

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ОПТИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ

УДК 539.1.043 : 539.1.06, 537.86.029.65/.79

РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЛЬТРОВ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУР*

С. А. Кузнецов^{1,2,3}, А. Н. Генцелев¹, С. Г. Баев⁴

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1

⁴Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

E-mail: SAKuznetsov@nsm.nsu.ru

Представлен технологический подход к реализации эффективных квазиоптических фильтров типа high-pass субтерагерцового диапазона частот электромагнитного спектра с использованием высокоаспектных псевдометаллических структур. Подход основан на микроструктурировании сплошного полимерного слоя из полиметилметакрилата посредством синхротронной рентгеновской литографии с последующей металлизацией всей поверхности структуры. Приведены пример изготовленного образца и операционные характеристики фильтра high-pass с частотой отсечки 0,275 ТГц, который имеет толщину 1 мм и сформирован гексагонально упакованными сквозными отверстиями шестиугольной формы, разделёнными перемычками шириной 70 мкм. Представлены электродинамический анализ и принципы дизайна структур high-pass.

Ключевые слова: рентгеновская литография, высокоаспектные микроструктуры, фильтры высоких частот.

DOI: 10.15372/AUT20170113

Введение. В диапазоне субтерагерцовых (субТГц) и терагерцовых (ТГц) частот электромагнитного спектра для управления электродинамическими характеристиками пучков излучения, распространяющихся в свободном пространстве, в большинстве случаев принято использовать планарные металлические микроструктуры (ММС) субволновой топологии [1–8]. Такие ММС являются резонансными электродинамическими структурами плазмонного типа и известны в СВЧ-технике как частотно-избирательные поверхности [9, 10]. В отличие от дифракционных решёток они эксплуатируются в режиме, когда характерная резонансная частота структуры лежит ниже точки возбуждения высших дифракционных гармоник, что соответствует условию $G/\lambda < 1/(1 + \sin \theta)$, где G — период упаковки ячеек в латеральной плоскости ММС, λ — длина волны, θ — угол падения излучения. Существенно, что амплитудные, фазовые и поляризационные характеристики ММС в выбранной полосе частот определяются геометрией ячеек и числом слоёв, составляющих селективную

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 2012-218-03-004 и государственное задание, проект № 3002).

структуру, что делает возможным реализацию устройств с функциональными характеристиками, труднодостижимыми в классической оптике.

Одной из интересных разновидностей ММС, перспективных для субТГц/ТГц-приложений, является однослойная высокоаспектная структура*, сформированная сквозной перфорацией толстого металлического слоя. В подобных ММС, толщина t которых сопоставима или больше характерной длины волны излучения λ , сквозные отверстия эффективно работают как волноводы, препятствуя прохождению сквозь структуру волн с частотой ν ниже частоты волноводной отсечки ν_c . В области $\nu < \nu_c$ энергетическая прозрачность T толстой ММС падает с ростом толщины металлизации t приблизительно экспоненциально в сравнении с прозрачностью T_0 тонкой ММС с аналогичной геометрией ячеек: $T \approx T_0 \exp(-2t|\beta|)$, где $\beta = 2\pi\sqrt{\nu^2 - \nu_c^2}/c$, c — скорость света [5–8]. Это позволяет использовать толстометаллические структуры в качестве эффективных квазиоптических фильтров высоких частот (ФВЧ или high-pass filters), имеющих резкий фронт спада амплитудно-частотной характеристики вблизи ν_c и сильную дискриминацию низких частот. Подобные ФВЧ, называемые иногда дихроичными фильтрами [6], востребованы в экспериментальных задачах разделения ТГц-спектра, как минимум, на два поддиапазона: с высоким и низким ослаблением пропускания [8].

Отметим, что для области миллиметровых волн или низкочастотной части ТГц-диапазона классическая технология получения ФВЧ заключается в механическом сверлении массива микроотверстий в листе металла заданной толщины [6–8]. Очевидно, данный подход имеет технологические ограничения на минимально реализуемый диаметр отверстий и ширину перемычек между ними и не может применяться для производства мелкомасштабных структур с отсечкой на достаточно коротких длинах волн. Кроме того, круглая форма отверстий не является идеальной для ФВЧ.

Цель предлагаемой работы состоит в экспериментальной демонстрации альтернативной методики получения эффективных ФВЧ субТГц/ТГц-диапазона с использованием так называемых псевдометаллических микроструктур (ПММС). Данная методика не имеет принципиальных ограничений на геометрическую форму отверстий и основана на рентгенолитографическом структурировании слоя полиметилметакрилата (ПММА) с последующим покрытием всей его поверхности тонким слоем металла. С помощью этой методики изготавливались ФВЧ с частотой отсечки $\nu_c = 0,275$ ТГц. Структура толщиной 1 мкм сформирована сквозными отверстиями шестиугольного сечения, которое оказывается более выигрышным в сравнении с круглым.

Технология производства ПММС. Важной характеристикой ФВЧ является его пропускание на частотах выше частоты отсечки. Далее покажем, что средняя величина пропускания в области $\nu > \nu_c$ будет тем больше, чем меньше ширина перемычек w между отверстиями. С учётом того что для реализации эффекта волноводной отсечки толщина t ФВЧ должна быть масштаба $\lambda_c = c/\nu_c$ (или более), отношение t/w следует максимизировать. Таким образом, однослойный ФВЧ будет принципиально высокоаспектной структурой. Реализация подобных структур с использованием технологии оптической литографии [1] не представляется возможной ввиду дифракционных ограничений, которые не позволяют получить качественные структуры с вертикальными стенками и аспектным отношением $a > 1,5$ –2. Данная проблема разрешается при переходе к глубокой рентгеновской литографии (ГРЛ) [3, 4, 11], с помощью которой формируются микроструктуры в широком диапазоне толщин: от единиц микрон до единиц миллиметров с аспектным отношением $a \sim 100$ и более. Такие возможности ГРЛ реализуются благодаря высокой

*Под аспектным отношением a микроструктуры понимается отношение её толщины t к минимальному топологическому размеру w в латеральной плоскости: $a = t/w$. Структура является высокоаспектной, если $a \geq 10$.

проникающей способности жёсткого рентгеновского излучения в слой рентгеночувствительного материала, а также в результате значительного уменьшения дифракционного размытия изображения при его литографической репликации после многократного уменьшения длины волны экспонирующего излучения.

В традиционной технике ГРЛ производство высокоаспектной самонесущей ММС предполагает гальваническое выращивание (гальванопластику) структуры требуемой толщины на электропроводящей подложке через высокоаспектную резистивную маску [3, 4, 11]. Подобный подход является достаточно трудоёмким. В работах [4, 12] предложена альтернативная и более простая методика получения высокоаспектных структур, которая основана на рентгенолитографической перфорации слоя ПММА заданной толщины, выступающего в роли позитивного рентгенорезиста, с последующим покрытием тонким слоем высокопроводящего металла всей его поверхности, включая внутренние области отверстий. Примечательно, что при толщинах металлизации больше толщины скин-слоя δ наличие подстилающего диэлектрика не сказывается на взаимодействии структуры с электромагнитной волной, поэтому электродинамические характеристики ПММС эквивалентны аналогичным характеристикам цельнометаллической ММС с идентичным топологическим рисунком (при значениях электропроводности $>10^7$ См/м значение δ составляет менее 0,5 мкм на частотах выше 0,1 ТГц).

На рис. 1 показаны этапы создания ПММС по методике, разработанной и апробированной в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ, Институт ядерной физики (ИЯФ) СО РАН, г. Новосибирск), где исследования с применением ГРЛ проводятся на LIGA-станции на канале вывода синхротронного излучения (СИ) из накопителя ВЭПП-3 [13]. Производство последовательно включает прямое экспонирование жёстким СИ ($\lambda \sim 1 \text{ \AA}$) сплошного слоя ПММА заданной толщины через рентгеношаблон (РШ); удаление облучённых участков полимера химическим травлением; металлизацию поверхности полученного микроструктурированного слоя [4].

Металлизация может осуществляться путём как жидкостного химического осаждения серебра, так и его магнетронного напыления. Наилучшие результаты были достигнуты в комбинированном варианте с трёхступенчатым процессом металлизации, включающим следующие стадии:

- 1) химическое осаждение на поверхность ПММА тонкого (0,1–0,2 мкм) слоя серебра с использованием реакции «серебряного зеркала»;
- 2) усиление серебряного слоя путём двустороннего магнетронного напыления слоя толщиной 1 мкм;
- 3) магнетронное напыление антикоррозионного слоя алюминия толщиной 0,1 мкм.

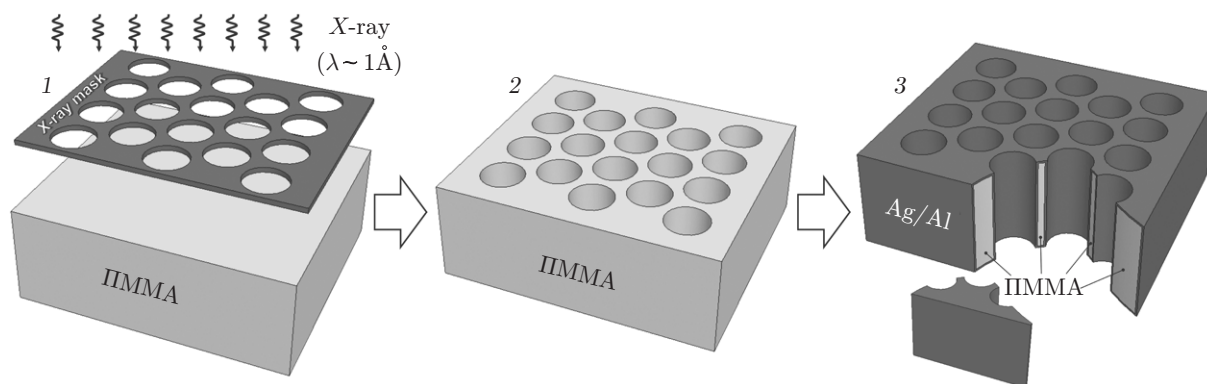


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая основные технологические этапы создания ПММС: 1 — облучение ПММА посредством СИ через рентгеношаблон; 2 — химическое травление облучённых участков; 3 — металлизация поверхности

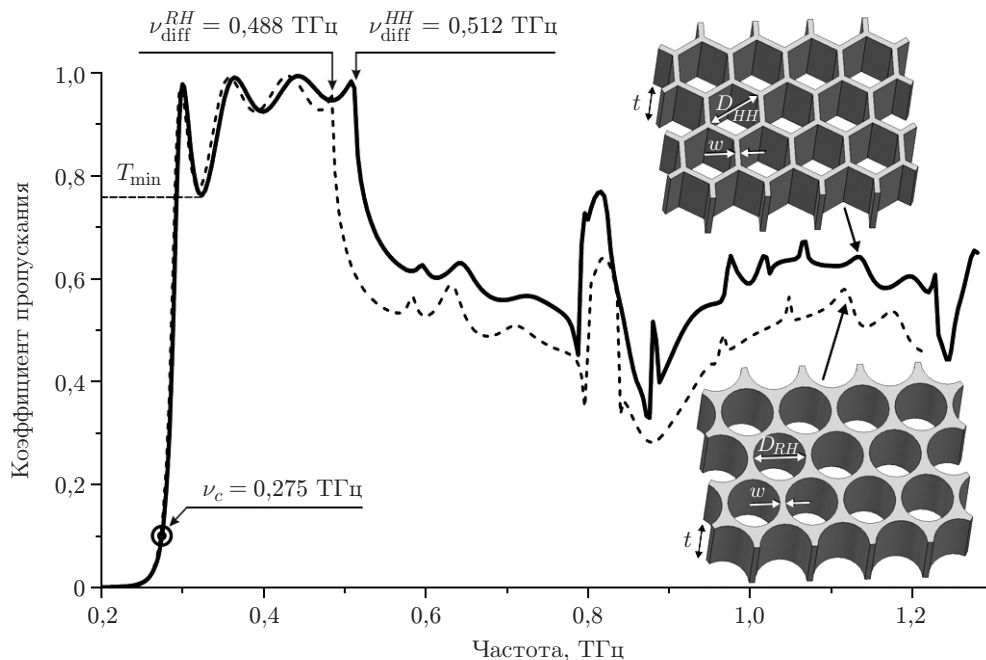


Рис. 2. Сопоставление расчётных спектров пропускания ФВЧ с шестиугольными ($D_{HH} = 700$ мкм) и круглыми ($D_{RH} = 639$ мкм) отверстиями. Толщина t (1000 мкм) обеих структур, ширина перемычек w (70 мкм) между отверстиями и частота отсечки ν_c заданы одинаковыми. Случай нормального падения. Проводимость металлизации ПММС, использованная при расчёте, равна $2 \cdot 10^7$ См/м

Важным элементом в технологии ГРЛ является рентгеношаблон, который представляет собой заранее подготовленный рисунок реплицируемой структуры, сделанный из рентгеноконтрастного материала. В данной работе в качестве РШ предложено использовать латунную фольгу толщиной 50 мкм с формированием в ней требуемого топологического микрорисунка с применением лазерной резки. Отметим, что для качественной реализации высокоаспектных ПММС необходимо выполнение двух базовых критериев: а) контрастность РШ*, отнесённая к выходной поверхности облучаемого слоя ПММА, должна быть не менее 20; б) отношение экспозиционных доз (величин поглощённой плотности мощности СИ) под рентгенопрозрачными участками РШ на входной и выходной поверхностях экспонируемого образца — не более 5 [11]. Для условий экспериментов СЦСТИ при работе с латунным РШ толщина 50 мкм обеспечивает соблюдение указанных критериев при получении структур ПММА толщиной 2 мм. В данной работе изложенный технологический подход был опробован при толщине ПММА 1 мм.

Электродинамические особенности структур high-pass. Кратко рассмотрим ключевые электродинамические характеристики структур типа ФВЧ, которые следует учитывать в практических приложениях. Эти характеристики анализируются на примере ФВЧ с гексагонально упакованными отверстиями шестиугольной и круглой форм (рис. 2). Для анализа использовался численный пакет электродинамического моделирования ANSYS HFSSTM v.15, в котором расчёт ФВЧ как регулярно периодических структур проводился в режиме портов Флоке и периодических граничных условий, применённых к элементарной ячейке ПММС [14]. В целях выявления наиболее выигрышной конфигурации представляет интерес сопоставление таких структур, когда их частота отсечки ν_c , толщина t и ширина перемычек w совпадают.

*Под контрастностью рентгеношаблона понимается отношение поглощаемых плотностей мощности под его рентгенопрозрачными и рентгенонепрозрачными участками.

Частота отсечки ν_c . В случае бесконечно длинного волновода величина ν_c определяет граничную частоту, при которой постоянная распространения волны обращается в нуль. Для волновода круглого сечения диаметром D_{RH} формула для ν_c имеет вид

$$\nu_c^{RH} = (\chi_{11}c)/(\pi D_{RH}), \quad (1)$$

где $\chi_{11} \approx 1,8412$ — первый корень производной функции Бесселя первого рода 1-го порядка [15]. В случае шестиугольного волновода его частота отсечки близка к среднему арифметическому частот отсечки круглых волноводов с диаметрами, равными диаметрам описанной D_{HH} и вписанной $\sqrt{3}D_{HH}/2$ окружностей шестиугольника [15, 16]:

$$\nu_c^{HH} \approx \frac{2 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \frac{\chi_{11}c}{\pi D_{HH}}. \quad (2)$$

Анализ показывает, что в случае ФВЧ как структуры конечной толщины ($t \sim \lambda$) значение ν_c , вычисленное по формулам (1), (2), соответствует частоте, при которой энергетический коэффициент пропускания $\simeq 0,1$. Нетрудно убедиться, что при условии $\nu_c^{HH} = \nu_c^{RH}$ круглое отверстие имеет меньший диаметр в сравнении с шестиугольным, т. е. $D_{RH} < D_{HH}$. Для приведённого на рис. 2 случая $\nu_c = 0,275$ ТГц указанные диаметры составляют $D_{RH} \cong 639$ мкм, $D_{HH} \cong 700$ мкм.

Диапазон дифракционной одномодовости. В области $\nu > \nu_c$ по мере роста частоты наступает момент, когда ФВЧ, являясь периодической структурой, начинает работать как дифракционная решётка, т. е. порождает угловые дифракционные гармоники более высокого порядка, помимо нулевого. В задачах частотной фильтрации данный эффект считается негативным, поскольку приводит к дополнительным потерям пропускания. При нормальном падении первая точка дифракции ν_{diff} соответствует условию $G_{\text{eff}} = c/\nu_{\text{diff}}$, где G_{eff} — эффективный период упаковки ячеек в латеральной плоскости ПММС. При квадратной упаковке G_{eff} совпадает с геометрическим периодом расположения ячеек G , при гексагональной становится меньше: $G_{\text{eff}} = G \cos(\pi/6)$ [6, 9]. Таким образом, гексагональная упаковка ячеек является наиболее предпочтительной для ФВЧ, поскольку позволяет максимально расширить диапазон дифракционной одномодовости в высокочастотную область. Для представленных на рис. 2 случаев ФВЧ с шестиугольными и круглыми отверстиями, разделёнными перемычками шириной $w = 70$ мкм, первые точки дифракции соответствуют частотам $\nu_{\text{diff}}^{HH} = 0,512$ ТГц и $\nu_{\text{diff}}^{RH} = 0,488$ ТГц. Расчёт отношения $\kappa = \nu_{\text{diff}}/\nu_c$ показывает, что при одинаковых параметрах $\{\nu_c, t, w\}$ гексагональные отверстия обеспечивают большие (в среднем на 4–5 %) значения κ в сравнении с отверстиями круглой формы (рис. 3, а).

Среднее пропускание в области высоких частот $\langle T_{HF} \rangle$. Наряду с более широкой областью дифракционной одномодовости выигрыш в использовании ФВЧ с шестиугольными отверстиями состоит в их большей прозрачности T_{HF} на частотах $\nu > \nu_{\text{diff}}$. Величина T_{HF} напрямую скоррелирована с геометрической прозрачностью структуры S_{rel} , которая определяется относительной площадью поперечного сечения одиночного отверстия в сравнении с площадью сечения элементарной ячейки структуры. Если в области $\nu_c < \nu < \nu_{\text{diff}}$ ФВЧ имеет в среднем близкое к единице пропускание (за исключением локальных минимумов, обусловленных эффектом Фабри — Перо), то при $\nu > \nu_{\text{diff}}$ пропускание падает до уровня некоторого квазиplateau, среднее значение $\langle T_{HF} \rangle$ которого всегда меньше S_{rel} ввиду наличия дифракционных потерь. Рис. 3, б, в иллюстрируют расчётные зависимости S_{rel} и $\langle T_{HF} \rangle$ от ширины перемычек w на примере структур толщиной 1 мм. Величина $\langle T_{HF} \rangle$ вычислена как интегральное среднее по диапазону $\nu \in [\nu_{\text{diff}}, 2,5\nu_{\text{diff}}]$, верхняя частота которого ограничена 24 Гб оперативной памяти использованного вычислительного ресурса. Видно,

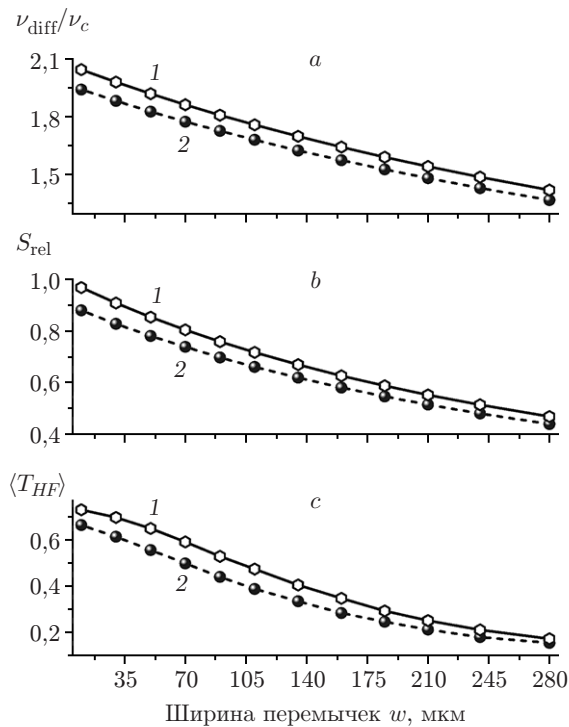


Рис. 3. Сопоставление характеристик ФВЧ с шестиугольными (кривые 1) и круглыми (кривые 2) отверстиями при вариации ширины перемычек w для $t = 1000$ мкм, $\nu_c = 0,275$ ТГц

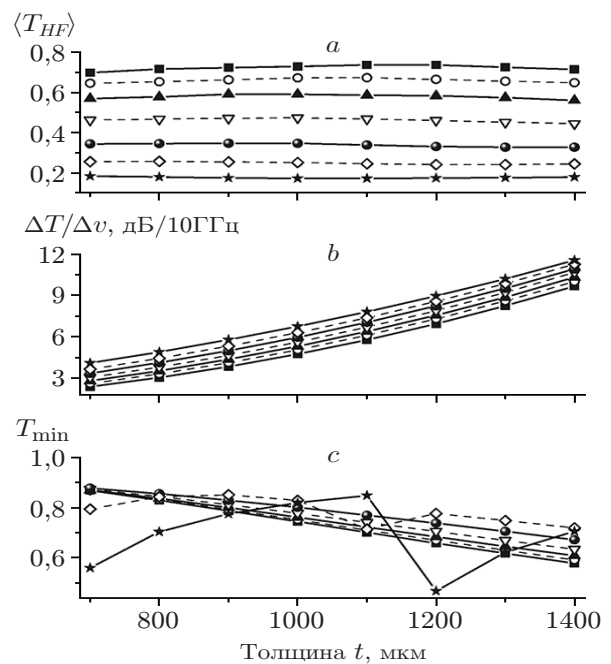


Рис. 4. Характеристики ФВЧ с шестиугольными отверстиями как функции толщины t при разной ширине перемычек w для $D_{HH} = 700$ мкм (■ — $w = 10$, ○ — 40, ▲ — 70, ▽ — 110, ● — 160, ◇ — 210, * — 280 мкм)

что ФВЧ с шестиугольными отверстиями даёт выигрыш масштаба 10–22 % по величине $\langle T_{HF} \rangle$ в сравнении с ФВЧ с круглыми отверстиями.

Эффекты, связанные с толщиной структуры. Как показывает численное моделирование, проведённое на примере ФВЧ с шестиугольными отверстиями, величина $\langle T_{HF} \rangle$ определяется главным образом относительной шириной перемычек w/D_{HH} и практически не зависит от толщины t структуры (рис. 4, а). Очевидно, на практике для максимизации $\langle T_{HF} \rangle$ ширину перемычек следует минимизировать. Среди характеристик, обусловленных величиной t , необходимо выделить крутизну изменения фронта амплитудно-частотной характеристики $\Delta T/\Delta \nu$ в окрестности частоты отсечки. В логарифмическом масштабе $\Delta T/\Delta \nu$ является квазилинейной функцией от t , монотонно увеличивающейся при уширении перемычек (рис. 4, б). Другой эффект, зависящий от величин t и w , — спектральная модуляция пропускания в области $\nu_c < \nu < \nu_{diff}$ (см. рис. 2). Данный эффект Фабри — Перо связан с возбуждением стоячих волн внутри волноводных ячеек вследствие частичного отражения проходящей волны от границ структуры [5, 7]. Максимальная добротность и соответственно глубина провала (величина T_{min} , см. рис. 2) реализуются, как правило, у самого низкочастотного резонанса Фабри — Перо, который расположен чуть выше отсечки, т. е. в области, где структура имеет высокий коэффициент отражения. Увеличение t и w вызывает в большинстве случаев углубление провала (рис. 4, с), поэтому использование излишне больших значений $\{t, w\}$ для усиления крутизны $\Delta T/\Delta \nu$ нецелесообразно. При практической реализации ФВЧ величины $t = 1$ мм, $w = 70$ мкм, $D_{HH} = 700$ мкм выбраны как компромиссные: $\Delta T/\Delta \nu \approx 5,4$ дБ/10 ГГц, $T_{min} = 0,76$.

Экспериментальные результаты. По итогам электродинамической оптимизации, представленной выше, для демонстрации работоспособности фильтра high-pass на ба-

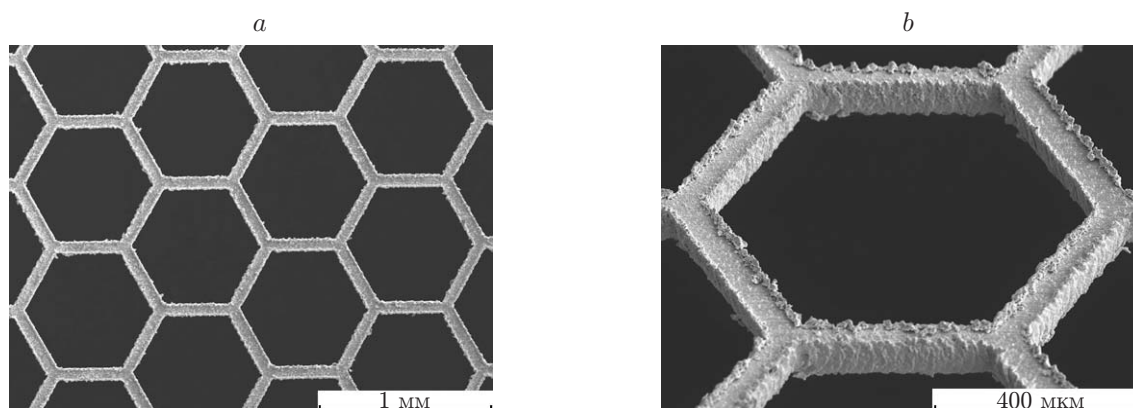


Рис. 5. СЭМ-изображения фрагмента латунного РШ с топологией ФВЧ: *a* — вид сверху, *b* — вид одной из элементарных ячеек в увеличенном масштабе (угол наблюдения 45°)

зе ПММС была выбрана структура с гексагонально упакованными отверстиями шестиугольной формы, геометрические параметры $t = 1$ мм, $w = 70$ мкм, $D_{HH} = 700$ мкм которой рассматривались как оптимальные для реализации ФВЧ с частотой отсечки $\nu_c^{HH} = 0,275$ ТГц. Выбор данной частоты связан с последующим применением разработанного ФВЧ в многоканальной радиометрической диагностике широкополосного субТГц-излучения на установке ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН) [17, 18]. Отметим, что при минимизации ширины перемычек w значение 70 мкм, соответствующее величине аспектного отношения $a \cong 14,3$, определялось из условия обеспечения приемлемой механической прочности ПММС как самонесущей структуры.

Для производства ПММС использовалось листовое органическое стекло марки ГОСН (содержание ПММА $\geq 99,8$ %). Заготовка из такого стекла имела внешний диаметр 55 мм, её поверхность подвергалась механической шлифовке и полировке, которые обеспечили толщину $t = 1 \pm 0,01$ мм при степени шероховатости менее 0,5 мкм. С помощью техники ГРЛ образец облучался посредством СИ на LIGA-станции СЦСТИ. При требовании 4 кДж/см³ к оптимальной экспозиционной дозе СИ, отнесённой к фронтальной поверхности ПММА, и среднем токе электронов ускорителя ВЭПП-3 100 мА характерное время облучения образца составляло 1 час. Проэкспонированный образец выдерживался в течение двух суток в GG-проявителе для растворения облучённых участков полимера, после чего итоговая полимерная структура подвергалась процедуре металлизации.

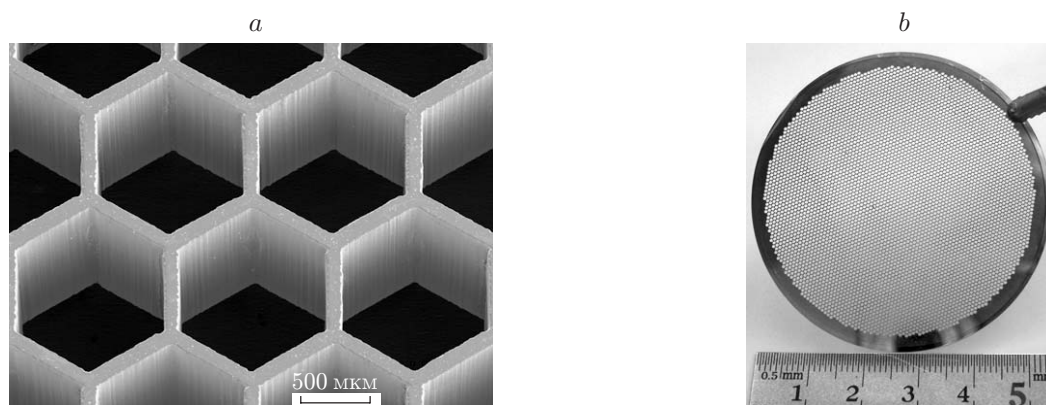


Рис. 6. Фотографии полученной структуры: *a* — СЭМ-изображение фрагмента топологии изготовленной ПММС, *b* — внешний вид структуры

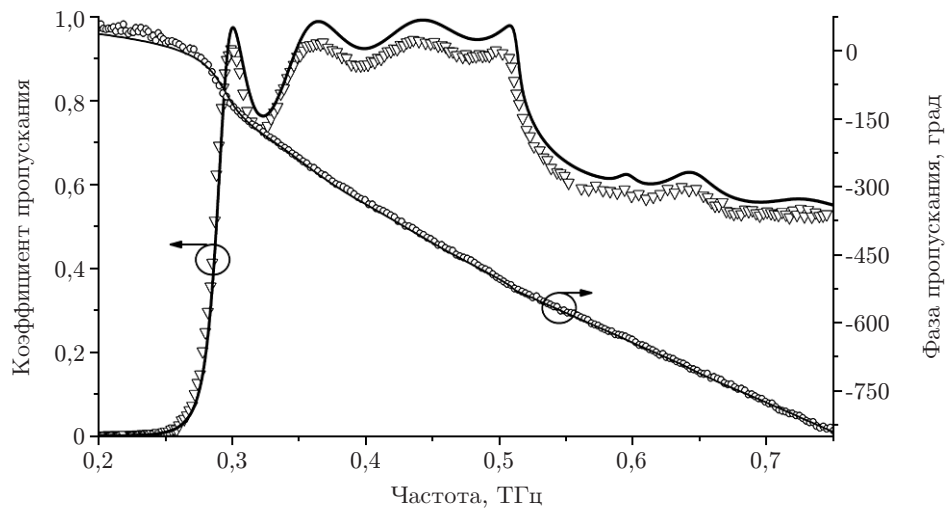


Рис. 7. Сопоставление рассчитанных в пакете ANSYS HFSSTM (сплошные кривые) и экспериментальных (точки) спектров энергетического коэффициента T и фазы пропускания $\Delta\varphi_T$ нулевой дифракционной гармоники для ФВЧ на основе ПММС. Нормальное падение

В качестве рентгеношаблона ПММС применялась промышленная латунная фольга толщиной 50 мкм, топологический микрорисунок в которой формировался методом лазерной резки. Резка проводилась на базе разработанной в Институте автоматики и электрометрии СО РАН лазерной рабочей станции для прецизионной размерной микрообработки [19], использующей в качестве источника излучения импульсный Nd:YAG-лазер с диодной накачкой. Параметры установки лазерной микрообработки: длина волны 1064 нм; средняя мощность 10 Вт; длительность импульса 10 нс; частота импульсов 10–100 кГц; энергия в импульсе 0,23 мДж; диаметр перетяжки в фокальной плоскости 10 мкм; средняя плотность мощности 2,6–13 МВт/см²; средняя плотность мощности в импульсе 30 ГВт/см². Рис. 5 иллюстрирует СЭМ-фотографии фрагментов топологии изготовленного РШ. Можно видеть, что при лазерной резке фольги происходит выброс на её поверхность металла, который концентрируется преимущественно вблизи кромки реза и приводит к появлению незначительных локальных дефектов при средней величине шероховатости кромки $\pm(2-3)$ мкм.

На рис. 6 представлены фотографии фрагмента топологии, а также внешнего вида ПММС, изготовленной по указанному РШ. На рис. 7 показаны спектры пропускания полученной структуры high-pass, измеренные в интервале частот 0,2–0,75 ТГц техникой субтерагерцовой ЛОВ-спектроскопии [4] и сопоставленные с результатами электродинамического моделирования. Графики демонстрируют хорошее совпадение экспериментальных и расчётных зависимостей, что подтверждает перспективность технологии ПММС для реализации селективных структур субТГц/ТГц-диапазона, а также указывает на приемлемое качество РШ, полученного лазерной резкой. Можно отметить небольшое проседание экспериментального спектра пропускания в сравнении с расчётным, которое объясняется, по видимому, наличием указанных выше микродефектов и шероховатости кромки отверстий РШ, реплицируемых в ПММС, а также несколько завышенной величиной проводимости металлизации ПММС, использованной в расчёте ($2 \cdot 10^7$ См/м).

Заключение. В данной работе представлен относительно простой и эффективный способ реализации фильтров высоких частот субТГц-диапазона с помощью технологии высокоаспектных самонесущих псевдометаллических структур. Подход, основанный на синхротронном рентгенолитографическом микроструктурировании слоя ПММА с последующей металлизацией его поверхности, позволяет устойчиво получать структуры с ас-

пектным отношением $a = 10\text{--}40$ и толщиной до 2 мм. В сравнении с традиционной LIGA-технологией производства цельнометаллических микроструктур техника ПММС характеризуется значительно меньшими трудозатратами и подходит для изготовления селективных элементов терагерцовой фотоники, работающих в области от нескольких сотен гигагерц до нескольких терагерц. Примечательно, что предложенный метод производства рентгеношаблона структуры путём лазерной микрообработки латунной фольги продемонстрировал хорошие результаты при реализации ПММС с гексагонально упакованными шестиугольными отверстиями, разделёнными перемычками толщиной 70 мкм, и потенциально может использоваться при создании мелкомасштабных структур. Для спектральной характеристики последних рекомендуется применение техники импульсной терагерцовой спектроскопии [20], которая в сравнении с ЛОВ-спектроскопией обеспечивает возможность проведения измерений в более широкой полосе частот (0,1–2 ТГц).

Следует также отметить, что оптимизационный электродинамический анализ ФВЧ представляет самостоятельный научный интерес и может быть рекомендован при создании подобных фильтров для практических приложений.

Данная работа выполнена с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования СЦСТИ на базе накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН. Авторы признательны информационно-вычислительному центру Новосибирского государственного университета [21] за предоставленные вычислительные ресурсы при проведении электродинамических расчётов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Kubarev V. V. et al.** Development and characterization of quasi-optical mesh filters and metastructures for subterahertz and terahertz applications // *Key Eng. Mater.* 2010. **437**. P. 276–280.
2. **Kuznetsov S. A., Astafyev M. A., Gelfand A. V., Arzhannikov A. V.** Microstructured frequency selective quasi-optical components for submillimeter-wave applications // *Proc. of the 44th European Microwave Conference.* Rome, Italy, 2014. P. 881–884.
3. **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.
4. **Кузнецов С. А., Генцелев А. Н., Гольденберг Б. Г. и др.** Создание методами LIGA-технологии микроструктурных фильтров субтерагерцового диапазона и исследование их селективных свойств // *Вестн. НГУ. Сер. Физика.* 2012. **7**, вып. 4. С. 25–42.
5. **Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Тумм М. К. А.** Особенности дифракции электромагнитных волн на регулярно-периодических индуктивных металлических структурах // *Вестн. НГУ. Сер. Физика.* 2013. **8**, вып. 4. С. 11–24.
6. **Winnewisser C., Lewen F., Helm H.** Transmission characteristics of dichroic filters measured by THz time-domain spectroscopy // *Appl. Phys. A.* 1998. **66**, Is. 6. P. 593–598.
7. **Roberts A., von Bibra M. L., Gemünd H.-P., Kreysa E.** Thick grids with circular apertures: A comparison of theoretical and experimental performance // *Journ. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.* 1994. **15**, Is. 3. P. 505–517.
8. **Letrou C., Gheudin M.** Dichroic diplexer design for millimeter waves // *Journ. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.* 1992. **13**, Is. 1. P. 27–42.
9. **Munk B. A.** *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design.* N. Y.: John Wiley & Sons, 2000. 410 p.

10. **Касьянов А. О., Обуховец В. А.** Частотно-избирательные поверхности. Основные области применения // Антенны. 2005. № 9. С. 4–12.
11. **Gatzen H. H., Saile V., Leuthold J.** Micro and Nano Fabrication: Tools and Processes. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 519 p.
12. **Пат. 2548945 РФ.** Микроструктурные элементы для селекции электромагнитного излучения и способ их изготовления /А. Н. Генцелев, Б. Г. Гольденберг, С. А. Кузнецов. Опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11.
13. **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.
14. **Курушин А. А.** Использование каналов Флоке для моделирования периодической наноструктуры // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 11. С. 1–22.
15. **Ravelo B., Mazari B.** Characterization of the regular polygonal waveguide for the RF EM shielding application // Progr. Electromagn. Res. M. 2010. **12**. P. 95–105.
16. **Сосунов В. А.** Расчет критической длины волны доминантного типа колебаний шестигранного волновода // Матер. V Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Саратов, 2002. С. 201–202.
17. **Arzhannikov A. V., Burdakov A. V., Vyacheslavov L. N. et al.** Diagnostic system for studying generation of subterahertz radiation during beam-plasma interaction in the GOL-3 facility // Plasma Phys. Reports. 2012. **38**, Is. 6. P. 450–459.
18. **Thumm M. K. A., Arzhannikov A. V., Astrelin V. T. et al.** Generation of high-power sub-THz waves in magnetized turbulent electron beam plasmas // Journ. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2014. **35**, Is. 1. P. 81–90.
19. **Goloshevsky N., Aleshin A., Baev S. et al.** Precision laser system based on complementary scanning principle for dielectric materials microprocessing // Proc. SPIE. 2008. **6985**. 69850M.
20. **Анцыгин В. Д., Лосев В. Ф., Мамрашев А. А. и др.** Особенности исследования анизотропных сред методами импульсной терагерцовой спектроскопии // Автометрия. 2016. **52**, № 4. С. 71–78.
21. **Информационно-вычислительный центр НГУ.** URL: <http://nusc.nsu.ru/> (дата обращения: 29.11.2016).

Поступила в редакцию 15 апреля 2016 г.
