

УДК 539.1.044, 537.86.029.65/.79

**С. А. Кузнецов^{1,2}, А. Н. Генцелев², Б. Г. Гольденберг², В. И. Кондратьев²
А. В. Аржанников^{1,2}, М. К. А. Тумм¹, А. Г. Зелинский³**

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

² Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

³ Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН
ул. Кутателадзе, 18, Новосибирск, 630128, Россия

E-mail: SAKuznetsov@nsm.nsu.ru

СОЗДАНИЕ МЕТОДАМИ LIGA-ТЕХНОЛОГИИ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ФИЛЬТРОВ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СЕЛЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ*

В работе рассмотрены особенности применения методов LIGA-технологии при создании квазиоптических фильтров субтерагерцового диапазона на основе самонесущих микроструктур металлического и псевдометаллического типов. С учетом этих особенностей в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучений (СЦСТИ, ИЯФ СО РАН) изготовлены низко- и высокоаспектные индуктивные микроструктуры с топологией дипольных щелей, которые послужили селективными элементами в полосовых пропускающих фильтрах для интервала частот 0,25–0,45 ТГц. С использованием техники ЛОВ-спектроскопии проведена характеристика частотно-селективных свойств изготовленных фильтров. Показано хорошее согласие полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

Ключевые слова: LIGA-технология, микроструктуры, квазиоптические фильтры, частотно-избирательные поверхности, субтерагерцовое излучение, ЛОВ-спектроскопия.

Введение

В последнее десятилетие происходит интенсивное освоение диапазона субтерагерцовых и терагерцовых частот электромагнитного спектра (0,1–10 ТГц), открывающего новые возможности для фундаментальных и прикладных исследований в физике, химии, биологии, медицине, а также для систем связи, безопасности и др. [1–4]. Данная спектральная область, соответствующая интервалу длин волн от 3 мм до 30 мкм, удобно позиционирована между ИК и СВЧ диа-

пазонами, позволяя сочетать в терагерцовой аппаратуре инструментальные решения как оптической, так и микроволновой техники. Так, во многих случаях амплитудно-частотная, поляризационная и фазовая селекция пучков терагерцового излучения наилучшим образом обеспечивается при использовании квазиоптических селективных элементов на основе планарных регулярно-периодических металлизированных микроструктур (ММС) субволновой топологии, известных в микроволновой литературе как «частотно-избирательные поверхности»

* Технологическая работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России с использованием оборудования ЦКП СЦСТИ. Авторы признательны сотрудникам комплекса ВЭПП-3 за обеспечение возможности работ с СИ. Выполнение электродинамических вычислений, а также измерения на субтерагерцовом ЛОВ-спектрометре осуществлены при поддержке гранта 11.G34.31.0033 Правительства РФ, а также контракта 16.740.11.0377 Федеральной рамочной программы.

(ЧИП) [5]. ЧИП являются резонансными электродинамическими структурами, которые в отличие от дифракционных решеток эксплуатируются в режиме, когда резонансная частота лежит ниже точки возбуждения высших дифракционных гармоник. Как правило, в задачах полосовой фильтрации [4–8] применяются ЧИП с умеренными значениями параметра субволновости ($G \sim 0,3–0,7 \lambda$, где G – латеральный период расположения ячеек в плоскости ЧИП; λ – рабочая длина волны), в то время как при построении планарных метаматериалов [9] используются ЧИП с более мелкомасштабным топологическим рисунком ($G \ll \lambda$).

Отметим, что производство терагерцовых ММС, толщина металлизации которых выбирается малой по сравнению с характерными топологическими размерами в рабочей плоскости (так называемые низкоаспектные ММС), может быть обеспечено методами классической техники фотолитографии [10], ориентированной на создание микроструктур с топологическими размерами от нескольких единиц до сотен микрометров. В работах [11–16] нами реализован широкий класс терагерцовых селективных элементов на базе ММС фотолитографического типа, которые включают различные частотные фильтры, делители пучков, преобразователи фазы и поляризации, фокусирующие устройства, тонкие резонансные поглотители. Создание таких селективных элементов реализуется в отработанном цикле, включающем три ключевых этапа: 1) 3-мерный электродинамический анализ и оптимизация топологии ММС; 2) изготовление ММС методами фотолитографии на поверхности несущих металлизированных полимерных подложек; 3) тестирование изготовленных элементов на терагерцовых спектрометрах.

Подчеркнем, что, будучи относительно недорогой и хорошо разработанной для нужд микроэлектронной промышленности, фотолитография принципиально не позволяет получать качественные ММС с аспектным отношением¹ более 1,5–2. В то же время структуры со средними и высокими значениями аспектности оказываются востребованными в случае самонесущих ММС индуктивного типа, обладающих квазиполо-

совой АЧХ [17], поскольку позволяют в общем случае: а) увеличить добротность и крутизну полосы селекции; б) повысить механическую прочность и обеспечить самонесущность, устранив необходимость использования несущей полимерной подложки, неизбежно усиливающей диссипативные потери ММС; в) увеличить лучевую стойкость ММС при работе в мощных пучках излучения. Создание таких структур оказывается возможным при переходе от техники фотолитографии к LIGA-технологии [17–21]. Последняя базируется на методах глубокой рентгеновской литографии и предназначена для создания микроструктур в широком диапазоне толщин: от нескольких единиц до сотен микрон при аспектном отношении до 100 и более.

В настоящей работе рассмотрены технологические особенности изготовления ММС металлического и псевдометаллического типов с использованием техники LIGA, развиваемой в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучений (СЦСТИ, ИЯФ СО РАН). Излагаются основы техники ЛОВ-спектроскопии, использованной для характеристики изготовленных ММС в интервале частот 0,17–0,53 ТГц, а также проводится сопоставление экспериментальных данных с результатами электродинамического моделирования².

Методы LIGA создания микроструктур

Как указывалось выше, ключевая особенность LIGA-технологии состоит в использовании рентгеновской литографии вместо оптической, что позволяет снять принципиальное ограничение сверху на величину аспектного отношения производимых ММС. Такие возможности LIGA-технологии реализуются вследствие высокой проникающей способности рентгеновского излучения в слои рентгеночувствительного резиста, а также благодаря значительному уменьшению дифракционного размытия

¹ Под аспектным отношением микроструктуры понимается отношение ее толщины к минимальному топологическому размеру в латеральной плоскости.

² Отметим, что ключевые положения электродинамики ММС, важные для понимания спектрального «отклика» созданных микроструктур в субтерагерцовом диапазоне частот, будут представлены в работе: Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Тузм М. К. А. Особенности дифракции электромагнитных волн на регулярно-периодических индуктивных металлических структурах // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 1 (в печати).

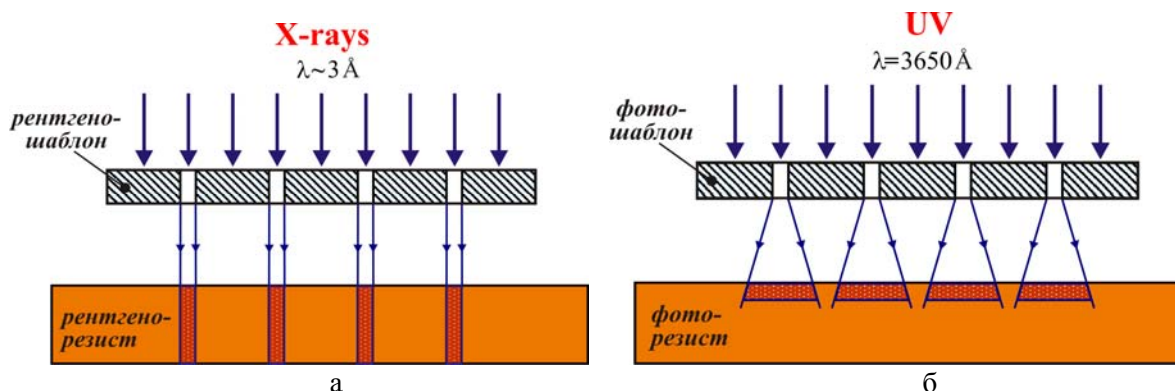


Рис. 1. Иллюстрация преимущества рентгеновской литографии (а) в сравнении с фотолитографией (б) при производстве высокоаспектных ММС

изображения при его литографической репликации ввиду существенного ($\sim 1\,000$ раз) уменьшения длины волны экспонирующего излучения.

Указанные преимущества рентгеновской литографии в сравнении с фотолитографией при производстве высокоаспектных ММС иллюстрируются на рис. 1. В обоих случаях топология ММС реплицируется через соответствующий шаблон в слое резиста толщиной, несколько превышающей толщину изготавливаемой микроструктуры. Использование жесткого рентгеновского излучения позволяет обеспечить равномерную по глубине засветку толстого слоя резиста и сформировать вертикальные стенки на границах «засвеченных» участков (рис. 1, а). В случае фотолитографии глубина проникновения излучения оказывается значительно ниже, так что облучение толстого слоя фоторезиста может быть получено за счет увеличения времени экспонирования, что приводит к размытию изображения вследствие паразитной Френелевской дифракции на фотошаблоне (рис. 1, б). Размытие, оцениваемое величиной $\sim (\lambda \cdot z)^{1/2}$, где λ – длина волны экспонирующего излучения, z – расстояние до анализируемой плоскости, чрезвычайно затрудняет формирование глубокой резистивной маски с вертикальными боковыми стенками.

При производстве обсуждаемых в настоящей работе ММС следует различать две их разновидности: *металлического типа* (обозначаемые ММС) и *псевдометаллического типа* (ПММС). Под индуктивной ММС понимается самонесущая структура, реализованная на основе цельного по тол-

щине металлического слоя. По определению, такая ММС не содержит внутри диэлектрического материала в отличие от ПММС, которая изготавливается путем покрытия поверхности структурированной пленки диэлектрика заданной толщины тонким слоем высокопроводящего металла. В последнем случае при толщинах металлизации больше толщины скин-слоя δ наличие подстилающего диэлектрика не сказывается на взаимодействии структуры с электромагнитной волной, поэтому электродинамические характеристики ПММС оказываются эквивалентными аналогичным характеристикам цельнометаллической ММС с идентичным топологическим рисунком (при значениях проводимости $> 10^7$ См/м значение δ составляет менее 0,5 мкм на частотах выше 0,1 ТГц).

Ниже кратко описаны технологические этапы производства ММС и ПММС, реализуемые в СЦСТИ.

Технология изготовления ММС

Ключевые этапы создания ММС металлического типа показаны на рис. 2. Технологический процесс начинается с химической чистки и полировки проводящей подложки (1), на поверхность которой центрифугированием наносится слой негативного резиста SU-8 (2). Подбором заданной частоты вращения центрифуги в диапазоне 500–8 000 об./мин, толщина слоя SU-8 при однократном нанесении может контролироваться в интервале от 10 до 100 мкм, определяя тем самым доступный диапазон тол-

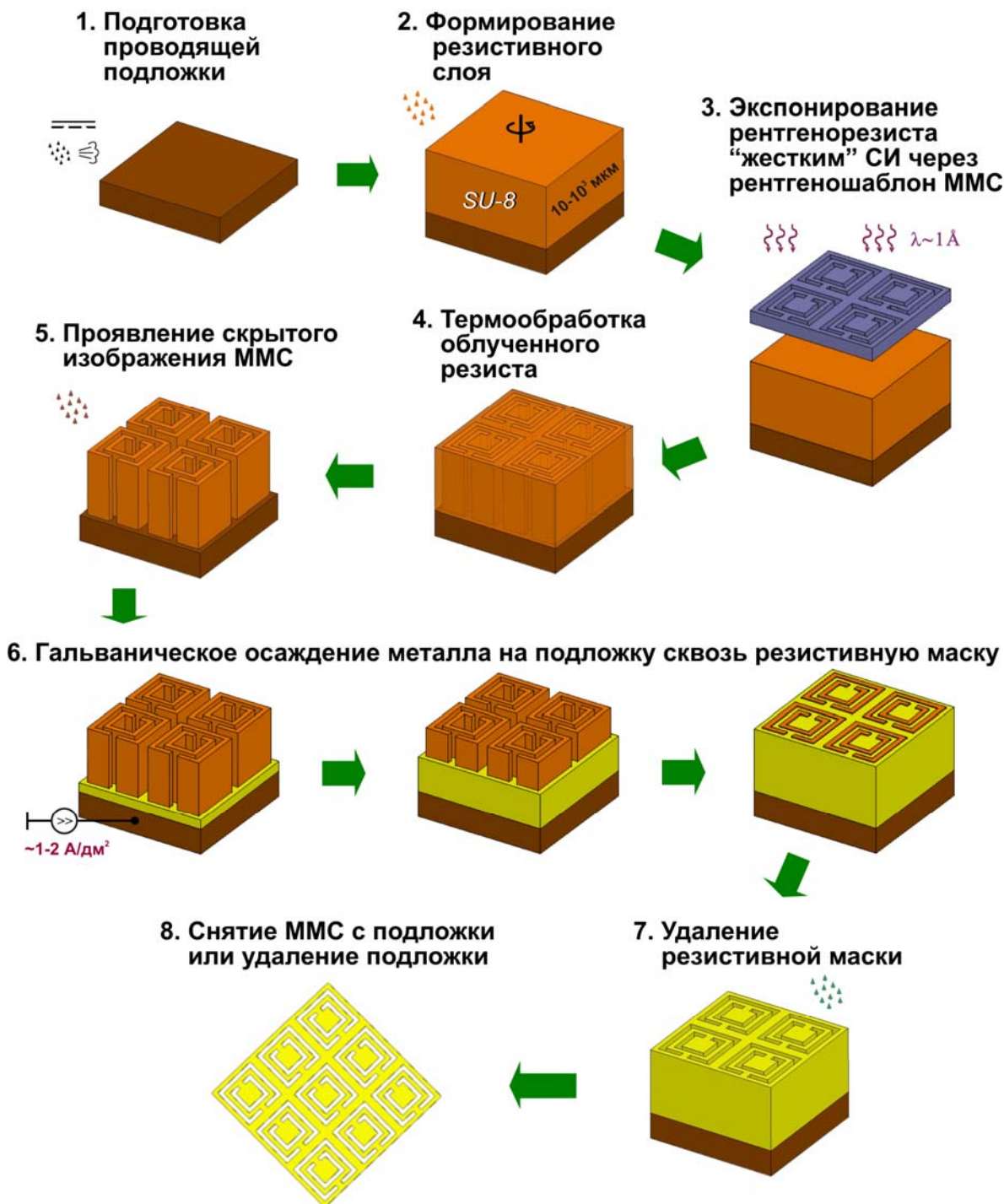


Рис. 2. Технологические этапы создания ММС

щин выходной ММС³. После закрепления рентгенорезиста последний подвергается

³ Создание слоев SU-8 толщиной > 100 мкм может быть осуществлено последовательным нанесением слоев меньшей толщины в сочетании с их термообработкой.

экспонированию «жестким» синхротронным излучением (СИ) на LIGA-станции СЦСТИ (3). Экспонирование осуществляется через заранее подготовленный рентгеношаблон (РШ), содержащий топологию изготавливаемой ММС. Скрытое изображение, образовавшееся в результате практически одно-

родной по глубине радиационной полимеризации рентгенорезиста и закрепленное на стадии постэкспозиционного отжига (4), далее проявляется путем химической обработки в органическом растворителе (5), приводящей к удалению необлученных участков резистивного слоя и образованию полимерной микроструктуры, топологический рисунок которой является инверсным к топологическому рисунку рентгеношаблона. Данная микроструктура имеет вертикальные стенки и выполняет роль маски, через которую на следующем этапе (6) осуществляется гальваническое осаждение (гальванопластика) металла на подложку. Очевидно, максимальная реализуемая толщина изготавливаемой таким образом ММС соответствует толщине резистивной маски. После удаления маски в органическом растворителе (7) созданная ММС отделяется от подложки либо механически, либо посредством селективного химического травления (8).

Отметим, что в настоящей работе основной акцент сделан на получение медных ММС, для которых процесс гальванопластики считается достаточно хорошо отработанным. Главный недостаток, впрочем, медных структур состоит в их подверженности коррозии в процессе эксплуатации при атмосферных условиях. Коррозия приводит к потере электропроводности в приповерхностном слое структуры, что ведет к деградации ее электродинамических характеристик. Для подавления корродирования поверхности медной ММС рекомендуется ее пассивация тонким слоем алюминия или золота.

Технология изготовления ПММС

В сравнении с описанной выше технологией изготовления ММС производство ПММС содержит меньшее число этапов и является менее трудоемким.

Рис. 3 иллюстрирует ключевые этапы создания псевдометаллических структур. Процесс изготовления структуры начинается с закрепления на опорном кольце сплошной полимерной пленки требуемой толщины, предварительно прошедшей стадию химической очистки (1). В качестве материала пленки нами предложено использование таких полимеров, как полиметилметакрилат (ПММА) и полиэтилентерефталат (ПЭТФ, известный также как майлар или

лавсан) – пленочных материалов, коммерчески доступных в ассортименте толщин от 10 до 1 000 мкм. Данные материалы оказываются хорошо подходящими для прямого экспонирования жестким СИ через рентгеношаблон (2), приводящего к разрыву полимерных связей, вследствие чего засвеченные участки пленки удаляются обработкой в органическом растворителе (3). В результате исходная пленка превращается в полимерную LIGA-структуру, топологический микрорисунок которой воспроизводит рисунок РШ. Поверхность данной структурированной пленки далее полностью покрывается тонким слоем высокопроводящего металла (4), завершая тем самым процесс создания ПММС.

Отметим, что для металлизации структурированной пленки в настоящей работе предложено использование операции посеребрения методом «реакции серебряного зеркала» – химического восстановления серебра из аммиачного раствора оксида Ag_2O , в который погружается пленочная структура. Концентрация раствора и продолжительность операции подобраны так, что толщина осаждаемого слоя серебра составляет ~ 1 мкм. Таким образом, описанная технология создания ПММС позволяет заменить присущие технологии ММС этапы гальванопластики, формирования и удаления резистивной маски и электропроводящей подложки на менее трудоемкую технологическую операцию – нанесение тонкого серебряного покрытия.

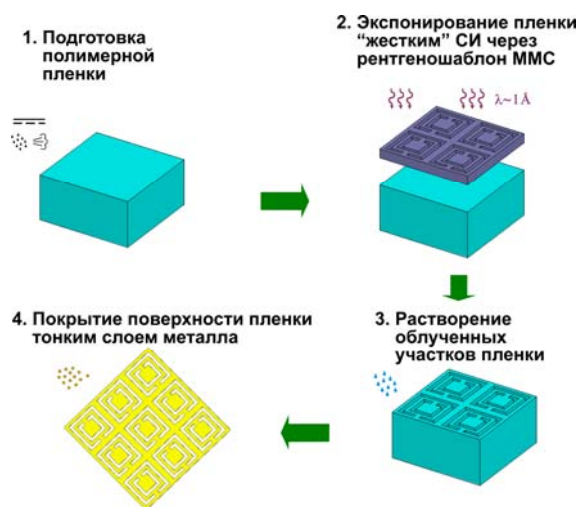


Рис. 3. Технологические этапы создания ПММС

LIGA-станция СЦСТИ

Технологическая разработка микроструктурных фильтров выполнена в СЦСТИ, где работы по рентгеновской литографии проводятся на LIGA-станции, смонтированной на канале вывода СИ из накопителя ВЭПП-3 [19].

На рис. 4 схематически показана геометрия эксперимента по рентгеновской литографии на LIGA-станции СЦСТИ. Синхротронное рентгеновское излучение генерируется релятивистскими электронами с кинетической энергией 2 ГэВ, циркулирующими в накопительном кольце ВЭПП-3 при прохождении ими трехполюсного вигглера с магнитным полем 2 Тл. Пучок СИ, сформированный элементами канала вывода излучения, выводится в рабочую область станции через набор бериллиевых фольг, имеющих суммарную толщину 500 мкм. Ве-фольги обеспечивают вакуумную развязку рабочих объемов накопителя и LIGA-станции и имеют низкий коэффициент удельного поглощения излучения. Рис. 5 иллюстрирует характерный спектр приве-

денной плотности мощности рентгеновских квантов до и после прохождения бериллиевых фольг при типичном токе электронов 100 мА в накопителе ВЭПП-3. Использование столь «жесткого» излучения ($\lambda \sim 1 \text{ \AA}$) позволяет обеспечить достаточно однородное экспонирование рентгенорезистов на глубину до 1 мм. Спектр СИ при необходимости может корректироваться дополнительным фильтром, устанавливаемым после выходной Ве-фольги, после которого располагаются секции для размещения рентгеношаблона и экспонируемого образца.

Отметим, что в области LIGA-станции апертура пучка СИ составляет 50 мм в горизонтальной плоскости и около 5 мм в вертикальной (рис. 6). Для экспонирования рентгенорезистов большей площади (до $100 \times 100 \text{ мм}^2$) используется система микропозиционеров, осуществляющих прецизионное механическое перемещение платформы с образцом относительно пучка падающего излучения.

Одной из важных характеристик в LIGA-технологии является контрастность рентгеношаблона K , которая определяется как

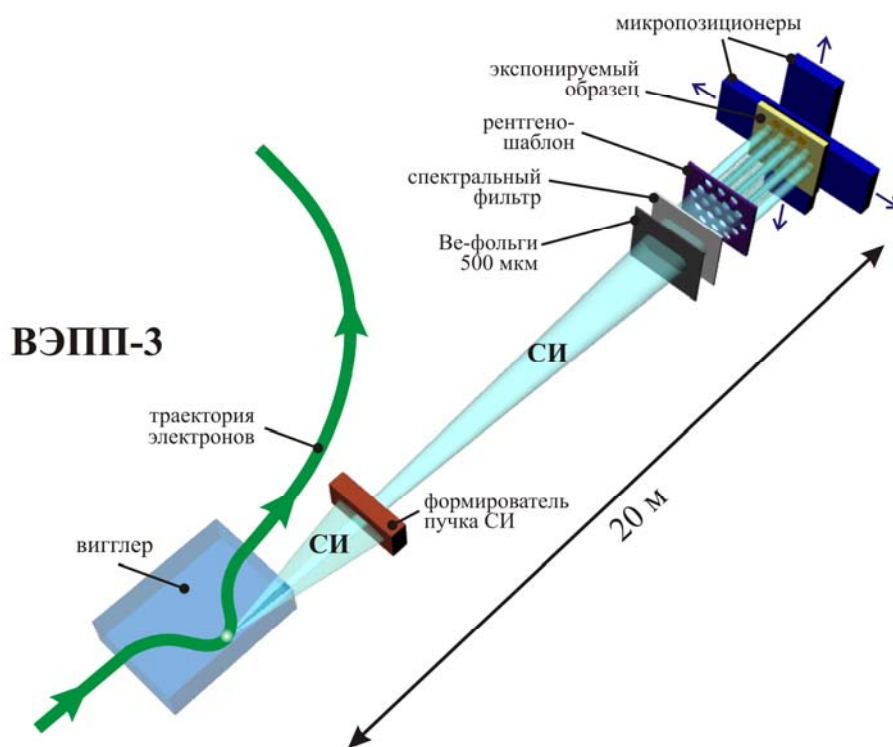


Рис. 4. Геометрия эксперимента по рентгеновской литографии на LIGA-станции СЦСТИ

отношение удельных поглощаемых в резисте мощностей под «рентгенопрозрачными» и «рентгенонепрозрачными» участками РШ. Обычно критерием получения качественных результатов при создании рентгенолитографических структур служит условие $K \geq 100$. Контрастность РШ зависит главным образом от материалов его изготовления, спектра падающего СИ и в значительно меньшей степени от используемого рентгенорезиста. Рис. 7 иллюстрирует расчетные зависимости контрастности K от толщины d для РШ, выполненных основе различных металлов. Кривые соответствуют случаю спектра СИ на LIGA-станции после фильтрации Ве-фольгами (см. рис. 5). Приведенные данные, в частности, дают возможность оценить необходимую толщину металлизации для ММС, позволяющую использовать их в качестве рентгеношаблонов при тиражировании аналогичных образцов. Так, для технологически более дешевых ММС на базе никеля и меди критерий $K \geq 100$ обеспечивается при условиях $d_{Ni} \geq 52$ мкм и $d_{Cu} \geq 54$ мкм соответственно.

Результаты технологических экспериментов

В настоящей работе при производстве ММС металлического и псевдометаллического типов использовались два типа рентгеношаблонов, роль которых выполняли никелевые сетки от телевизионных кинескопов. Обе сетки имели регулярный топологический микрорисунок, сформированный сквозными щелевыми отверстиями, вытянутыми вдоль горизонтальной оси и имеющими горизонтальное смещение соседних по вертикали рядов на величину, равную половине горизонтального периода (рис. 8). В табл. 1 приведены геометрические параметры никелевых сеток согласно обозначениям рис. 8. Отметим, что в исходных сетках отверстия имели конический профиль с размерами $B1_x \times B1_y$ на лицевой стороне и $B2_x \times B2_y$ на тыльной. Толщина сеток составляла около 200 мкм, что автоматически обеспечило критерий высокой контрастности используемых РШ (см. рис. 7).

Все ММС металлического типа, реализованные в настоящей работе, представляли собой медные структуры, при производстве которых нами использована конструкция

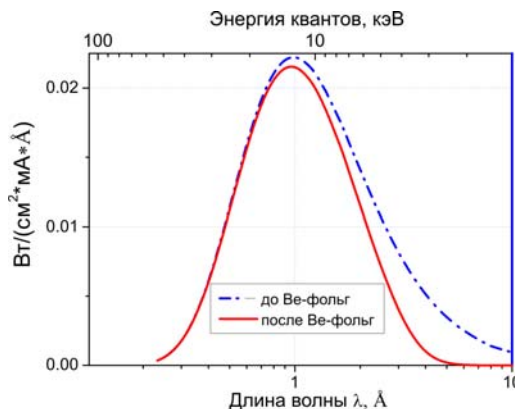


Рис. 5. Характерный спектр приведенной плотности мощности рентгеновских квантов до и после прохождения бериллиевых фольг

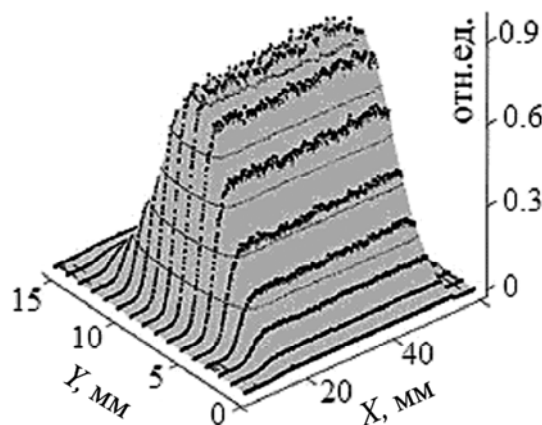


Рис. 6. Экспериментально измеренный профиль пучка СИ на LIGA-станции (при расстоянии ~ 20 м от источника излучения). Ограничение апертуры пучка по оси X (~ 50 мм) обусловлено геометрией канала вывода излучения, в то время как по оси Y (~ 5 мм) связано с угловой расходимостью СИ, основная мощность которого сосредоточена в медианной плоскости накопителя в угле $\theta \cong 1/\gamma$, где γ – релятивистский фактор электронов

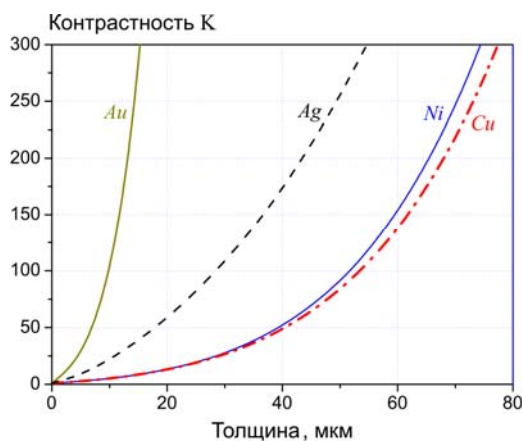


Рис. 7. Расчетные зависимости контрастности металлических рентгеношаблонов от их толщины. Расчет соответствует случаю рентгенорезиста на основе ПММА

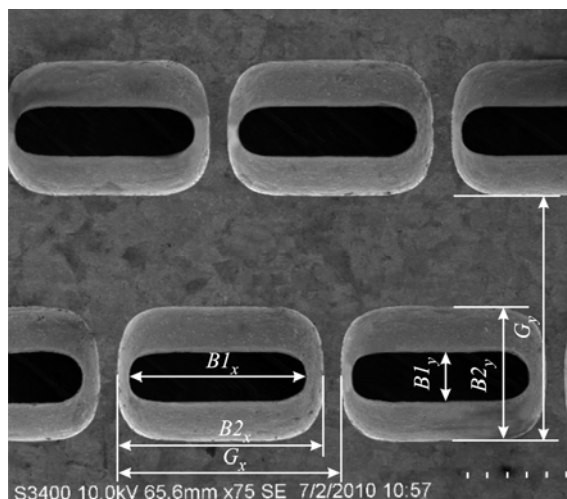
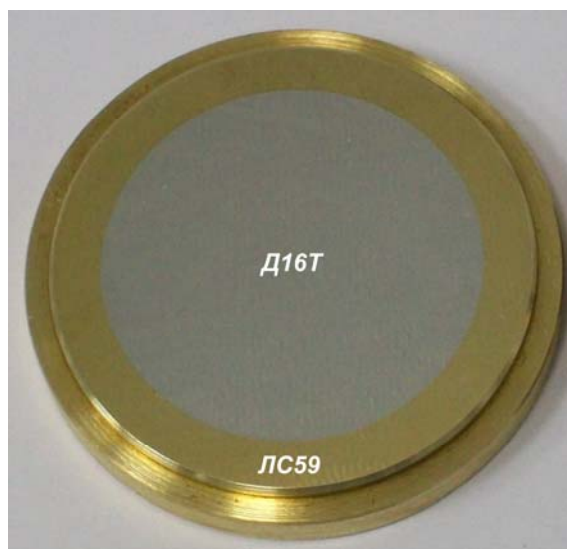


Рис. 8. Микрофотография топологического рисунка никелевой сетки, использованной в качестве рентгеношаблона



а



б

Рис. 9. Фотографии исходной составной подложки до напыления медного подслоя (а) и изготовленной медной ММС, закрепленной гальванически на опорном кольце (б)

с фиксацией ММС на массивном опорном кольце из латуни (сплав ЛС59), удерживающем структуру от провисания [21]. На начальной стадии изготовления в опорное кольцо с внутренним диаметром $\varnothing 40$ мм запрессовывался диск из дюралюминия (сплав Д16Т), после чего производилась их совместная шлифовка для создания «единой» рабочей поверхности, поверх которой осуществлялось напыление тонкого (0,2–0,5 мкм) слоя меди (рис. 9, 10). После выполнения описанных выше технологических операций (см. рис. 2, 10) запрессованный диск из Д16Т удалялся селективным химическим травлением, после которого гальванически выращенная самонесущая медная ММС оказывалась механически прочно закрепленной на латунном кольце (рис. 9, б).

Важно отметить, что при изготовлении ММС коническая форма щелей использованного РШ неизбежно приводит к неоднородности контраста, вследствие чего распределение дозы, поглощенной в облучаемом рентгенорезисте, имеет плавный градиент от минимальной в размере более $B2_x \times B2_y$ до максимальной в размере менее $B1_x \times B1_y$. Поскольку скорость проявления экспонированного резиста зависит от поглощенной дозы, то вариации времен облучения и проявления резиста приводят к получению образцов ММС, итоговый размер щелей $B_x \times B_y$, которых принимает некоторое значение из интервала от $B1_x \times B1_y$ до $B2_x \times B2_y$. Данное обстоятельство объясняет разброс указанных параметров изготовленных нами структур, проявившийся при отработке технологических этапов LIGA-производства.

В табл. 2 приведены параметры металлических и псевдометаллических структур, изготовленных и исследованных в данной работе⁴. ММС включают четыре медные структуры с толщиной от 7 до 82 мкм, полученные с использованием рентгеношаблона #1. ПММС включают одну структуру, реализованную по РШ #1 из лавсановой пленки толщиной 40 мкм, а также одну структуру, изготовленную по РШ #2 из пленки органического стекла марки ТОСП (содержание ПММА $\geq 99,8\%$) толщиной $1\,074 \pm 5$ мкм. Поясним, что на проведенном этапе исследований отработка технологии

⁴ Значения B_x, B_y следует рассматривать как среднеквадратичные (усредненные по рабочему полю структуры) с дисперсией $\sim 1,5$ мкм.

Таблица 1

Геометрические параметры никелевых РШ

Тип РШ	Период расположения щелей, мкм		Длина щелей, мкм		Ширина щелей, мкм	
	G_x	G_y	B_{1x}	B_{2x}	B_{1y}	B_{2y}
#1	630	796	497	583	138	384
#2	546	600	421	505	120	333

Таблица 2

Параметры изготовленных структур

Тип структуры	Использованный РШ	Длина щелей, мкм	Ширина щелей, мкм	Толщина, мкм
		B_x	B_y	t
ММС #1 (медная)	#1	539	230	7
ММС #2 (медная)	#1	533	217	14
ММС #3 (медная)	#1	509	203	50
ММС #4 (медная)	#1	505	201	82
ПММС #1 (лавсан + серебрение)	#1	538	238	42
ПММС #2 (ПММА + серебрение)	#2	425	123	1 076

гальванического осаждения меди была ограничена получением медных ММС с толщинами до 100 мкм, поэтому из представленных структур к высокоаспектным можно отнести только ПММС #2.

На рис. 11–14 представлены фотографии металлизированных структур и их резистивных масок, изготовленных по описанным выше технологиям. Можно отметить хорошую вертикальность стенок в щелевых отверстиях, обеспечиваемую рентгеновской литографией. Технологические опыты также выявили, что при изготовлении ПММС использование реакции «серебряного зеркала» приводит к возникновению серебряной бахромы по контуру щелевых отверстий (см. рис. 13, б, 14, а), связанной, по-видимому, с коллоидной природой осаждаемых частиц серебра. Терагерцовая характеристика ПММС, впрочем, показала, что «эффект бахромы» не приводит к заметному ухудшению их электродинамических характеристик.

Спектральная характеристика изготовленных образцов

Для измерения спектральных характеристик изготовленных образцов металличе-

ских и псевдо-металлических структур в настоящей работе использован квазиоптический субтерагерцовый ЛОВ-спектрометр разработки ИОФ РАН им. А. М. Прохорова (Москва) [22], установленный в лаборато-

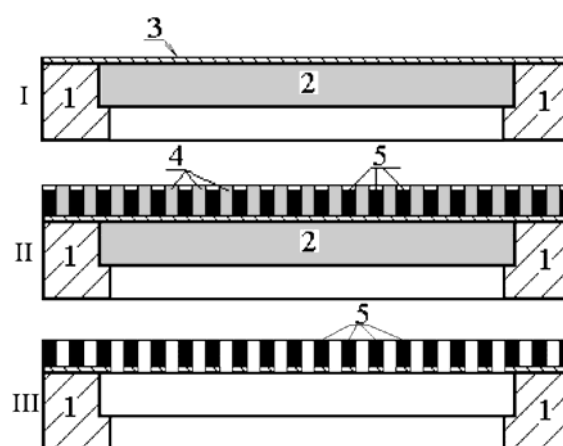


Рис. 10. Иллюстрация процесса изготовления медной ММС: I – исходная составная подложка, содержащая латунное опорное кольцо 1 с запрессованным диском 2 из дюралюминия и напыленный на их общую поверхность медный подслей 3; II – составная подложка с резистивной маской 4 из SU-8, через которую на подслоя 3 проведено электрохимическое осаждение слоя меди 5; III – итоговая самонесущая медная ММС после удаления диска 2 и резистивной маски 4

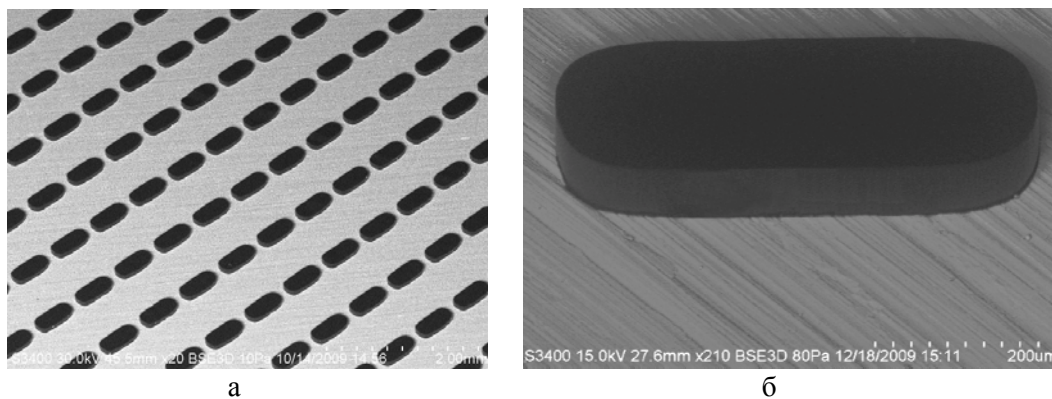


Рис. 11. SEM фотографии фрагментов макроскопического поля (а) и элементарной ячейки (б) резистивной маски из SU-8, использованной при изготовлении медной MMC #3

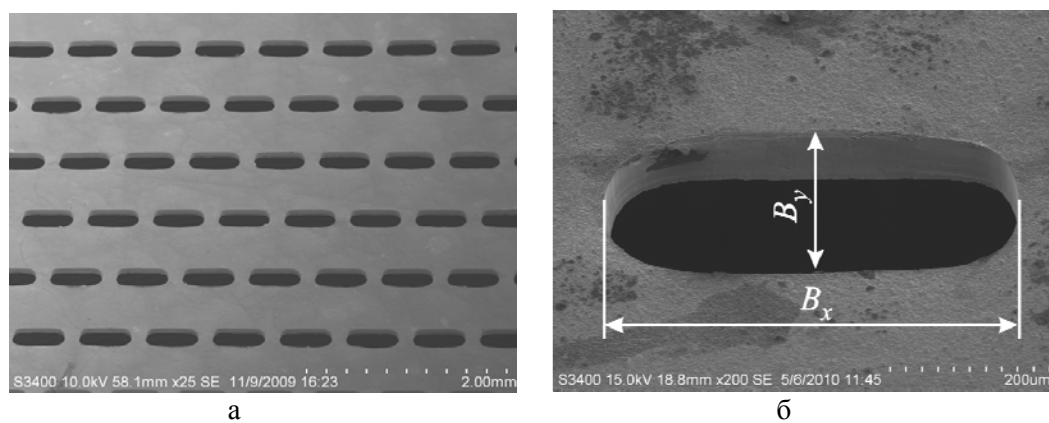


Рис. 12. SEM фотографии фрагментов макроскопического поля (а) и элементарной ячейки (б) изготовленной медной MMC #3

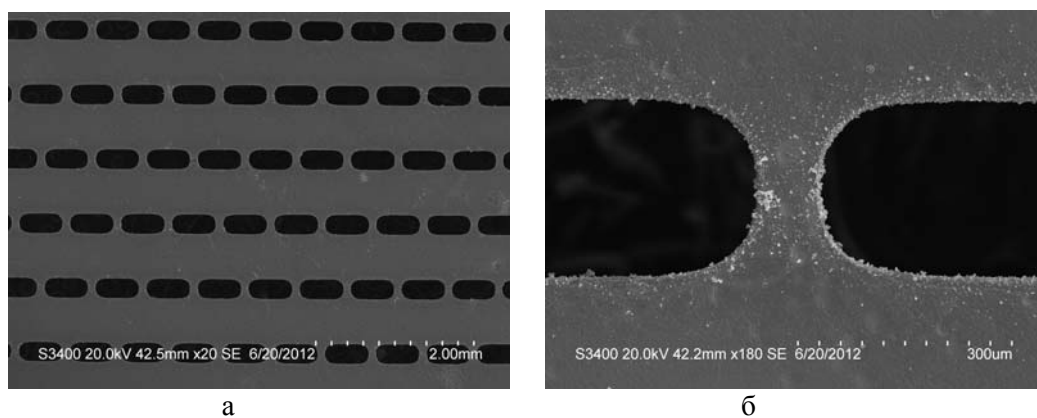


Рис. 13. SEM фотографии фрагментов макроскопического поля (а) и элементарной ячейки (б) ПММС #1 после нанесения серебряного покрытия

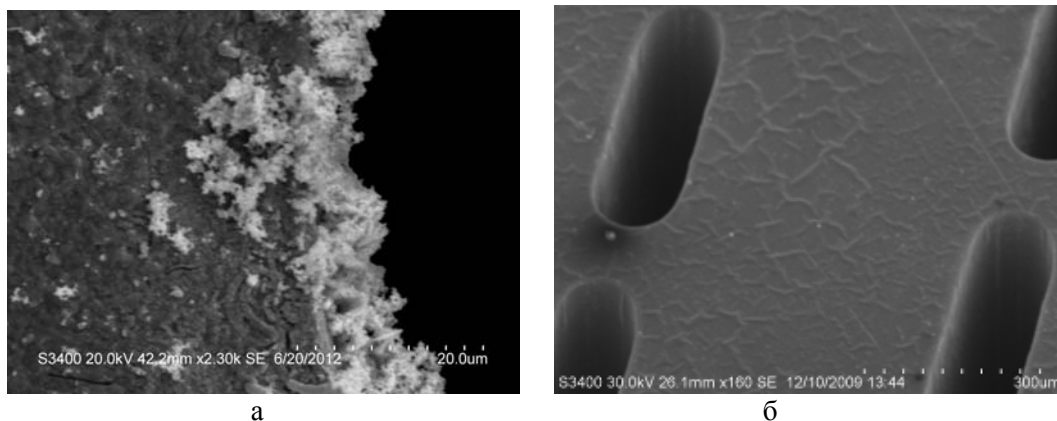


Рис. 14. SEM фотографии (а) увеличенного участка края щелевого отверстия ПММС #1 (видна структура серебряной бахромы) и (б) ПММС #2 до нанесения серебряного покрытия

рии перспективных исследований миллиметрового и терагерцового излучений (ЛПИМТИ) НГУ. Данный тип прибора относится к спектрометрам класса «frequency domain», в котором спектр пропускания (отражения) измеряется при облучении образца непрерывным монохроматическим излучением с плавно перестраиваемой длиной волны. Источником такого излучения в ЛОВ-спектрометре служат электровакуумные генераторы – лампы обратной волны (ЛОВ), выходная частота которых может перестраиваться в диапазоне до 1,5–2 октав посредством управляющего высокого напряжения (0,5–6 кВ) от внешнего электронного блока. В настоящее время в состав ЛОВ-спектрометра ЛПИМТИ входит комплект различных ЛОВ, диапазон частот которых перекрывает интервал 0,05–0,53 ТГц. Верхняя граница данного интервала при необходимости расширяется до 1,5 ТГц за счет использования полупроводниковых умножителей частоты («Virginia Diodes Inc.», США)⁵, которые пристыковываются к выходному фланцу соответствующей ЛОВ через волноводный переход. Для широкополосного детектирования субтерагерцового сигнала в спектрометре используется высокочувствительный оптоакустический приемник (ОАП или «ячейка Голя») с синхронным усилителем, работающий на частоте модуляции 23 Гц.

Ниже приведено описание техники квазиоптических измерений комплексного коэффициента пропускания исследованных образцов ММС и ПММС, полученные экспериментальные данные для которых далее

сопоставляются с результатами электродинамического моделирования в пакете ANSYS HFSS™ v.12⁶.

Техника квазиоптических измерений

Для измерений комплексного коэффициента пропускания образцов в ЛОВ-спектрометре используется оптическая схема поляризационного интерферометра Маха – Цандера, показанная на рис. 15.

В приведенной схеме терагерцовое излучение выходит из ЛОВ в форме дифракционно-расходящегося пучка, который сводится в параллельный пучок с помощью полиэтиленовой линзы, устанавливаемой на выходе лампы (рис. 15, а). Поскольку ЛОВ генерирует линейно поляризованное излучение, то ее ориентация в магнитной системе выбирается такой, чтобы вектор выходной поляризации располагался в горизонтальной плоскости спектрометра (рис. 15, б). Коллимированный субтерагерцовый пучок проходит далее сквозь сеточный Поляризатор, пропускающий электрическую компоненту поля, перпендикулярную одномерным металлическим проволочкам, из которого он сформирован⁷. В стандартной схеме прово-

⁶ High Frequency Structure Simulator. ANSYS Corporation. URL: <http://www.ansys.com/>

⁷ Используемые в спектрометре поляризатор, анализатор и поляризационные делители представляют собой одномерные сетки из тонких вольфрамовых проволочек, натянутых на металлические оправы с диаметром лучевой апертуры \varnothing 88 мм. Период расположения и диаметр проволочек в сетках составляет 60 мкм и \varnothing 15 мкм соответственно, что обеспечивает высокие поляризующие свойства сеток при работе на частотах до 1,5 ТГц и выше.

⁵ См.: <http://vadiodes.com/>

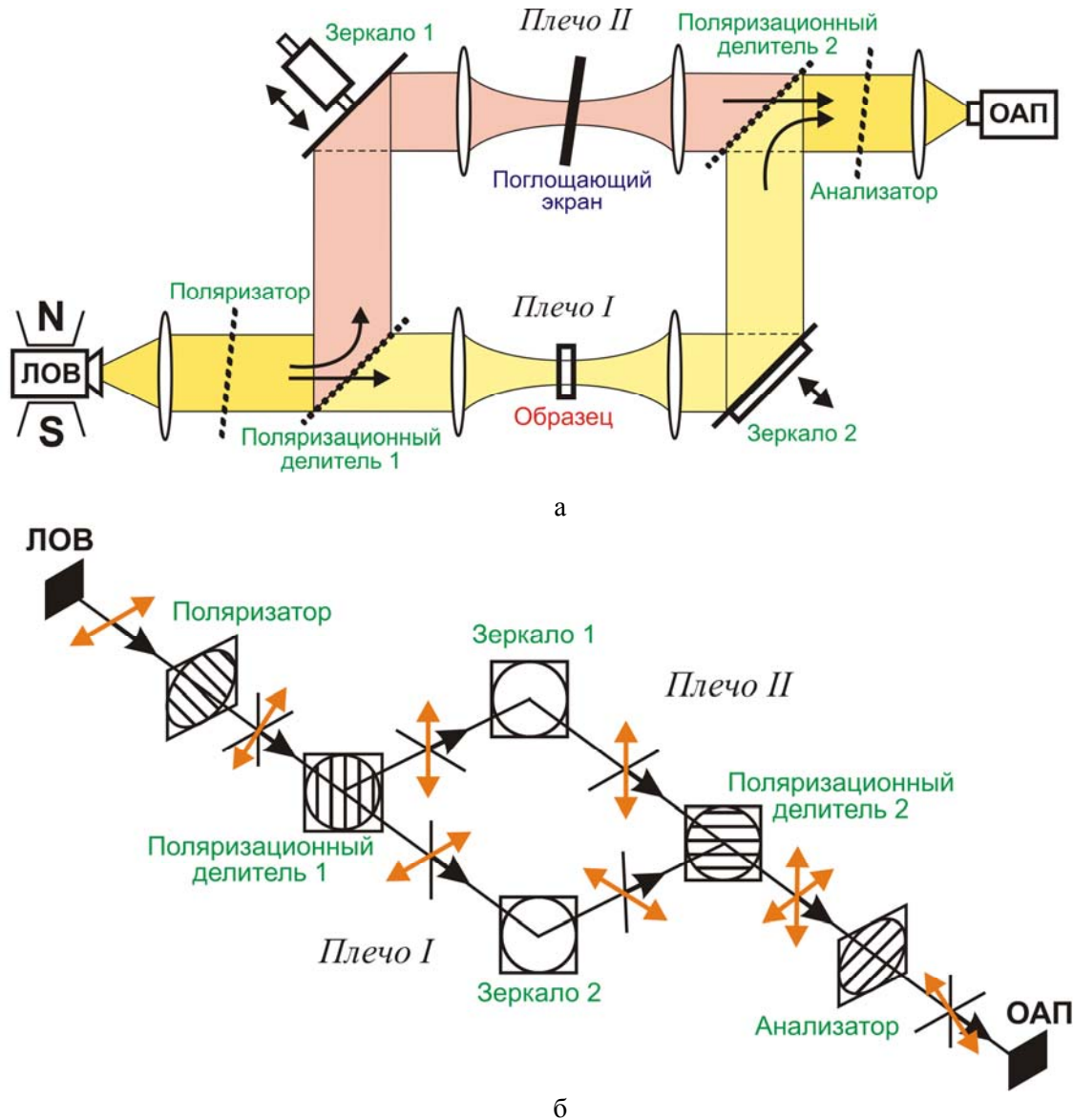


Рис. 15. Принципиальная оптическая схема поляризационного интерферометра Маха – Цандера, используемого в ЛОВ-спектроскопии (а); схема ориентации сеточных поляризационных элементов и направление векторов поляризации распространяющихся пучков (черные линии и стрелки указывают направление распространения, светлые – поляризацию излучения) (б)

лочки поляризатора ориентируются под углом 45° к горизонтали, что делает поляризацию прошедшего пучка соответственно повернутой на 45° относительно входной поляризации. После прохождения поляризатора излучение разделяется на 2 пучка с помощью сеточного поляризационного делителя 1, установленного под углом 45° относительно оптической оси спектрометра и имеющего вертикальную ориентацию проволочек. Вследствие 45-градусного поворота плоскости входной поляризации от-

носительно вертикали, интенсивности прошедшего и отраженного от делителя пучков оказываются одинаковыми, а вектора их поляризации взаимно ортогональны – параллельны горизонтальной и вертикальной плоскостям соответственно.

Прошедшее сквозь делитель излучение попадает в измерительное плечо I спектрометра, куда помещается исследуемый образец. Излучение, отраженное от делителя, направляется зеркалом 1 в параллельное плечо II, которое выполняет функцию опор-

ного канала. После прохождения плеч пучки сводятся вместе с помощью поляризационного делителя 2, проволочки которого ориентированы ортогонально к проволочкам 1-го делителя (горизонтально). Сведенные пучки имеют взаимно-ортогональную поляризацию, поэтому для создания интерференции пучков на выходе делителя помещается сеточный анализатор, имеющий 45-градусную ориентацию проволочек относительно вертикальной оси. Анализатор пропускает ортогональную проволочкам компоненту электрического вектора пучков, интерференция которых регистрируется в фокальной плоскости выходной линзы с помощью оптоакустического приемника.

Отметим, что диаметр лучевой апертуры используемых в ЛОВ-спектрометре линз составляет 50 мм (при фокусном расстоянии 60 или 120 мм), что делает малыми дифракционные потери излучения на их апертуре, поскольку основная доля мощности субтерагерцового пучка, формируемого выходной линзой ЛОВ, сосредоточена в области диаметром менее 20 мм [15]. Аналогично для минимизации паразитных эффектов дифракции на апертуре исследуемых образцов при их спектральной характеристике рекомендуется использовать образцы с диаметром рабочего поля не менее 40 мм. При работе с образцами малых размеров в ЛОВ-спектрометре предусмотрено использование дополнительной пары конфокальных линз, обеспечивающих фокусировку пучка излучения на исследуемом образце (см. рис. 15, а). В этом случае в опорное плечо II также вводится аналогичная пара линз для компенсации изменения оптического пути субтерагерцового пучка, распространяющегося в измерительном плече I.

Описанная схема ЛОВ-спектрометра предназначена для прямого измерения амплитуды и фазы коэффициента пропускания планарных образцов. При амплитудных измерениях используется только измерительное плечо I интерферометра, прохождение пучка в плече II которого блокируется введением непрозрачного поглощающего экрана (см. рис. 15, а). В этом случае энергетический коэффициент пропускания $|S_{21}|^2$ определяется как отношение интенсивности I_{sample} прошедшего через образец излучения к регистрируемой интенсивности $I_{\text{no sample}}$ в отсутствие образца:

$$|S_{21}|^2 = \frac{I_{\text{sample}}}{I_{\text{no sample}}}.$$

Отметим, что при амплитудных измерениях амплитудная модуляция субтерагерцового сигнала с частотой 23 Гц достигается за счет использования механического obtюратора (чоппера), размещаемого вместе с блоком тонкопленочных аттенуаторов за выходной линзой ЛОВ (на рис. 15 не показаны).

При фазовых измерениях используются оба плеча интерферометра. В этом случае obtюратор не применяется, а модуляция сигнала обеспечивается за счет механической вибрации поверхности зеркала 2. Собственно, проводимая в автоматизированном режиме (при перестройке частоты генерации ЛОВ) процедура измерения фазы пропускания $\text{Arg}(S_{21})$ представляет собой процесс записи положения X зеркала 1, которое, будучи подвижным, автоматически подстраивается для поддержания в минимуме значения интерференционного сигнала, регистрируемого ОАП. В этом случае при характеристике образца толщиной d искомая фаза $\text{Arg}(S_{21})$ вычисляется по измеренным положениям зеркала 1 при наличии (X_{sample}) и отсутствии ($X_{\text{no sample}}$) образца в измерительном плече I согласно следующей формуле⁸:

$$\text{Arg}(S_{21}) = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot (X_{\text{sample}} - X_{\text{no sample}} + d).$$

Следует обратить внимание, что для устранения неоднозначности определения порядка интерференции q при измерении положений X_{sample} и $X_{\text{no sample}}$ в конфигурации спектрометра реализована функция автоматического определения 0-го интерференционного порядка. Режим $q = 0$ соответствует равной величине оптического пути в различных плечах интерферометра, что позволяет исключить частотную дисперсию в положении зеркала 1 при отсутствии образца. Данный режим является оптимальным для фазовых измерений и, как правило, инициируется в начале эксперимента.

⁸ Здесь предполагается, что пространственный набег фазы для плоской электромагнитной волны, прошедшей путь Δr , определяется множителем вида $\exp(-j \cdot \mathbf{k} \cdot \Delta r)$, где \mathbf{k} – волновой вектор.

*Результаты спектральных измерений
и их обсуждение*

На рис. 16 представлены результаты спектральной характеристики шести изготовленных в настоящей работе структур металлического и псевдометаллического типов (см. табл. 2), полученные с применением описанной техники ЛОВ-спектроскопии. При измерениях использовались две лампы обратной волны, суммарно перекрывающие интервал частот 0,17–0,53 ТГц. Приведенные амплитудные и фазовые спектры относятся к нулевой дифракционной гармонике (моды Флоке (0, 0)), поляризованной поперек щелевых отверстий. Для ортогональной поляризации данные не приводятся ввиду низкой прозрачности структур и отсутствия выраженных резонансов пропускания⁹. Расчетные кривые (сплошные линии) соответствуют режиму строго нормального падения, в то время как при получении экспериментальных зависимостей (точки) мы вынуждены были использовать слабый закос ММС относительно оптической оси для подавления паразитного искажения их частотных характеристик стоячими волнами, которые эффективно возбуждаются в квазиоптическом тракте в случае присутствия на пути распространяющегося субтерагерцового пучка нормальных поверхностей с высоким коэффициентом отражения. Поясним, что приведенное на каждом из графиков значение σ соответствует величине проводимости металлизации ММС, обеспечивающей наилучшее совпадение результатов измерений с теорией.

На основе представленных данных (см. рис. 16) можно заключить о хорошем согласовании расчетных и экспериментальных зависимостей в целом. Наибольшее расхождение наблюдается в окрестности брэгговских частот – точек возбуждения высших дифракционных гармоник, где в теории пропускание основной моды обращается в ноль, а фаза пропускания претерпевает скачкообразное изменение. Из расчета нормального падения значения брэгговских частот, попадающих в рассмотренную спектральную область для ММС #1–4 и ПММС #1, равны 0,3766 и 0,5118 ТГц, что отвечает точкам возбуждения соответственно двух дифракционных гармоник с индексами (0, –1) и

(0, +1) и четырех гармоник с индексами (–1, –1), (–1, 0), (+1, 0) и (+1, +1). Для менее масштабной ПММС #2 на исследуемый спектральный интервал приходится только первая брэгговская частота – 0,4997 ТГц, соответствующая возбуждению (0, –1) и (0, +1) гармоник. Существенно, что именно в окрестности брэгговских резонансов АЧХ и ФЧХ являются наиболее чувствительными к угловой юстировке ММС, неидеальностям зондирующего терагерцового пучка и квазиоптического тракта, а также к технологическим микродефектам структур, обуславливая тем самым дискрипанс расчетных и измеренных характеристик.

Из рис. 16 можно видеть, что рассмотренные структуры демонстрируют квазиполосовые АЧХ с высокими значениями в максимуме пропускания (82–99 %), что позволяет их использовать в качестве эффективных полосовых фильтров для задач частотной селекции. Опуская здесь детальное обсуждение электродинамических особенностей ММС, которые подробно отражены в работе [17]¹⁰, отметим представляющие в контексте LIGA-разработок интерес следующие основные эффекты, связанные с конечной толщиной структур: а) проявление волноводных свойств щелевых отверстий и ассоциируемого с ними эффекта волноводной отсечки, обуславливающего высокую крутизну низкочастотного фронта АЧХ «толстой» ММС (ПММС); б) эффект Фабри – Перо (возбуждение стоячих волн внутри элементарной волноводной ячейки вследствие частичного отражения проходящей волны от границ структуры, приводящее к модуляции спектрального пропускания). На рис. 16, б указанные эффекты хорошо идентифицируются для высокоаспектной ПММС #2. Для низкоаспектных структур первый из отмеченных эффектов обуславливает высокочастотное смещение и увеличение добротности основного резонанса пропускания по мере роста толщины металлизации t структур. Последнее прослеживается на рис. 16, а, хотя данное сопоставление не является абсолютно корректным, поскольку для изготовленных ММС #1–4 увеличение толщины t сопровождается также некоторым сокращением размеров щелевых отверстий вследствие технологических уходов (см. табл. 2).

⁹ См. готовящуюся к публикации работу: Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Тумм М. К. А. Особенности дифракции электромагнитных волн...

¹⁰ Там же.

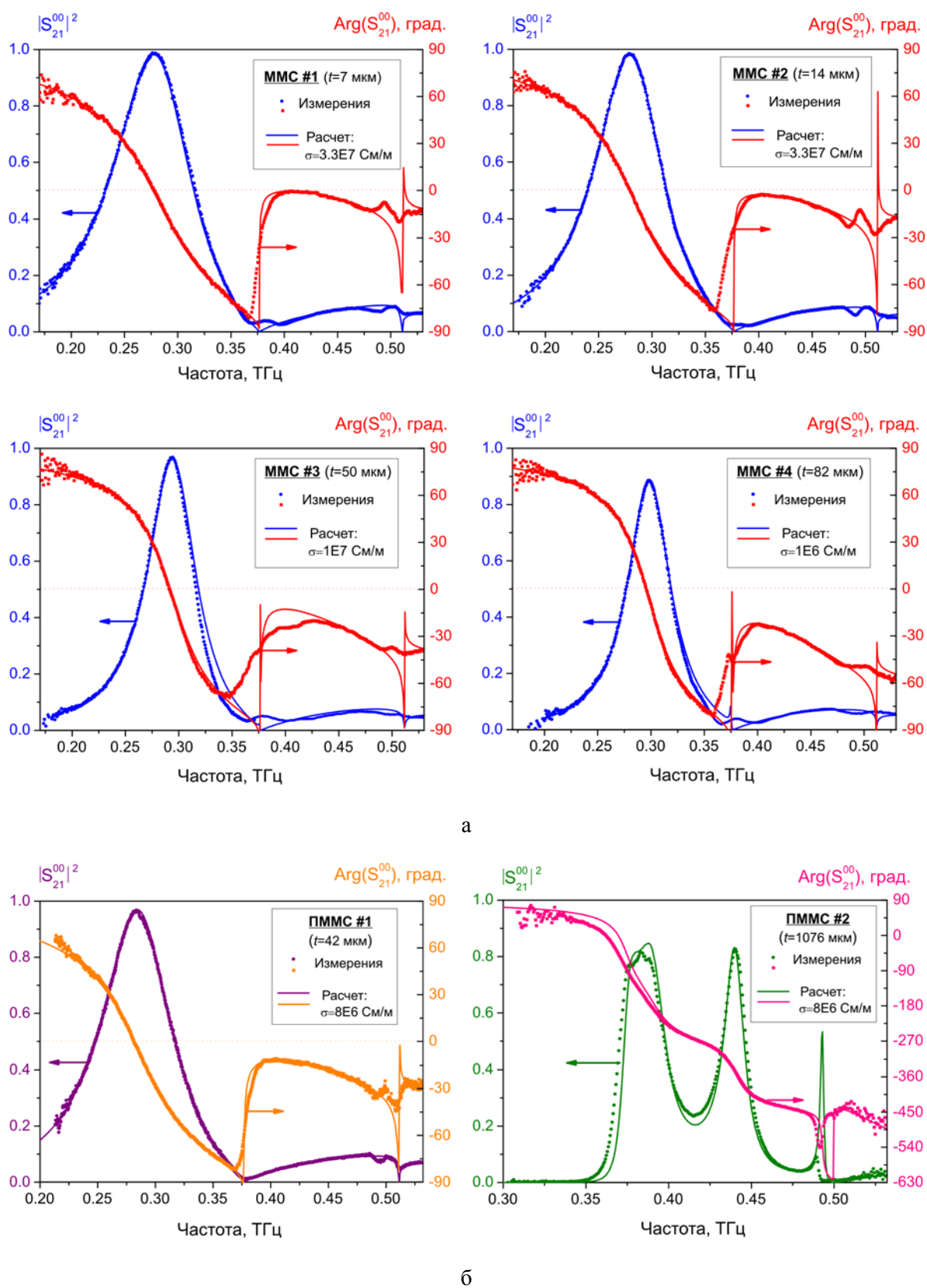


Рис. 16. Сопоставление расчетных зависимостей с результатами спектральных измерений амплитуды $|S_{21}|^2$ и фазы $\text{Arg}(S_{21})$ коэффициента пропускания нулевой дифракционной моды для изготовленных ММС металлического (а) и псевдометаллического (б) типов

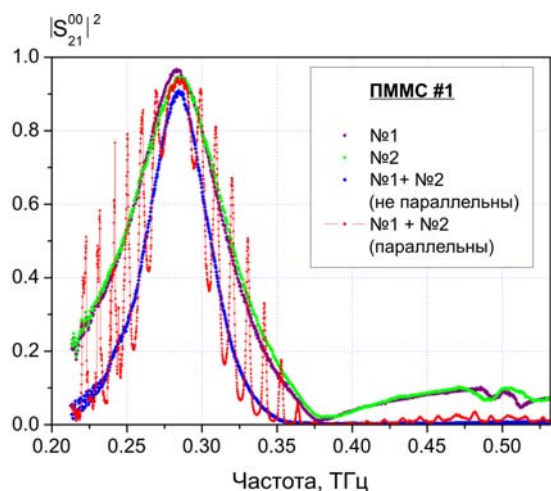


Рис. 17. Спектральная зависимость пропускания двух образцов ПММС #1 и собранных из них мультиплексных фильтров с правильным (непараллельным) и неправильным (параллельным) взаимным расположением одиночных ПММС

Следует отметить, что для структур металлического типа с ростом толщины t наблюдается падение максимума прозрачности, которое в теории связывается с уменьшением проводимости ММС (см. рис. 16, а). Под проводимостью σ в данном случае нужно понимать эффективную высокочастотную проводимость поверхностного слоя металлизации, ухудшение которой обусловлено, по-видимому, увеличением микрошероховатостей, локальных микродефектов, а также окислением поверхности вблизи краев щелевых отверстий, где, как показано в моделировании¹¹, происходит концентрация электромагнитного поля и индуцированного поверхностного тока, определяющих диссипативные потери структуры. Обратим внимание, что в случае псевдометаллических структур эффективная поверхностная проводимость фактически не зависит от толщины структуры (см. рис. 16, б) и, несмотря на выявленный в ходе производства ПММС «эффект бахромы» (см. рис. 14, а), имеет даже для высокоаспектных ПММС #2 с толщиной 1076 мкм значительно более высокое значение ($\sigma = 8 \cdot 10^6$ См/м), чем эффективная проводимость гальванически выраженных низкоаспектных ММС #4 с толщиной 82 мкм ($\sigma = 1 \cdot 10^6$ См/м).

Таким образом, на текущем этапе LIGA-разработок можно сделать вывод, что с учетом меньшей трудоемкости изготовления при высоком качестве воспроизведения топологического микрорисунка ПММС могут выступать серьезной альтернативой ММС, диссипативные потери в которых превалируют над аналогичными потерями в ПММС, начиная с толщин приблизительно выше 60 мкм. Последнее значение, впрочем, определяется топологией микрорисунка, а также выходным качеством изготавливаемых ММС и зависит от дальнейшего продвижения в LIGA-технологии. Стоит также отметить, что с точки зрения оптимальности селективных характеристик для задач полосовой фильтрации применение высокоаспектных ПММС (как и высокоаспектных ММС) оказывается оправданным, только когда требуется сильная дискриминация по низким частотам. Высокочастотное же пропускание таких структур оказывается мало отличающимся от пропускания низкоаспектных структур с аналогичным топологическим микрорисунком, в то время как их основная резонансная полоса может быть сильно искажена модуляционным эффектом Фабри – Перо¹². Поэтому на практике, когда требуется высокое качество полосовой фильтрации, достаточно ограничиться использованием многослойных структур на основе низкоаспектных ПММС (или ММС) саморезонансного типа [7; 8; 14; 16]. Одним из эффективных решений в этом случае являются интерференционные конфигурации типа « $\lambda/4$ », в которых составляющие фильтр ММС разделены четвертьволновыми промежутками, что при соответствующем числе входящих структур обеспечивает высокую крутизну как низко-, так и высокочастотного фронта АЧХ. Такие интерференционные фильтры, впрочем, оказываются значительно более сложными в изготовлении в силу необходимости выдерживания критерия « $\lambda/4$ ». Более простыми в реализации, хотя и имеющими меньшую крутизну фронтов резонансной полосы, являются фильтры мультиплексного типа [16], в которых составляющие фильтр ММС располагаются без строго выдерживания промежутков и имеют небольшие угловые закосы друг относительно друга для подавления нежелательных интерференционных эффектов. В этом

¹¹ См.: Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Тумм М. К. А. Особенности дифракции электромагнитных волн...

¹² Там же.

случае коэффициент пропускания «мультиплекса» с хорошей точностью равен прямому произведению коэффициентов пропускания отдельных ММС. Рис. 17 иллюстрирует измеренные спектры пропускания двух образцов ПММС #1 (пурпурные и зеленые точки) и составленного из них «мультиплекса» с корректным угловым закосом одиночных ПММС (синие точки). Можно видеть, что мультиплексный фильтр демонстрирует значительно лучшую полосовую фильтрацию, чем одиночные структуры. Так, средние значения максимума прозрачности T_{\max} , ширины полосы фильтрации $\Delta\nu/\nu$ по уровню -3 дБ, а также максимального уровня внеполосового пропускания со стороны высоких частот T_{HF} для одиночных ПММС составляют $T_{\max} \cong 95\%$, $\Delta\nu/\nu \cong 25,6\%$, $T_{\text{HF}} \cong 10\%$, в то время как для двухслойного «мультиплекса» $T_{\max} \cong 90\%$, $\Delta\nu/\nu \cong 16,8\%$, $T_{\text{HF}} \leq 1\%$. Для сравнения на рис. 17 также приведен спектр пропускания некорректно собранного мультиплексного фильтра (красные точки и линии), в котором отдельные ПММС расположены параллельно друг другу. Последнее приводит к появлению часто расположенных высокочастотных резонансов Фабри – Перо, сильно искажающих полосовую АЧХ.

Заключение

В проведенном в настоящей работе исследовании показаны высокие перспективы использования методов LIGA-технологии для создания микроструктурных фильтров субтерагерцового диапазона. Из существенных технологических достижений следует отметить продемонстрированную, по-видимому, впервые возможность создания псевдометаллических структур с высокими значениями аспектного отношения (до 9). ПММС выступают альтернативой к более сложным в производстве и в ряде случаев менее выигрышным по экспериментальным электродинамическим характеристиками структурам металлического типа. Вместе с тем ММС оцениваются как более механически прочные и теплостойкие структуры, чем ПММС, и наилучшим образом подходят для работы с пучками излучения высокой средней мощности.

Отметим, что в силу отработки отдельных этапов техники LIGA в настоящей работе не удалось реализовать высокую вос-

производимость топологического рисунка у различных образцов ММС, изготовленных по одному и тому же рентгеношаблону. Эти недостатки необходимо устранить в процессе дальнейшей работы, в рамках которой предполагается также продвижение в сторону увеличения аспектного отношения создаваемых металлических структур с сохранением высоких значений эффективной высокочастотной проводимости поверхностного слоя металлизации.

Изучение спектральных характеристик изготовленных образцов ММС и ПММС, проведенное с использованием техники субтерагерцовой ЛОВ-спектроскопии, продемонстрировало хорошее согласование экспериментальных данных с результатами электродинамического моделирования структур в пакете ANSYS HFSS™ v.12. Это указывает на корректность применяемых подходов, что совместно с углубленным теоретическим анализом¹³ определяет эффективность последующего решения задач создания микроструктурных элементов под конкретные субтерагерцовые и терагерцовые приложения.

Список литературы

1. Siegel P. H. Terahertz Technology // IEEE Trans. MTT. 2002. Vol. 50. No. 3. P. 910–928.
2. Woolard D. L., Loerop W. R., Shur M. S. Terahertz Sensing Technology. Vol. 1, 2. // Selected Topics in Electronics and Systems. 2003. Vol. 30, 32.
3. Sakai K. Terahertz Optoelectronics. N. Y.: Springer-Verlag, 2005.
4. Yun-Shik L. Principles of Terahertz Science and Technology. Springer, 2009.
5. Munk B. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. N. Y.: Wiley, 2000.
6. Ulrich R. Far-Infrared Properties of Metallic Mesh and Its Complimentary Structure // Infrared Physics. 1967. Vol. 7. P. 37–55.
7. Ulrich R. Interference Filters for the Far Infrared // Applied Optics. 1968. Vol. 7. P. 1987–1996.
8. Ade P. A. R. et al. Review of Metal Mesh Filters // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6275. P. 62750U-1–62750U-15.

¹³ См.: Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Тумм М. К. А. Особенности дифракции электромагнитных волн...

9. Engheta N., Ziolkowski R. W. *Electromagnetic Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. Wiley and IEEE Press, 2006.
10. Моро У. *Микролитография*: В 2 ч. М.: Мир, 1990.
11. Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Kubarev V. V. et al. *Passive Metal Mesh Based Quasi-Optical Selective Components for Subterahertz and Terahertz Applications // Proc. 39th European Microwave Conf. EuMC-2009*. P. 826–829.
12. Kuznetsov S. A., A. V. Arzhannikov, Kubarev V. V. et al. *Development and Characterization of Quasi-Optical Mesh Filters and Metastructures for Subterahertz and Terahertz Applications // Key Engineering Materials*. 2010. Vol. 437. P. 276–280.
13. Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Гельфанд А. В. и др. *Многоканальная радиометрическая система для регистрации субмиллиметрового излучения при пучково-плазменном взаимодействии // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика*. 2010. Т. 5, вып. 3. С. 5–19.
14. Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Gelfand A. V. et al. *Microstructured Quasi-Optical Selective Components for Subterahertz and Terahertz Applications // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика*. 2010. Т. 5, вып. 3. С. 79–90.
15. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V. et al. *Bolometric THz-to-IR Converter for Terahertz Imaging // Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 99. P. 023501.
16. Thumm M. K. A., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T. et al. *Generation of High Power THz Waves in Relativistic Electron Beam Plasma and Two-Sheet-Beam FEM // Terahertz Science and Technology*. 2012. Vol. 5. No. 1. P. 18–39.
17. Кузнецов С. А., Гольденберг Б. Г., Калинин П. В. и др. *Разработка медных сеточных структур для частотной и пространственной селекции ТГц-излучения новосибирского лазера на свободных электронах // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2009. № 9. С. 38–49.
18. Ehrfeld W., Lehr H. *Deep X-ray Lithography for the Production of Three Dimensional Microstructures from Metals, Polymers and Ceramics // Radiat. Phys. Chem*. 1995. Vol. 45. No. 3. P. 349–365.
19. Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г., Кондратьев В. И. и др. *LIGA-станция на накопителе ВЭПП-3 // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2002. № 9. С. 30–35.
20. Бобровникова О. Н., Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г. и др. *Формирование и исследование толстых резистивных слоев ПММА для LIGA-технологии // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2005. № 9. С. 38–43.
21. Генцелев А. Н., Зелинский А. Г., Кондратьев В. И. *Металлическая сеточная структура и способ её изготовления // Патент RU № 2421833 на изобретение, опубл. в Б.И.*, 2011. № 17. С. 942.
22. 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 24.09.2012

S. A. Kuznetsov, A. N. Gentslev, B. G. Goldenberg, V. I. Kondratyev, A. V. Arzhannikov
M. K. A. Thumm, A. G. Zelinsky

ELABORATION OF MICROSTRUCTURED SUBTERAHERTZ FILTERS VIA LIGA TECHNOLOGY AND INVESTIGATION OF THEIR SELECTIVE PROPERTIES

We discuss the peculiar features of the LIGA-technology methods elaborated in the Siberian Synchrotron and Terahertz Radiation Centre (SSTRC, BINP SB RAS) and applied for producing quasi-optical subterahertz filters based on self-bearing microstructures of the metallic and pseudo-metallic types. The results of manufacturing the low- and high-aspect inductive microstructures with topology of dipole slots utilized as the selective elements in the band-pass filters for the frequency range 0,25–0,45 THz are presented. The details of spectral characterization of the developed filters using a BWO-spectroscopy technique are considered. A good agreement between the results of measurements and numerical simulations is demonstrated.

Keywords: LIGA-technology, microstructures, quasi-optical filters, frequency selective surfaces, subterahertz radiation, BWO-spectroscopy.