельных спектральных каналах, имеющих частотное и временное разрешение $\sim 30\text{--}50 \text{ ГГц}$ и $\sim 2 \text{ нс}$ соответственно. В дальнейшем предполагается модерниза-

ция и расширение числа каналов диагностической системы для обеспечения параллельной регистрации эмиссии также и в окрестности плазменной частоты. На текущем этапе указанное предпочтение в пользу $2\omega_p$ -диагностики обусловлено лучшей радиационной прозрачностью плазмы на 2-й гармонике плазменной частоты, что позволяет осуществлять прием излучения из внутренних областей плазмы, в общем случае слабо прозрачных для ω_p -эмиссии.

Структура радиометрической системы

В основу разработанной нами многоканальной системы положена квазиоптическая схема, показанная на рис. 1. В данной схеме пучок субмиллиметрового излучения, транспортируемый из плазмы по квазиоптическому тракту, разделяется посредством делителей на N пространственно разнесенных пучков. Каждый из пучков далее отфильтровывается соответствующим полосовым квазиоптическим фильтром и принимается рупорно-линзовой антенной детекторной секции, в которой детектирование субмиллиметрового сигнала обеспечивается быстродействующим диодом с барьером Шоттки (ДБШ). Аналоговые сигналы с ДБШ-детекторов оцифровываются АЦП в стандарте САМАС и записываются в базу данных диагностического комплекса установки ГОЛ-3.

В настоящей работе приведенная схема (см. рис. 1) была реализована в 4-канальном варианте, показанном на рис. 2. Отправной точкой в выборе данного варианта послужила поляризационная чувствительность детекторов ДБШ, позволившая предложить и эффективно использовать схему с поляризационным демультиплексированием каналов и поляризационно-зависимой частотно-полосовой фильтрацией. В данной схеме пучок входного излучения проходит через входной поляризатор, поляризационная ось которого направлена вдоль вертикальной или горизонтальной оси. Последняя ориентируется параллельно или перпендикулярно ведущему магнитному полю на оси соленоида ГОЛ-3, что обеспечивает привязку поляризационных компонент выходящего из плазмы субмиллиметрового излучения к магнитному полю системы. Прошедший сквозь поляризатор и ставший линейно-

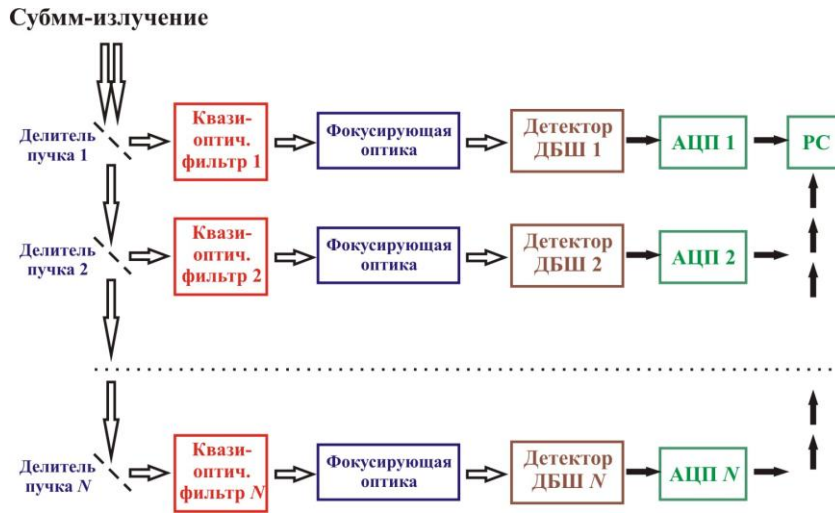


Рис. 1. Принципиальная схема многоканальной радиометрической диагностики

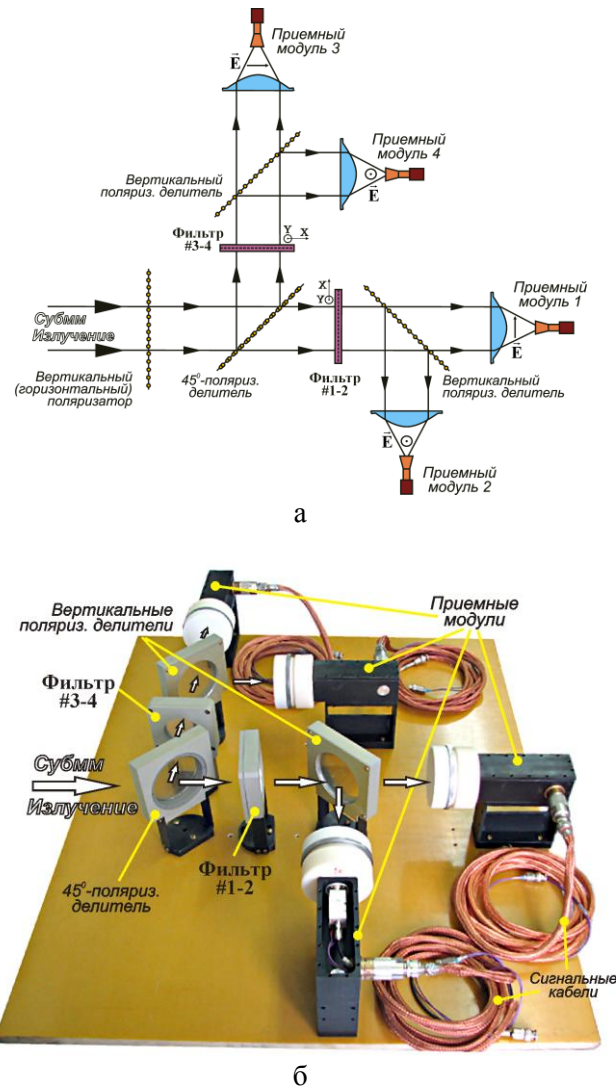


Рис. 2. Квазиоптическая схема (а) и экспериментальная реализация (б) 4-канальной радиометрической системы с поляризационным демultipлексированием каналов и поляризационно-чувствительными полосовыми фильтрами

поляризованным пучок излучения разделяется далее на два пучка равной интенсивности посредством поляризационного делителя, который установлен под 45° к оси входного пучка и поляризационная ось которого ориентирована под 45° к вертикали. Каждый из двух образовавшихся пучков, поляризованных под 45° к вертикальной оси, проходит затем сквозь квазиоптический полосовой интерференционный фильтр, выполненный на основе анизотропных резонансных сеток и имеющий смещенные полосы пропускания для горизонтально (X) и вертикально (Y) поляризованных компонент падающего излучения. Отметим, что данное оригинальное техническое решение позволяет использовать только два инструментальных фильтра для селекции 4-х полос пропускания, что уменьшает технологические затраты на канал при изготовлении многоканальной радиометрической системы. Последующее разделение X- и Y-поляризованных компонент обеспечивается поляризационными делителями с вертикально ориентированными поляризационными осями. Регистрация каждого из 4-х демультимплексированных пучков обеспечивается ДБШ-детектором с соответствующей линейной поляризацией приема (показана вектором \vec{E} на рис. 2, а). На рис. 2, б приведена фотография экспериментальной реализации 4-канальной $2\omega_p$ -радиометрической диагностики. Каждый из приемных модулей включает фокусирующую асферическую линзу, согласованную с рупорной антенной квазимонолитной детекторной секции ДБШ, помещенной в экранированную металлическую коробку для подавления электромагнитных наводок.

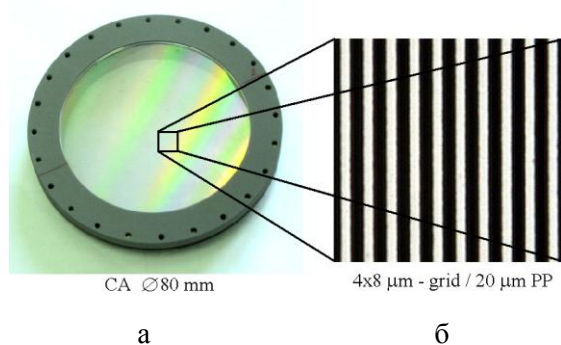


Рис. 3. Внешний вид поляризационного делителя, закрепленного в кольцевой оправе (а), и микрофотография топологического рисунка его микроструктуры (б)

Ниже приведено более детальное рассмотрение основных узлов радиометрической системы и их функциональных характеристик.

Функциональные узлы системы и их характеристики

Поляризационные делители мощности. Так же, как и поляризатор на входном окне $2\omega_p$ -диагностики, поляризационные делители мощности реализованы на базе однослойных решеток из одномерных металлических проводников с периодом расположения g много меньше характерных рабочих длин волн диагностики. При условии $g \ll \lambda$ такая решетка эффективно отражает электромагнитную волну с поляризацией параллельно проводникам (E-поляризация), полностью пропуская волну с ортогональной поляризацией (H-поляризация). В настоящей работе использованы решетки с $g = 8$ мкм и 50 % металлическим заполнением при диаметре лучевой апертуры $\varnothing 80$ мм (рис. 3). Одномерный топологический рисунок решеток изготавливается методом контактной фотолитографии на поверхности несущих полипропиленовых пленок толщиной 15–20 мкм, металлизированных посредством вакуумно-термического осаждения алюминия толщиной 0,4 мкм.

Изготовленные одномерные поляризационные решетки обеспечивают ослабление свыше 32 дБ для E-поляризации в диапазоне рабочих частот $2\omega_p$ -диагностики и фактически полную прозрачность для H-поляризации (рис. 4, а, б). Тестирование решеток на терагерцовых частотах также продемонстрировало их высокую поляризационную селективность вплоть до 10 ТГц (рис. 4, в). Последнее обстоятельство позволяет в дальнейшем эффективно использовать такие решетки в качестве рабочих элементов терагерцовых диагностик.

Квазиоптические полосовые фильтры на основе анизотропных резонансных сеток. Для частотно-полосовой селекции субмиллиметрового излучения в данной работе предложено использование квазиоптических интерференционных фильтров на основе анизотропных резонансных сеток с топологией дипольных щелей (рис. 5, а). В частном случае тонкой сетки с изотропной структурой и углах падения волны, не

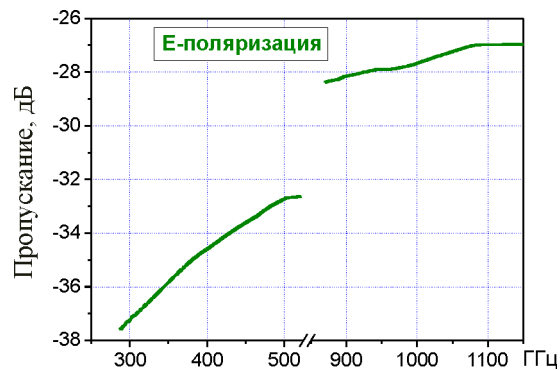
сильно отличающихся от нормальных, такая сетка имеет полосовое пропускание в окрестности длины волны, соответствующей условию дипольного резонанса: $\lambda_{\text{res}} / n_{\text{eff}} \approx 2l$. Здесь λ_{res} – резонансная длина волны в вакууме, l – длина щели, n_{eff} – эффективный показатель преломления, равный $\sqrt{\epsilon}$, в случае расположения сетки внутри диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ϵ , и $\sqrt{(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2}$ для сетки, расположенной на границе раздела диэлектриков с проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 . Ясно далее, что задание различной длины щелей по осям X и Y позволяет обеспечить смещение резонансной длины волны пропускания для X- и Y-поляризованных компонент излучения. Введение данной анизотропии позволяет использовать только два инструментальных фильтра для селекции 4-х полос пропускания, что уменьшает технологические затраты на канал при изготовлении многоканальной спектральной системы.

Отметим, что относительная ширина полосы резонансного пропускания (FWHM) рассматриваемой сеточной структуры может регулироваться за счет ширины щелей $2b$, а также расстояния ($g-l$) между соседними щелями: FWHM монотонно убывает при уменьшении $2b$ и увеличении ($g-l$). При выборе параметров сетки важно также обеспечение критерия ее дифракционной однододовости (отсутствие высших дифракционных гармоник): $g / \lambda_{\text{res}} < 1 / (1 + \sin \theta)$, где θ – угол падения. Последний накладывает ограничение сверху на допустимые значения параметра ($g-l$). Отметим далее, что составление отдельных сеток в многослойную интерференционную структуру позволяет улучшить ее селективные характеристики: крутизну фронтов АЧХ и внеполосное ослабление. При этом минимальное искажение резонансной полосы достигается в случае четвертьволновых межсеточных промежутков: $\Delta = \lambda_{\text{res}} / 4n$, где n – показатель преломления среды промежутка.

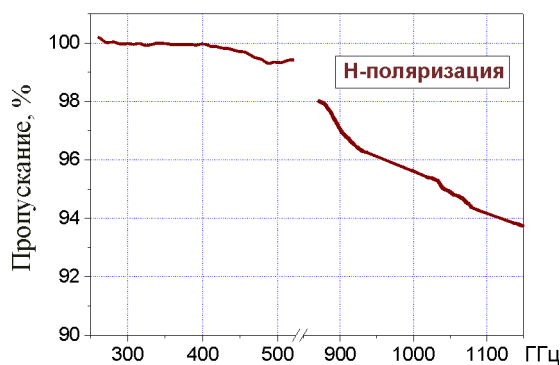
В настоящей работе для расчета АЧХ и оптимизации геометрии сеточных фильтров применялся численный пакет электродинамического моделирования Ansoft HFSS™. Данный пакет использует метод конечных элементов для решения 3D уравнений Максвелла в частотной области и ориентирован

на расчет S-параметров как волноводных, так и квазиоптических сеточных структур.

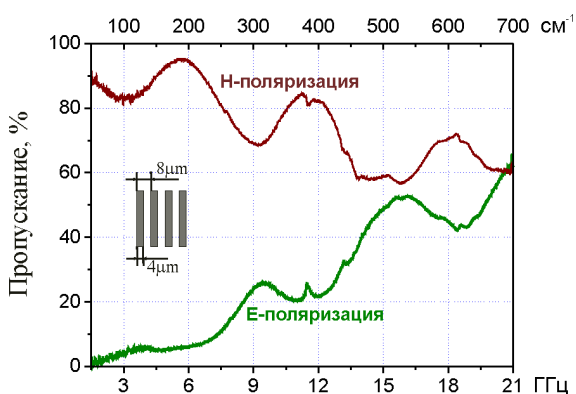
Поскольку в большинстве экспериментов на установке ГОЛ-3 типичные значения



а



б



в

Рис. 4. Результаты широкополосной субтерагерцовой характеристики поляризационных делителей с помощью ЛОВ-спектроскопии (а, б) и Фурье-спектроскопии (в) (режим нормального падения)

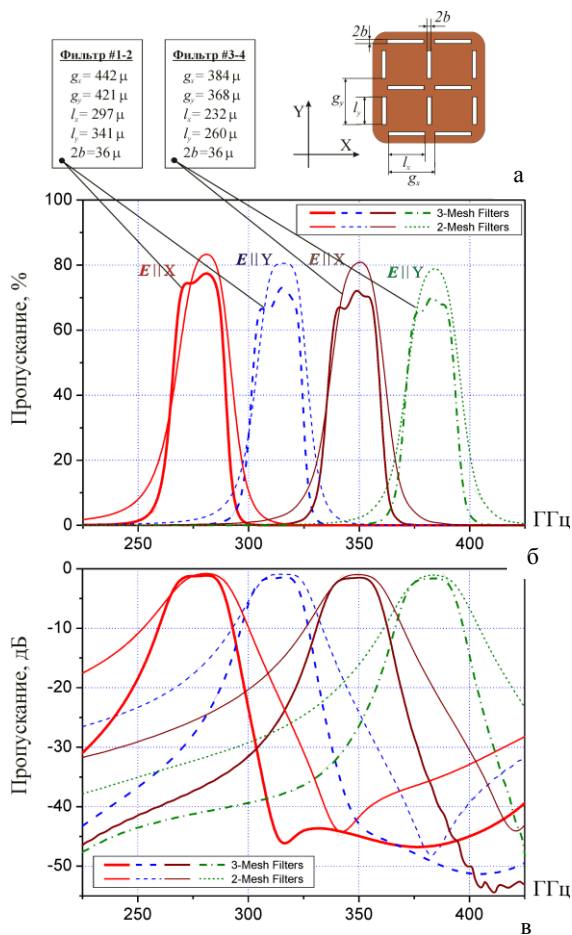


Рис. 5. Топология оптимизированных анизотропных сеток (а) и расчетные АЧХ 2- и 3-сеточных фильтров для X- и Y-поляризованного излучения: линейный (б) и логарифмический (в) масштаб (нормальное падение)

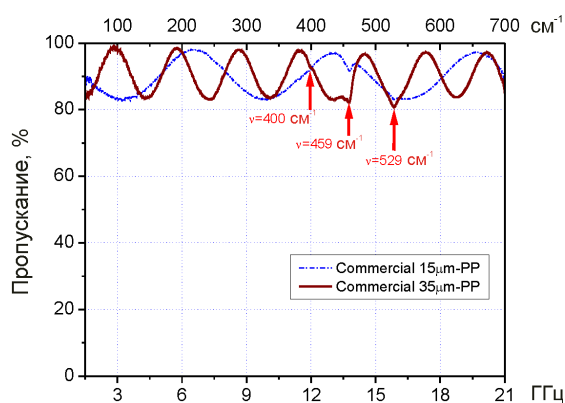


Рис. 6. Оптические свойства коммерческих полипропиленовых пленок в терагерцовом диапазоне. Ярко выраженная гармоническая частотная модуляция пропускания, обусловленная интерференцией в пленке, и близкие к 100 % значения в интерференционных максимумах демонстрируют малую дисперсию и тангенс потерь полипропилена. Стрелками указаны характеристические частоты линий молекулярного поглощения

плотности плазмы лежат в интервале $n = 2 \div 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, то при выборе рабочих частот $2\omega_p$ -диагностики для первой серии экспериментов мы ориентировались на диапазон 260–400 ГГц, соответствующий указанному интервалу плотностей. Исходя из этого процедура оптимизации геометрии сеточных фильтров была направлена на поиск оптимальных параметров 2-х наборов анизотропных сеток, обеспечивающих выделение 4-х полос пропускания, эквидистантно расположенных (со сдвигом 35 ГГц) в пределах диапазона 260–400 ГГц и имеющих минимальное значение спектральной ширины FWHM при максимальной величине пропускания на центральных частотах.

Проведенный оптимизационный анализ был выполнен для случая 2- и 3-сеточных фильтров, в которых тонкие алюминиевые сетки с толщиной металлизации 0,4 мкм предполагались запрессованными между полипропиленовыми подложками. Полипропилен был выбран в качестве несущего диэлектрика ввиду его высоких технологических характеристик, адекватных для применения в циклах фотолитографии и горячего ламинирования, используемых в настоящей работе при создании фильтров. Кроме того, чистый полипропилен обнаруживает малую дисперсию и низкие значения тангенса диэлектрических потерь ($0,5 \div 1,5 \cdot 10^{-3}$) в широком диапазоне частот терагерцового диапазона (рис. 6), что делает его перспективным терагерцовым материалом для многослойных структур.

На рис. 5, б, в приведены АЧХ оптимизированных фильтров для случая 2- и 3-сеточных структур, имеющих конфигурации:

$$PP_{300\mu\text{m}}-M-PP_{150\mu\text{m}}-M-PP_{300\mu\text{m}}$$

и

$$PP_{300\mu\text{m}}-M-PP_{150\mu\text{m}}-M-PP_{150\mu\text{m}}-M-PP_{300\mu\text{m}}$$

соответственно. Здесь обозначение «M» соответствует сетке (Mesh), а «PP» – слою полипропилена (PolyPropylene), нижний индекс для которого указывает его толщину. Отметим, что значение 150 мкм для толщины межсеточных слоев полипропилена выбрано из учета отмеченного выше критерия четвертьволновости промежутка, пересчитанного на центральную длину волны $\langle \lambda \rangle = 0,9 \text{ мм}$ рассматриваемого частотного диапазона (для полипропилена показатель

преломления составляет $n_{pp} \cong 1,5$). Для внешних слоев фильтров значение 300 мкм выбрано для обеспечения критерия полу-волнового согласования волнового импеданса для границы «воздух – полипропилен». Сравнение АЧХ 2- и 3-сеточных фильтров показывает, что при расчетной величине FWHM около 25 ГГц 3-сеточная структура обеспечивает более крутые скаты АЧХ и более сильное (20–40 дБ) разделение соседних частотных полос, хотя увеличение числа сеток приводит к падению максимума прозрачности в силу возрастания омических потерь в сетках.

Указанные на рис. 5 параметры сеточных структур были использованы в дальнейшем при создании сеточных фильтров с диаметром лучевой апертуры (СА) 60 мм для $2\omega_p$ -диагностики. Ключевой этап технологической реализации как фильтров, так и описанных поляризационных делителей, заключался в создании топологического металлизированного микрорисунка структур на поверхности полипропиленовых пленок с помощью техники контактной фотолитографии (КФЛ), см. также [6; 7]. Будучи хорошо отработанной полупроводниковой технологией, ориентированной на изготовление микроструктур с топологическими размерами в единицы и десятки микрометров, КФЛ является наиболее доступной и адекватной техникой создания планарных селективных устройств субволновой топологии для субтерагерцовых и терагерцовых диапазонов. Отметим, что особенность КФЛ, реализованная в настоящей работе, заключалась в адаптации и отработке стадий КФЛ на случай тонкопленочных полипропиленовых подложек, не характерных для применения в традиционных полупроводниковых технологиях (рис. 7).

На начальной стадии КФЛ PP-пленка жестко фиксируется механическим прижимом на несущей стеклянной подложке с габаритами 102×102 мм (1), после чего ее поверхность подвергается металлизации тонким (25 нм) адгезивным подслоем титана с последующим нанесением слоя алюминия толщиной 0,4 мкм (2). На стадии (3) на поверхность алюминия методом центрифугирования наносится 0,6 мкм слой позитивного фоторезиста, закрепляемый далее посредством 20 мин. сушки сухим сжатым воздухом и 25 мин. выдерживания в термо-

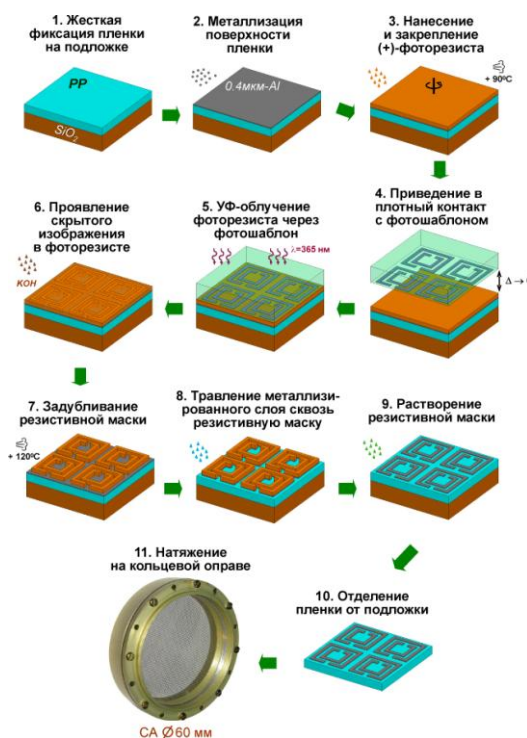


Рис. 7. Технологические стадии создания однослойных сеточных структур с помощью техники контактной фотолитографии. Для наглядности показана топология более сложной, не обсуждаемой здесь, селективной микроструктуры

стате при температуре 90°C . На следующих стадиях фоторезистивный слой приводится в плотный контакт с фотошаблоном (4) и подвергается сквозь него облучению монохроматическим УФ-излучением ($\lambda = 365$ нм), которое формирует в фоточувствительном резистивном слое скрытое изображение, реплицирующее топологию микрорисунка фотошаблона¹. Скрытое изображение, образовавшееся в результате радиационной полимеризации фоторезиста, далее проявляется путем химической обработки в растворе *KOH* (6), которая приводит к удалению необлученных участков фоторезистивного слоя. На данном этапе осуществляется промежу-

¹ Для самого фотошаблона, выполненного на основе кварцевых пластин с хромовым или железокислым покрытием, топологический микрорисунок изготавливается заранее посредством электронно- или лазерно-литографической техники. Отметим, что для ширины темнопольных топологических линий фотошаблона мы обычно вводим упреждение, равное удвоенной толщине металлизации изготавливаемой структуры (0,8 мкм), по причине соответствующего ухода ширины металлизированных линий на этапе химического травления (8).

точный контроль выдерживания топологических размеров полученной резистивной маски с помощью оптической микроскопии. На следующем этапе (7) резистивная маска задубливается путем сухой сушки и 30 мин. выдерживания в термостате при температуре 120°C. Задубливание резиста необходимо для обеспечения его химической стойкости на следующем этапе (8), на котором выполняется химическое травление металлизированного слоя сквозь резистивную маску с использованием неорганических растворителей. Наконец, после удаления остаточного резистивного материала химическим травлением в органическом растворителе (9) на поверхности полипропиленовой пленки остается металлизированный микрорисунок требуемой сеточной структуры. На рис. 8 приведены микрофотографии сеток фильтров оптимизированной топологии, созданные с помощью описанной техники КФЛ.

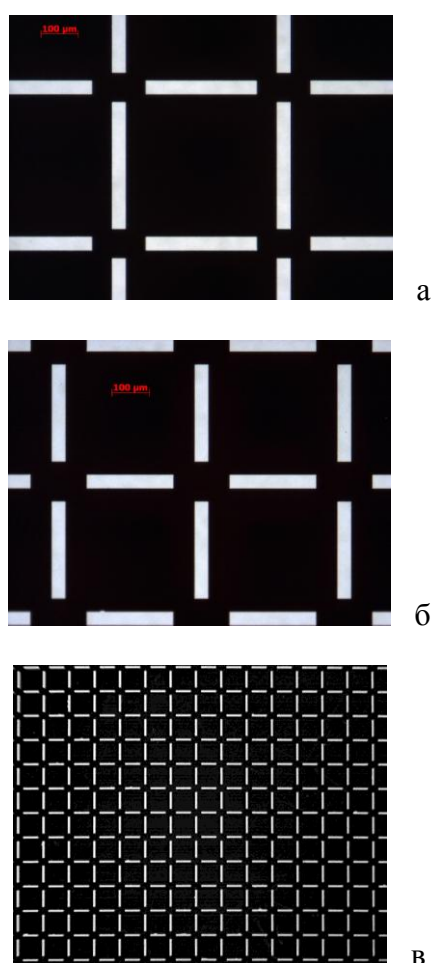


Рис. 8. Микрофотографии топологического рисунка сеток для фильтров первого (а) и второго (б) типов. Панорамный вид сетки при малом увеличении (в)

Отметим, что для однослойных структур (например, поляризационных делителей) изготовление завершается отделением *PP*-пленки от стеклянной подложки (10) и закреплением ее в натянутом состоянии на кольцевой металлической оправе (11), см. рис. 7. При создании же многослойных структур (фильтров) монолитного типа конечный образец снимается с подложки только после необходимого числа повторений цикла технологических операций (2–9), обеспечивающих создание отдельных металлизированных слоев. При этом разделение соседних сеток *PP*-слоем требуемой толщины реализуется за счет «накатки» полипропилена поверх сетки предыдущего подцикла с помощью техники горячего ламинирования (ГЛ).

В настоящей работе был выполнен цикл по отработке режимов создания сеточных фильтров с использованием техник КФЛ и ГЛ с акцентом на 2-сеточные структуры. Мы использовали высококачественные *PP*-пленки толщиной 40 мкм с пониженной температурой плавления (140 °С), что позволило эффективно применить недорогого коммерческого ламинатора для сплавления одиночных пленок в многослойную структуру. Таким образом, для случая 2-сеточных фильтров была реализована конфигурация $PP_{8 \times 40 \mu m} - M - PP_{4 \times 40 \mu m} - M - PP_{8 \times 40 \mu m}$. Отметим, что согласно проведенному моделированию небольшое отклонение толщин для внутреннего и внешнего слоев полипропилена (на 10 и 20 мкм соответственно) относительно указанных выше оптимизированных значений 150 и 300 мкм не сказывается сколько-нибудь заметно на полосовых АЧХ структур.

На рис. 9 показаны результаты спектральных измерений АЧХ для трех образцов 2-сеточных фильтров, изготовленных с применением техники ГЛ. Характеризация выполнена с помощью квазиоптического субтерагерцового ЛОВ-спектрометра [8]. Низкочастотные фильтры N1, N2 соответствуют сеточной структуре первого типа (#1-2, см. рис. 5), высокочастотный фильтр N3 – структуре 2-го типа (#3-4). Приведенные результаты демонстрируют ожидаемый эффект смещения полосы пропускания фильтра при изменении поляризации падающего излучения.

Отметим, что положение максимумов пропускания фильтров достаточно хорошо

совпадает с расчетными значениями, однако ширина полос пропускания оказывается шире теоретической: $FWHM_{\text{экс.}} \cong 40\text{--}50$ ГГц. Спектральное уширение, сопровождаемое также деградацией максимума прозрачности до уровня 44–52 %, мы связываем с линейным расширением *PP*-пленок в процессе горячего ламинирования, приводящим к неконтролируемому мелкомасштабному искажению топологии сеток фильтров и точечным разрывам металлизации, обуславливающим падение ее проводимости. Данные негативные эффекты, которые в ряде проведенных технологических опытов оказывались значительными (рис. 10, *a*), не по-

зволили нам реализовать на текущем этапе 3-сеточные ГЛ-фильтры с приемлемыми селективными характеристиками (рис. 10, *б*). В настоящее время мы осуществляем модернизацию технологического оборудования для последующего создания многослойных сеточных фильтров с улучшенными селективными характеристиками. Модернизация предполагает переход от техники горячего ламинирования полипропиленовых подложек к технике контролируемого горячего прессования на основе квазиимпульсного термопресса с форвакуумной откачкой объема с пленочными образцами.

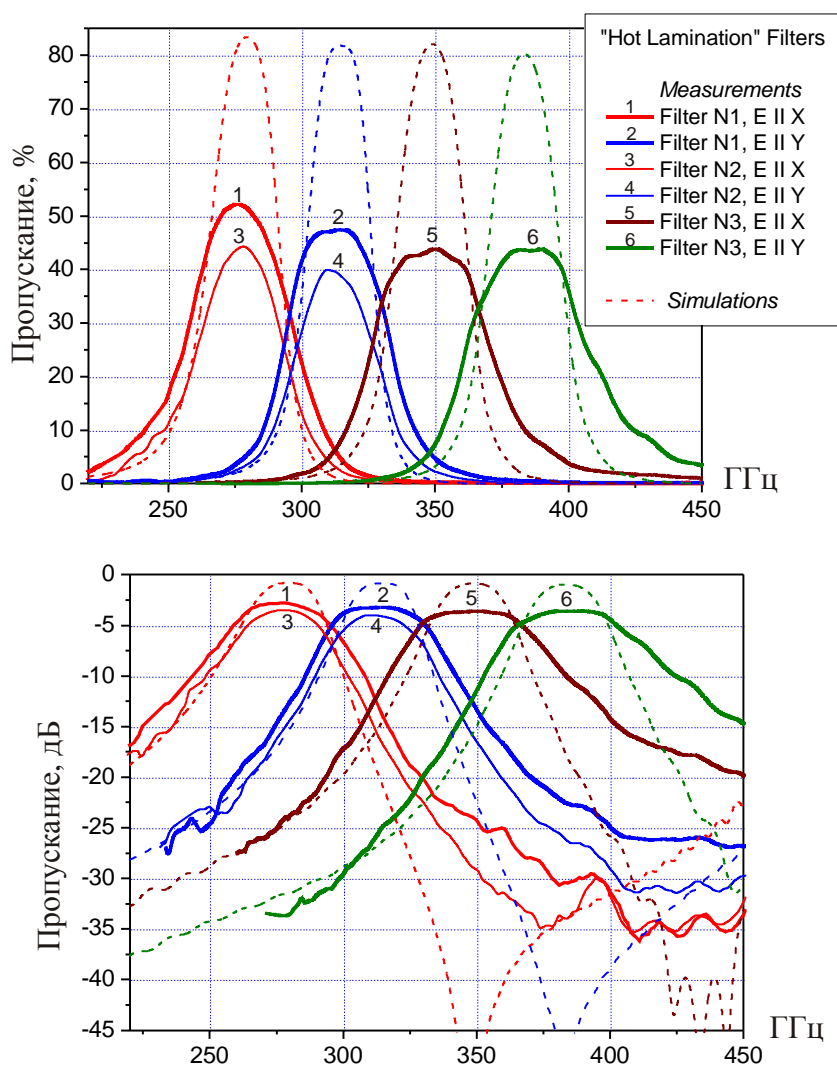


Рис. 9. Спектральное пропускание экспериментальных образцов 2-сеточных фильтров конфигурации $PP_{8 \times 40 \mu\text{м}}-M-PP_{4 \times 40 \mu\text{м}}-M-PP_{8 \times 40 \mu\text{м}}$, изготовленных с помощью техники ГЛ: линейный (*a*) и логарифмический (*б*) масштабы

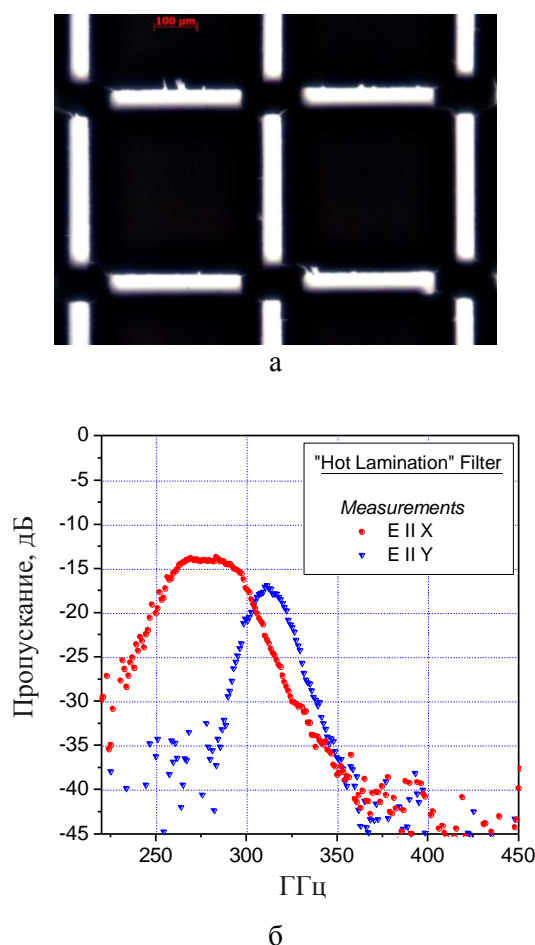


Рис. 10. Иллюстрация эффекта мелкомасштабного искажения топологии и разрывов металлизации сетки при ГЛ (а), приводящих к быстрой деградации спектрального пропускания ГЛ-фильтра с увеличением числа сеток: (б) АЧХ 3-сеточного фильтра конфигурации $PP_{8 \times 40 \mu m} - M - PP_{4 \times 40 \mu m} - M - PP_{4 \times 40 \mu m} - M - PP_{8 \times 40 \mu m}$.

Наряду с описанными выше ГЛ-фильтрами нами были также протестированы 2-сеточные фильтры, изготовленные по более простому технологическому циклу – без использования ГЛ. В этом случае сеточный рисунок создавался последовательным применением КФЛ к металлизированной с обеих сторон полипропиленовой 170 мкм пленки фабричного производства. Изготовленные таким образом фильтры конфигурации $M - PP_{170 \mu m} - M$ продемонстрировали более узкополосные АЧХ ($FWHM_{экс.} \approx 30$ ГГц) в сравнении с ГЛ-фильтрами, имея, впрочем, более низкие значения максимума прозрачности: 33–47 % (рис. 11). Численное моделирование показало, что деградация максимума связана главным образом с повышенной величиной тангенса потерь мате-

риала пленки ($\text{tg} \delta \approx 0,025$) в сравнении с чистым полипропиленом. Последнее связывается с наличием в 170 мкм пленке примесных вкраплений в сочетании с ее ухудшенной морфологией, проявляющейся в более крупной гранулированности по сравнению с 40 мкм PP -пленками, использовавшимися при создании ГЛ-фильтров.

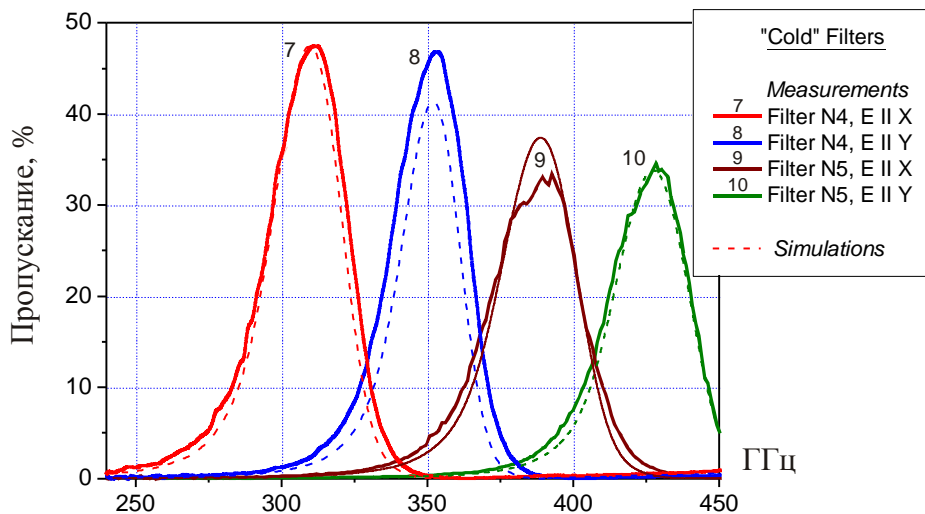
Отметим, что для 2-сеточных фильтров конфигурации $M - PP_{170 \mu m} - M$ спектральные полосы пропускания оказываются смещенными приблизительно на 40 ГГц в высокочастотную область в сравнении с 2-сеточными фильтрами конфигурации $PP_{8 \times 40 \mu m} - M - PP_{4 \times 40 \mu m} - M - PP_{8 \times 40 \mu m}$ (см. рис. 9, 11). Данный эффект позволяет расширить суммарный диапазон частот, выделяемый набором 2-сеточных фильтров, и количественно хорошо объясняется указанной выше прямо пропорциональной зависимостью резонансной длины волны λ_{res} сетки от эффективного показателя преломления

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{(\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2}$$

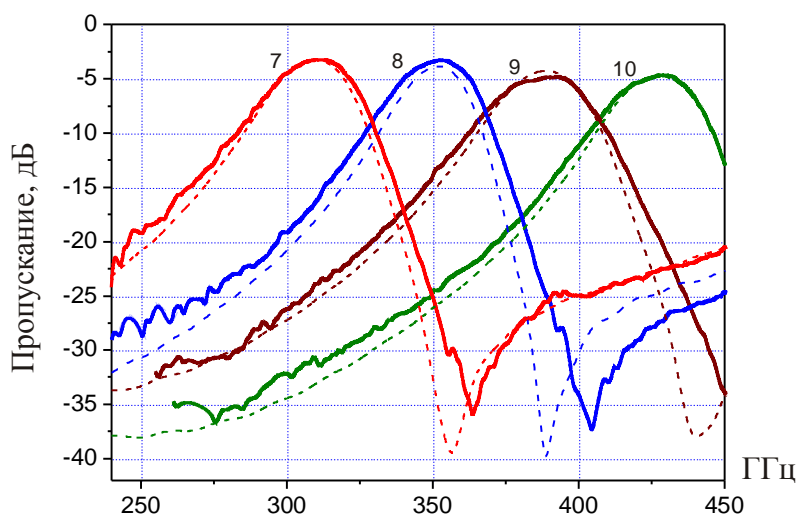
в случае, когда сетка располагается на границе раздела двух различных диэлектриков.

Приемники субмиллиметрового излучения. Каждый из приемников субмиллиметрового излучения, используемый в радиометрической системе, включает квазимонолитную быстродействующую детекторную секцию на базе диода с барьером Шоттки (ДБШ), помещенную в экранированную металлическую коробочку и совмещенную с короткофокусной асферической линзой с внешним диаметром $\varnothing 70$ мм и фокусным расстоянием 40 мм (рис. 12). Линза выполнена из фторопласта ($n = 1,44$) и имеет плоско-гиперболический профиль поверхности (рис. 13), изготовленный с помощью техники ЧПУ. Линза согласована с рупорной антенной детекторной секции, выполненной в виде волноводного перехода со сверхразмерного сечения $3,6 \times 1,8$ мм на сечение внутреннего волновода секции $0,72 \times 0,36$ мм. Последнее определяет частоту волноводной отсечки 208 ГГц как нижнюю частоту, доступную для регистрации субмиллиметрового сигнала.

Детекторная секция представляет собой функционально законченный узел, внутренняя часть которого состоит из трех основных частей (рис. 14). Первая часть – переход



а

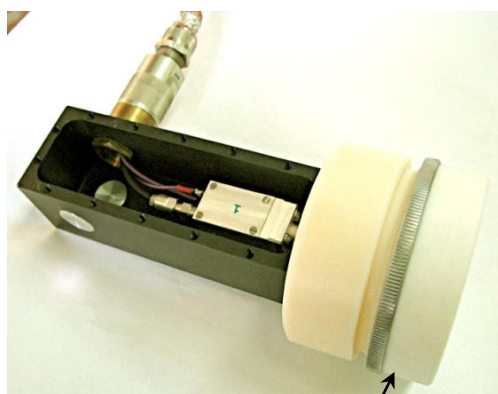


б

Рис. 11. Спектральное пропускание экспериментальных образцов 2-сеточных фильтров конфигурации $M-PP_{170\mu m}-M$, изготовленных без использования техники ГЛ: линейный (а) и логарифмический (б) масштабы



а



б



в

Рис. 12. Фотографии детекторной секции (а) и приемного модуля (б), включающего детекторную секцию, закрепленную в закрывающейся металлической коробке с кабельным разъемом и пристыковывающейся к ней асферической фокусирующей линзой (в)

с волновода на микрополосковую линию (МПЛ), предназначенную для широкополосного согласования «волновод – ДБШ». Вторая часть – GaAs ДБШ с балочными выводами, интегрированный в МПЛ. Третья часть – быстродействующий усилитель, изготовленный на интегральном операционном усилителе (ОУ) AD 8001 с шириной

полосы 900 МГц. Усилитель имеет нулевое входное дифференциальное сопротивление и выполняет роль буферного устройства с выходным сопротивлением 50 Ом. ОУ поддерживает на детекторном диоде напряжение, равное опорному, тем самым усиливает только избыточный ток, возникающий при детектировании субмиллиметрового сигнала. Это позволяет использовать детектор для регистрации как импульсных, так и постоянных субмиллиметровых сигналов без предварительной модуляции.

Одной из основных характеристик детекторной секции является чувствительность, которая определяется как отношение приращения тока детектора к приращению мощности: $\beta I = \partial I / \partial P$. Поскольку детектор нагружен на сопротивление R , то удобнее пользоваться его вольт/ваттной характеристикой: $\beta R = \partial U / \partial P$. Проведенные с помощью калиброванного твердотельного источника измерения на частоте 280 ГГц показали, что типичные значения вольт/ваттной характеристики для разработанных субмиллиметровых детекторов лежат в пределах 1 000–4 000 В/Вт, а их переходные характеристики составляют менее 2 нс. Квадратичная зависимость выходного напряжения от входной мощности сохраняется до 400 мкВт (рис. 15). Динамический диапазон измеряемых сигналов – более 50 дБ. Расчет элементов детекторной секции, а также ее вольт/ваттной и переходных характеристик выполнены с использованием пакетов Ansoft HFSS™ и Agilent Technologies ADS 2008.

Для широкополосной калибровки спектральной чувствительности субмиллиметровых приемников был использован перестраиваемый источник на основе лампы обратной волны (ЛОВ) от квазиоптического субтерагерцового спектрометра. Результаты калибровочных измерений представлены на рис. 16. В проведенных измерениях в качестве опорного нормировочного сигнала, позволяющего минимизировать искажения спектральной чувствительности субмиллиметровых приемников вследствие неравномерности выходной мощности ЛОВ и наличия стоячих волн в квазиоптическом тракте, использовался сигнал с оптико-акустического детектора (ячейка Голея), имеющего равномерную спектральную чувствительность.

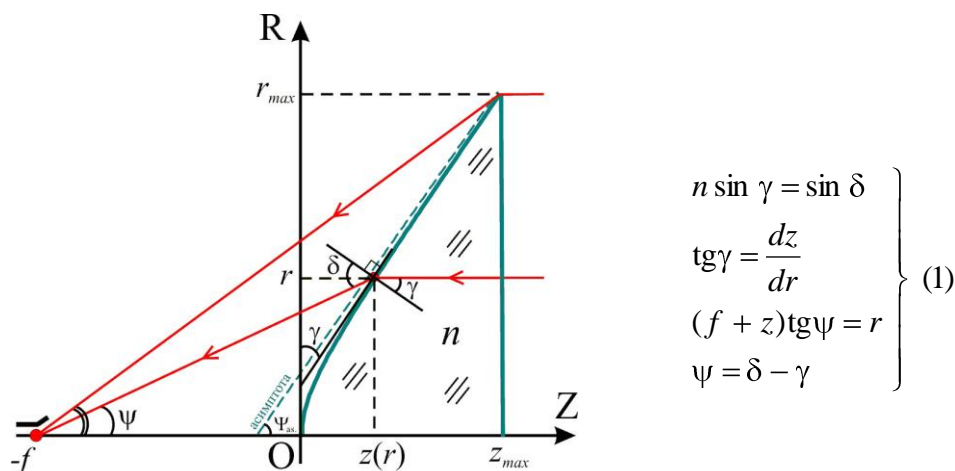


Рис. 13. К нахождению неизвестного (левого) профиля поверхности линзы, безабберационно фокусирующей плоский фронт, падающий на ее плоскую (правую) границу. Решение уравнений (1) дает связь: $z(r) = [-f(n-1) + \sqrt{f^2(n-1)^2 + r^2(n^2-1)}] / (n^2-1)$ или $f + nz = \sqrt{(f+z)^2 + r^2}$. Последняя форма имеет ясный физический смысл: оптическая длина пути для луча, идущего из произвольной точки (r, z) левой поверхности линзы в ее фокус, равна оптической длине пути луча, идущего в фокус из точки $(0, z)$. Решение представляет собой гиперболу с асимптотой, проходящей через точку $(0, -f/(n+1))$ под углом $\psi_{as.} = \arctg(\sqrt{n^2-1})$ к оптической оси линзы

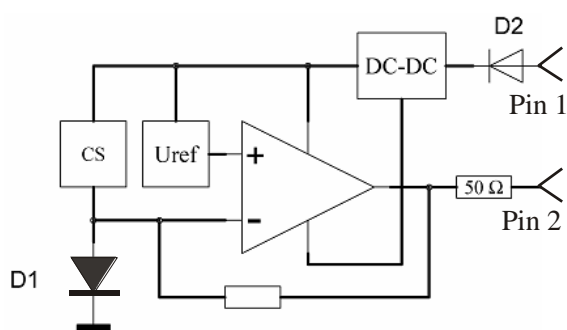


Рис. 14. Функциональная схема детекторной секции с операционным усилителем: CS – схема смещения; Uref – источник опорного напряжения; D1 – детекторный диод Шоттки (ДБШ); D2 – диод питания (Pin1: +9В)

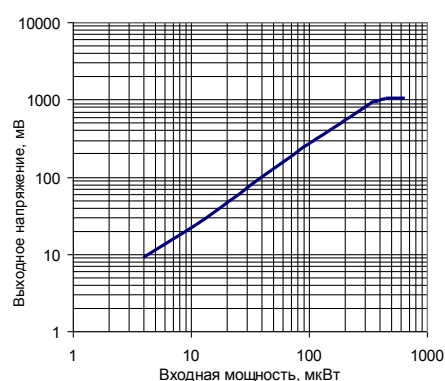


Рис. 15. Типичная динамическая характеристика детекторной секции

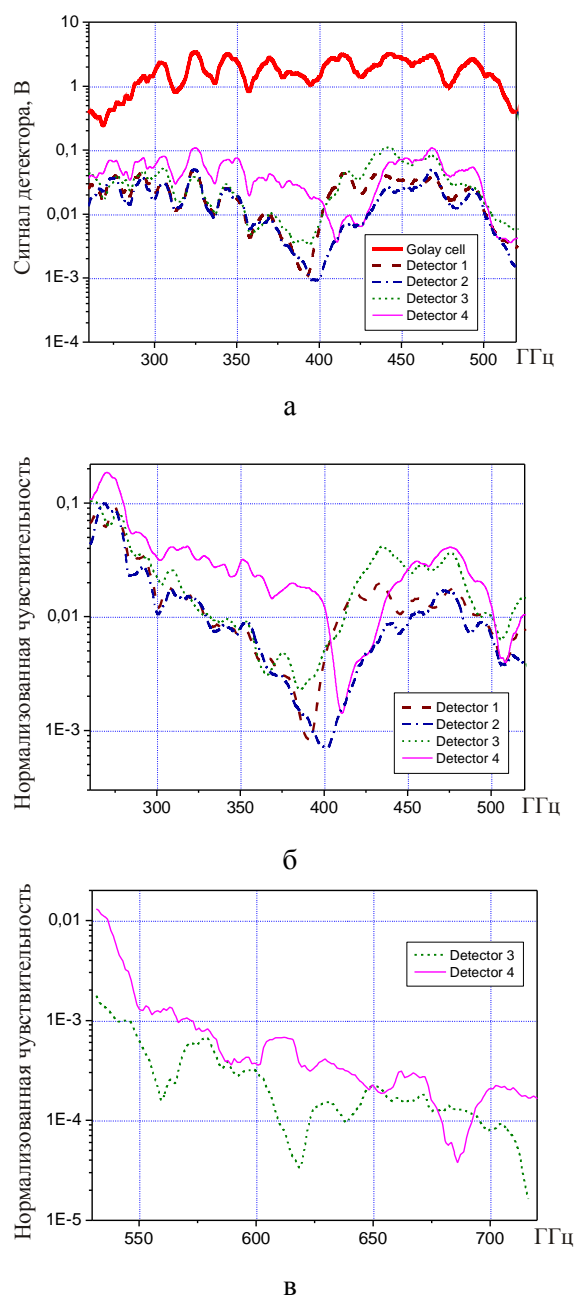


Рис. 16. Результаты спектральной калибровки субмиллиметровых приемников: не нормированные (а) и нормированные (б, в) на сигнал оптико-акустического детектора кривые их спектральной чувствительности. Сигнал с ячейки Голея показан красным цветом

Измерения продемонстрировали приемлемый уровень чувствительности субмиллиметровых приемников вплоть до частоты ~ 530 ГГц, условно определяющей верхнюю границу частот регистрации для реализованной радиометрической системы. Вместе с тем калибровка выявила наличие спектрального провала в окрестности 400 ГГц, объясняемого

работой режекторного фильтра микрополосковой линии детекторной секции. В последующей реализации новых детекторных секций мы предполагаем устранение данного артефакта в целях достижения более равномерной спектральной чувствительности.

Заключение

В представленной работе реализована сравнительно простая и эффективная радиометрическая система для регистрации спектральной плотности мощности импульсного субмиллиметрового излучения в 4-х параллельных спектральных каналах. Система построена по квазиоптической схеме с поляризационным демультимплексированием каналов, в которой частотная фильтрация обеспечивается квазиоптическими полосовыми фильтрами с шириной полосы пропускания $\sim 30\text{--}50$ ГГц, а детектирование субмиллиметровых сигналов – приемниками на базе диодов Шоттки с временем отклика менее ~ 2 нс, чувствительными к приему излучения в диапазоне 210–530 ГГц. Разработанная 4-канальная система введена в эксплуатацию на установке ГОЛ-3 для регистрации эмиссии электромагнитного излучения из плотной плазмы в процессе ее турбулентного нагрева сильноточным релятивистским электронным пучком.

В настоящее время проводится модернизация описанной радиометрической системы с целью увеличения числа спектральных каналов, улучшения селективных характеристик полосовых фильтров и минимизации неравномерности спектральной чувствительности детекторов Шоттки. Полученный в работе технологический опыт разработки фильтров использован для создания различных микроструктурных селективных элементов субтерагерцового и терагерцового диапазонов [7].

Список литературы

1. Burdakov A. V. et al. Plasma Heating and Confinement in GOL-3 Multimirror Trap // Fusion Sci. and Tech. 2007. Vol. 51. No. 2T. P. 106–111.
2. Burdakov A. V. et al. Status and Prospects of GOL-3 Multiple-Mirror Trap // Fusion Sci. and Tech. 2009. Vol. 55. No. 2T. P. 63–70.

3. Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Koidan V. S., Vyacheslavov L. N. Physics of REB-Plasma Interaction // *Physica Scripta*. 1982. Vol. T2B. P. 303–309.
4. Kruchina E. N., Sagdeev R. Z., Shapiro V. D. Strong Langmuir Turbulence as a Source of Radio Emission // *JETP Lett.* 1980. Vol. 32. No. 6. P. 419–423.
5. Mel'nik V. N., Kontar E. P. Plasma Radio Emission of Beam-Plasma Structures in the Solar Corona // *Solar Physics*. 2003. Vol. 215. No. 2.
6. Aznabet M., Navarro-Cia M., Kuznetsov S. A., Gelfand A. V., Fedorinina N. I., Goncharov Y. G., Beruete M., El Mrabet O., Sorolla M. Polypropylene-Substrate-Based SRR- and CSRR-Metasurfaces for Submillimeter Waves // *Optics Express*. 2008. Vol. 16. P. 18312–18319.
7. Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Kubarev V. V., Kalinin P. V., Sorolla M., Navarro-Cia M., Aznabet M., Beruete M., Falcone F., Goncharov Yu. G., Gorshunov B. P., Gelfand A. V., Fedorinina N. I. Development and Characterization of Quasi-Optical Mesh Filters and Metastructures for Subterahertz and Terahertz Applications // *Key Eng. Materials*. 2010. Vol. 437. P. 276–280.
8. Kozlov G. V., Volkov V. V. Coherent Source Submillimeter Wave Spectroscopy // *Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids (Topics in Applied Physics, Vol. 74)* / Ed. by G. Gruener. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1998. P. 51–109.

Материал поступил в редколлегию 07.07.2010

S. A. Kuznetsov, A. V. Arzhannikov, A. V. Gelfand, A. V. Zorenko, B. P. Gorshunov

**MULTICHANNEL RADIOMETRIC SYSTEM
FOR REGISTERING SUBMILLIMETER-WAVE RADIATION AT BEAM-PLASMA INTERACTION**

We describe a 4-channel radiometric system developed for registering pulses of submillimeter-wave radiation in the frequency band 210–530 GHz. The system employs a quasi-optical scheme with polarization demultiplexed channels, wherein subsequent frequency filtering and spectral signal detection are provided by quasi-optical bandpass filters and high-speed Schottky detectors respectively. The system has frequency resolution of the channels ~30–50 GHz and response time better than 2 ns and destined for registering emission of electromagnetic radiation in the vicinity of a double plasma frequency, which is produced at turbulent heating of dense plasma in the multimirror magnetic trap GOL-3 by a powerful relativistic electron beam of 10 microsecond duration.

Keywords: submillimeter-wave radiation, radiometry, quasi-optical selective elements, mesh filters, Schottky detectors, photolithography.