

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 537.874.2,621.793

ПРОЗРАЧНЫЕ РАДИОЭКРАНИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ И СЕТЧАТЫХ СТРУКТУР¹

© 2022 г. М. О. Makeev^{a, *}, А. С. Осипков^a, А. А. Филяев^a, К. П. Синягаева^{a, b}, Е. И. Гарсия^a, Д. С. Рыженко^a, Г. Ю. Юрков^{a, c}

^aМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1, Москва, 105005 Российская Федерация

^bРоссийский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Российская Федерация

^cФедеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, ул. Косыгина, 4, Москва, 119991 Российская Федерация

*E-mail: m.makeev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 21.04.2021 г.

После доработки 10.02.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Рассмотрены подходы к созданию материалов, обеспечивающих одновременно высокие показатели прозрачности в видимом диапазоне спектра и радиоэкранирования в широком диапазоне частот. Проведен анализ и сравнение основных конструкций данных материалов (многослойные покрытия и сетчатые структуры), рассмотрены некоторые технологические аспекты их получения. Продемонстрировано, что оптимизация толщин и химического состава многослойных покрытий, а также геометрических параметров сетчатых структур может существенно улучшить их свойства. Предложены перспективные варианты конструкций, позволяющие получить коэффициент светопропускания от 90% до 98% в сочетании с коэффициентом экранирования радиоизлучения от 50 до 65 дБ.

DOI: 10.31857/S0033849422110092

ВВЕДЕНИЕ

Развитие информационных технологий приводит к интенсивному использованию различных электронных устройств, что актуализирует проблему электромагнитной совместимости приборов и оборудования. Работа многих электронных систем и микроэлектромеханических приборов требует их изоляции от воздействия посторонних электромагнитных волн и шумов, или же наоборот – возникает необходимость защиты от собственного излучения приборов, которое сегодня становится серьезной проблемой из-за неблагоприятного воздействия на здоровье человека [1–3]. Все больше актуализируется проблема защиты средств информатизации от утечек данных по различным техническим каналам.

В связи с этим возникает высокая потребность в материалах, не только обладающих эффективными экранирующими свойствами по отношению к электромагнитному излучению, но и характеризующихся высокими эксплуатационными харак-

теристиками, такими как гибкость, прозрачность в видимом или ИК-диапазонах, плотность, воздухопроницаемость [4, 5] и т.п. Это делает невозможным использование в электронных устройствах традиционных решений, таких как, например, металлические корпуса [6, 7], и требует разработки новых подходов и материалов для обеспечения необходимых характеристик по электромагнитному экранированию.

Применяемые в промышленности решения на сегодняшний день позволяют обеспечить либо высокую прозрачность (более 90%) при низких значениях экранирования (до 20 дБ) [8–10], либо высокое экранирование при существенном снижении светопропускания [11–15]. В этой связи возникает необходимость поиска таких конструкций и технологий их изготовления, которые позволяют достичь высоких показателей прозрачности и экранирования одновременно.

Цель данной работы – создать электропроводящие материалы, прозрачные в видимом диапазоне спектра, которые помимо задачи экранирования электромагнитного излучения могут найти широкое применение в качестве прозрачных

¹ Статья доложена на четвертой Международной конференции “Информационные технологии и технологии коммуникаций. Современные достижения”. 5–8 октября 2020 г. Астрахань, Россия.

электродов в портативных электронных устройствах [16–18].

Проведен анализ двух основных подходов получения подобных материалов: изготовление сплошных многослойных покрытий и формирование на поверхности проводящих сетчатых структур; приведены результаты теоретического расчета подобных структур и экспериментальных исследований, предложены перспективные варианты конструкций, рассмотрены достоинства и недостатки указанных подходов.

1. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для сравнения указанных выше подходов по получению прозрачных радиоэкранирующих покрытий были разработаны математические модели расчета коэффициентов экранирования (SE) и светопропускания (T) сплошных многослойных покрытий и сетчатых структур. Проверка моделей выполнена путем сравнения результатов аналитического моделирования с экспериментальными данными.

1.1. Моделирование сплошных многослойных покрытий

В случае рассмотрения одномерной задачи расчета электромагнитного экранирования дальнего поля коэффициент экранирования слоя можно определить по его поверхностному сопротивлению R_{\square} [19]:

$$SE = 20 \lg \left(1 + \frac{Z_0}{2R_{\square}} \right), \quad (1)$$

где Z_0 – волновое сопротивление вакуума.

Спектральный коэффициент пропускания многослойного покрытия рассчитывали по спектральным коэффициентам пропускания и отражения его отдельных слоев. Для нахождения спектрального коэффициента пропускания структуры в оптическом диапазоне длин волн, состоящей из двух слоев, было использовано следующее выражение [20]:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)}{1 - \rho_1'(\lambda)\rho_2(\lambda)}, \quad (2)$$

где $\tau_1(\lambda)$, $\tau_2(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания первого (наружного) и второго слоя соответственно; $\rho_1'(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения первого (наружного) слоя со стороны, противоположной падению излучения; $\rho_2(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения второго слоя со стороны падения излучения.

Для структуры, состоящей из трех слоев, данное выражение можно записать в следующем виде [20]:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau_1(\lambda)\tau_2(\lambda)\tau_3(\lambda)}{\left[1 - \rho_1'(\lambda)\rho_2(\lambda) \right] \left[1 - \rho_2'(\lambda)\rho_3(\lambda) \right] - \tau_2^2(\lambda)\rho_1'(\lambda)\rho_3(\lambda)}, \quad (3)$$

где $\tau_3(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания третьего слоя; $\rho_2'(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения второго слоя со стороны, противоположной падению излучения; $\rho_3(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения третьего слоя со стороны падения излучения.

Светопропускание структур, состоящих более чем из трех слоев, рассчитывали по формулам, аналогичными (2) и (3). При этом $\tau(\lambda)$ вычисляли по спектральным коэффициентам отдельных слоев.

При расчетах также стоит учитывать, что физические свойства тонкопленочного материала могут существенно отличаться от свойств этих же материалов в массивном состоянии.

1.2. Моделирование сетчатых структур

Прозрачность в видимом диапазоне сетчатой структуры определяется в первую очередь площадью, занимаемой проводниками; коэффициент экранирования – электропроводностью и толщиной проводников, частотные диапазоны экранирования и прозрачности – геометрическими размерами ячеек. Таким образом, изменяя параметры сетчатых структур, можно получить различные сочетания показателей прозрачности, экранирования или поверхностного сопротивления.

Светопропускание сетчатой структуры было определено в соответствии с законами геометрической оптики с помощью соотношений Френеля, которые определяют амплитуды и интенсивности отраженной и преломленной волны на плоской границе раздела двух сред с разными показателями преломления. Выразив отношение площади прозрачной части сетки к общей площади сетки через ее геометрические параметры, можно получить следующее выражение для светопропускания в зависимости от шага сетки g и ширины проводника a :

$$T_{\#} = \frac{(g-a)^2}{g^2} T, \quad (4)$$

где T – коэффициент светопропускания прозрачной подложки.

В диапазоне частот 1–30 ГГц рассматриваемые нами сетчатые структуры имеют толщину порядка глубины скин-слоя или больше. В этом случае рационально использовать частотно-зависимую

модель поверхностного сопротивления на основе теории длинных линий. С учетом коэффициента заполнения ($\eta = g/2a$) эквивалентное поверхностное сопротивление сетчатого проводящего покрытия $R_{\#}$ можно определить как:

$$R_{\#} = \frac{g}{2a\sigma\delta(1 - \exp(-t/\delta))}, \quad (5)$$

где $\delta = \sqrt{1/\pi f \mu \sigma}$ – глубина скин-слоя сплошной проводящей пленки [21], f – частота падающей плоской волны, μ – магнитная проницаемость, σ – удельная проводимость, t – толщина сетки.

Коэффициент экранирования сетчатой структуры может быть рассчитан в соответствии с аналогичной (1) зависимостью:

$$SE = 20 \lg \left(1 + \frac{Z_0}{2R_{\#}} \right). \quad (6)$$

1.3. Экспериментальные исследования

На стеклянную подложку было нанесен слой системы оксид индия–оксид олова (ITO) толщиной 300 нм с использованием метода реактивного магнетронного распыления мишеней из In и Sn в среде кислорода.

Измерение спектрального коэффициента пропускания проводили на спектрофотометре Lambda 950 (Perkin Elmer) при нормальном падении света на образец в диапазоне длин волн 380–780 нм со спектральным разрешением 1 нм.

Коэффициент экранирования измеряли в диапазоне частот 2–12 ГГц на специализированном измерительном стенде на базе векторного анализатора цепей Keysight FieldFox N9916A и антенн измерительных рупорных RFspin DRH18-EX (рис. 1). Был использован общепринятый метод измерений, основанный на измерении коэффициента передачи между двумя антеннами, на трассе между которыми располагается диафрагма с образцом. Принципы комплектации и компоновки стенда заимствованы из [22]. Также применялась временная фильтрация полезных сигналов [23]. Погрешность измерений SE данного стенда в диапазоне 0–50 дБ составляет ± 2 дБ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Сплошные многослойные покрытия

Сплошные многослойные покрытия могут быть реализованы на основе легированных широкозонных полупроводниковых материалов из оксидов и нитридов металлов (ZnO [23], TiO₂, In₂O₃, SnO₂, Zn₃N₂, TiN и др.), тонких металлических слоев и электропроводящих органических соединений [25–27].



Рис. 1. Антенный стенд для измерений коэффициента экранирования в свободном пространстве.

В качестве сплошных прозрачных электропроводящих слоев наиболее часто используют ITO-покрытия, которые обладают наилучшим соотношением электропроводности и светопропускания в видимом диапазоне (не менее 70% при поверхностном сопротивлении от 15 до 20 Ом/кв, что соответствует коэффициенту экранирования радиоизлучения около 22 дБ), хорошими адгезионными и высокими коррозионными свойствами [28, 29]. Нанесение просветляющих слоев позволяет улучшить светопропускание покрытий при сохранении экранирующих свойств [30].

На рис. 1 приведены результаты измерений нанесенного на стекло ITO-покрытия. Коэффициент экранирования и светопропускание данного покрытия также были рассчитаны аналитически, на рис. 1б представлена частотная зависимость пропускания для видимого диапазона длин волн.

Как видно из рис. 1а, измеренный коэффициент экранирования ITO-покрытия в частотном диапазоне 2–12 ГГц изменяется от 20 до 16 дБ (среднее значение 18 дБ). Исходя из экспериментально измеренного поверхностного сопротивления (22 Ом/кв) расчетное значение согласно (1) составило 19 дБ. Небольшое завышение расчетных результатов можно объяснить неучтенными в модели технологическими дефектами.

Недостатками ITO-покрытий являются существенное снижение прозрачности при увеличении толщины слоя, что затрудняет получение высоких экранирующих свойств одновременно с высокой прозрачностью, сложность его нанесения на гибкие полимерные подложки, так как требуется последующий отжиг при температуре

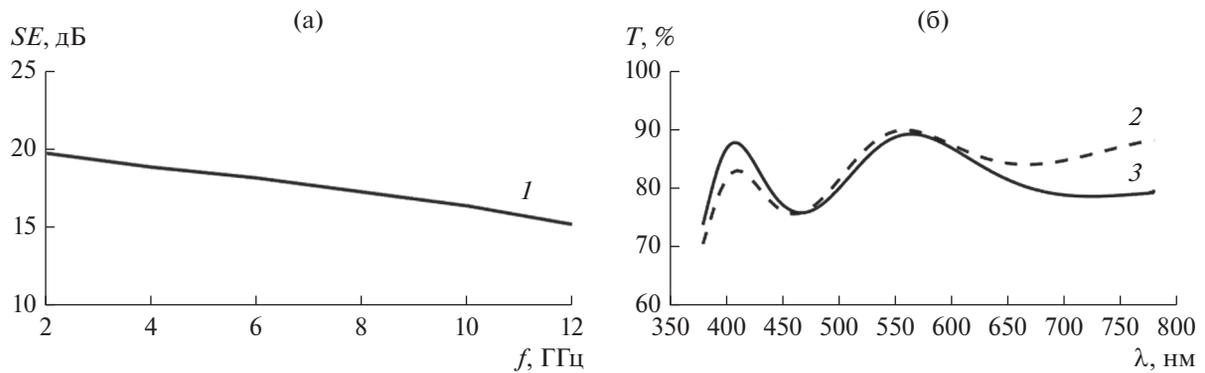


Рис. 2. Частотная зависимости коэффициентов экранирования (а) и светопропускания (б) ITO-покрытия: 1, 2 – экспериментальные данные; 3 – результаты аналитического моделирования.

300–400°C, а также хрупкость и растрескивание при изгибе.

В качестве альтернативы ITO-покрытиям широко применяют структуры на основе чередующихся слоев оксидов, таких как ZnO, SiO₂, TiO₂, ZrO₂, Nb₂O₅, и слоев металлов. Оксиды в данном случае выполняют роль просветляющих слоев, а тонкие слои металлов (Ag, Au, Ni, Cu) обеспечивают необходимую эффективность экранирования.

Также могут применяться комбинации тонких слоев металла и ITO. Были разработаны и изготовлены оптические материалы, состоящие из чередующихся слоев ITO и Ag, эффективность экранирования которых при толщинах слоев соответственно 40 и 20 нм превысила 40 дБ в диапазоне от 0.1–18.0 ГГц, и даже достигла 70 дБ на частоте 0.1 ГГц [11]. Экспериментальные исследования прозрачности покрытий с различным соотношением толщин слоев показали, что наилучшая прозрачность (коэффициент пропускания в видимом диапазоне 90%) была достигнута при толщинах слоев ITO и Ag – 60 и 20 нм соответственно.

Согласно (1)–(3) нами был произведен аналитический расчет характеристик структуры [ITO/Ag]³ITO (ITO (60 нм)/Ag (15 нм)/ITO (60 нм)/Ag (15 нм)/ITO (60 нм)/Ag (15 нм)/ITO (60 нм)), приведенной в [11]. Эффективность экранирования структуры составила 57 дБ, что соответствует экспериментальным измерениям (40–70 дБ). Рассчитанная нами частотная зависимость коэффициента светопропускания данной структуры также достаточно хорошо совпадает с экспериментальными данными (рис. 2).

Эффективность экранирования в СВЧ-диапазоне может быть улучшена путем нанесения слоев с двух сторон подложки. В [31] была предложена структура ZnO (39 нм)/Ag (13 нм)/ZnO (39 нм), нанесенная на гибкую ПЭТФ подложку как с одной

стороны (SLSO), так и с двух сторон (D-SLSO). Коэффициент светопропускания D-SLSO составил 88.9% на длине волны 550 нм, что лишь немного хуже светопропускания SLSO (91.9%). При этом эффективность экранирования D-SLSO на частотах от 10 до 40 ГГц лежит в диапазоне от 45 до 56 дБ, что заметно выше по сравнению с SLSO (34.7 дБ). Данный эффект возникает, по-видимому, в результате интерференции электромагнитных волн СВЧ-диапазона.

По результатам аналитического моделирования коэффициент экранирования структуры SLSO составил 34 дБ. Интегральный коэффициент светопропускания структуры 92%. Частотная зависимость светопропускания структуры представлена на рис. 2.

Таким образом, аналитически рассчитанные *SE* и *T* достаточно хорошо совпадают с результатами экспериментальных измерений.

Следует отметить, что эффективность экранирования и прозрачность многослойного покрытия могут быть улучшены путем подбора толщин и материалов слоев, в том числе за счет включения в структуру покрытия широкозонных полупроводниковых материалов и просветляющих слоев. В частности, для структуры ZrO₂ (40 нм)/Ag (14 нм)/ZrO₂ (70 нм)/Ag (14 нм)/ZrO₂ (35 нм) светопропускание (рис. 3) и эффективность экранирования по результатам расчета оказались равны 87% и 50 дБ соответственно.

Таким образом, путем оптимизации конструкции сплошных многослойных наноразмерных покрытий возможно достигнуть эффективности экранирования в СВЧ-диапазоне частот порядка 50 дБ при светопропускании в видимом диапазоне длин волн порядка 90%.

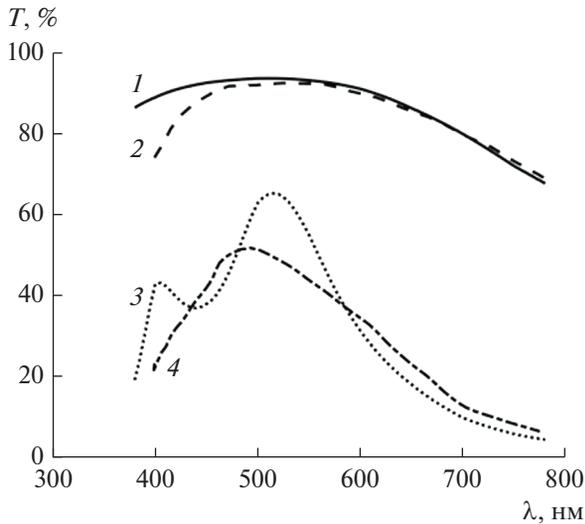


Рис. 3. Частотные зависимости светопропускания структур SLSO (1, 2) и $[\text{ITO}/\text{Ag}]^3\text{ITO}$ (3, 4): аналитическое моделирование (1, 3) и экспериментальные измерения (2, 4).

2.2. Сетчатые структуры

Конструктивной особенностью прозрачных покрытий на основе сетчатых структур является создание на поверхности или внутри прозрачной подложки электропроводной сетчатой структуры [9, 12, 13, 32–38]. Конструкции сетчатых структур варьируются в зависимости от размеров, формы ячеек и проводников, формирующих проводящие дорожки, электропроводности дорожек и степени упорядоченности проводников.

В работе [34] были исследованы электрические и оптические свойства серебряной сетчатой структуры, полученной на стеклянной подложке с помощью магнетронного напыления и последующей фотолитографии. Лучшие результаты (экранирование 42 дБ на частоте 2 ГГц и прозрачность около 78% в видимом спектре) наблюдались при толщине сетки 2 мкм. При этом было показано, что при уменьшении частоты излучения разница между значениями экранирования для структур разной толщины становится все более незначительной и на 18 ГГц экранирование всех исследованных структур стремится к значению 18.5 дБ.

Сравнение результатов аналитического моделирования и экспериментальных данных из [34] для сетчатой структуры со следующими параметрами: $a = 30$ мкм, $g = 347$ мкм, $t = 2$ мкм, представлено на рис. 4.

В работе [35] методом УФ-литографии с последующим гальваническим нанесением Cu с отжигом на воздухе была получена решетка из окисленной меди толщиной 2 мкм, которая демон-

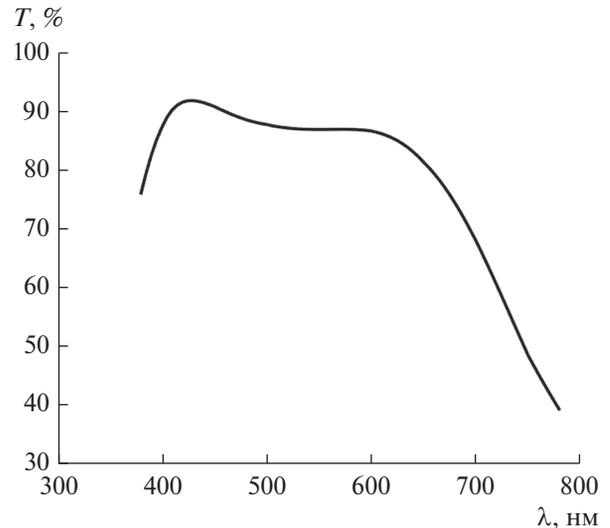


Рис. 4. Частотная зависимость светопропускания структуры $\text{ZrO}_2/\text{Ag}/\text{ZrO}_2/\text{Ag}/\text{ZrO}_2$ на стеклянной подложке.

стрирует прозрачность около 80% в диапазоне 400–800 нм и SE от 30 до 20 дБ в диапазоне 12–18 ГГц. Сравнение результатов аналитического моделирования и экспериментальных данных из [35] для сетчатой структуры со следующими параметрами: $a = 10$ мкм, $g = 200$ мкм, $t = 2$ мкм, представлено на рис. 5.

Результаты моделирования SE и T по зависимостям (4)–(6) имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными. Из этого можно сделать вывод о применимости разработанных математических моделей для проектирования электропроводящих структур, прозрачных в видимом диапазоне длин волн.

Следует отметить, что создание на поверхности упорядоченной электропроводящей сетки часто приводит к появлению волн муара, резко снижающих контрастность изображения. Для снижения данного эффекта нами было предложено использовать искусственно разупорядоченную сетку [39, 40]. При этом за основу были взяты периодические (с тороидальной топологией) диаграммы Вороного множества точек, случайно распределенных внутри элементарной ячейки с однородной плотностью вероятности. Для повышения оптической однородности сеток диаграммы Вороного дополнительно подвергали релаксации по Ллойдю [41]. Конструкция предложенной сетки представлена на рис. 6.

На основе проведенных теоретических исследований авторами данной работы были предложены варианты геометрических параметров сетки из серебра с электрической проводимостью 63 МСм/м, позволяющие получить коэффициент

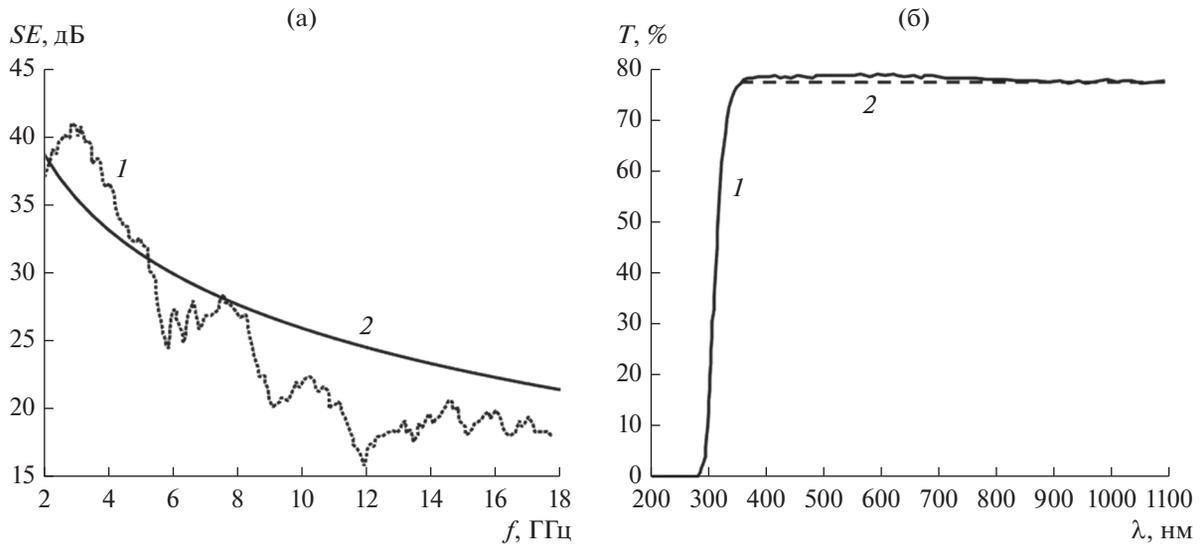


Рис. 5. Экспериментальные и смоделированные зависимости коэффициента экранирования от частоты (а) и коэффициента светопропускания от длины волны (б) сетчатой структуры с серебряным проводником: 1 – экспериментальные данные [34]; 2 – результаты аналитического моделирования.

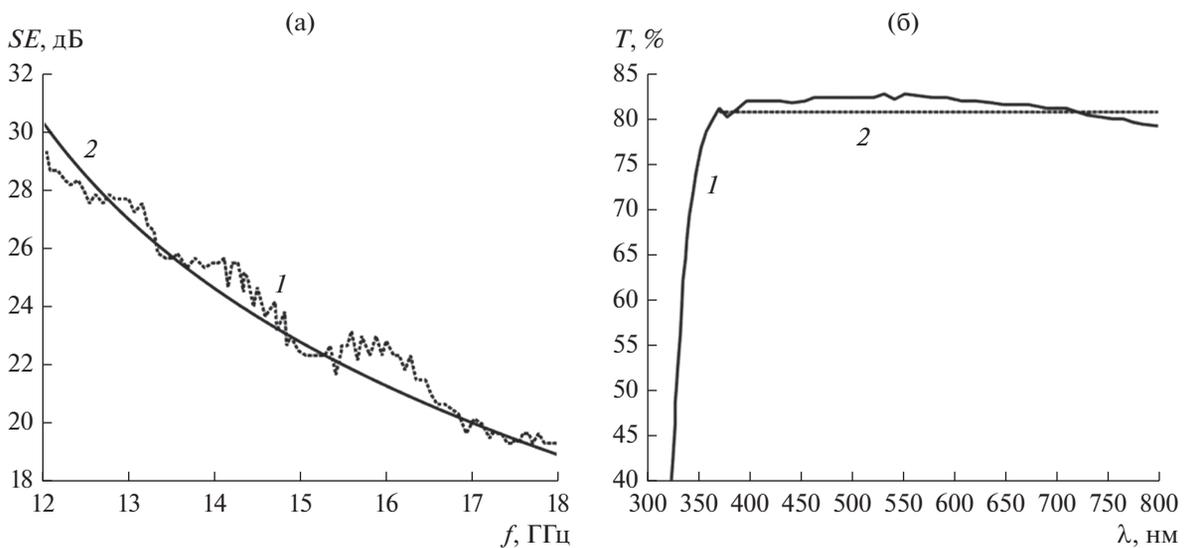


Рис. 6. Экспериментальные и смоделированные зависимости коэффициента экранирования от частоты (а) и коэффициента светопропускания от длины волны (б) сетчатой структуры с медным проводником: 1 – экспериментальные данные [35]; 2 – результаты аналитического моделирования.

светопропускания от 90 до 98% в сочетании с коэффициентом экранирования в радиодиапазоне длин волн от 50 до 65 дБ (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проведенного анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований можно сделать вывод, что рассмотренные подходы (многослойные покрытия и сетчатые структуры) позволяют получать на практике ма-

териалы с одновременно высокими значениями показателей экранирования в радиодиапазоне на уровне 40–50 дБ и прозрачности в видимом диапазоне длин волн на уровне 80–90%. При этом теоретические исследования показывают, что данные характеристики могут быть улучшены путем оптимизации толщин и химического состава многослойных покрытий или геометрических параметров сетчатых структур.

Наилучшее соотношение прозрачности и экранирования (T от 90% до 98% при SE от 50 до

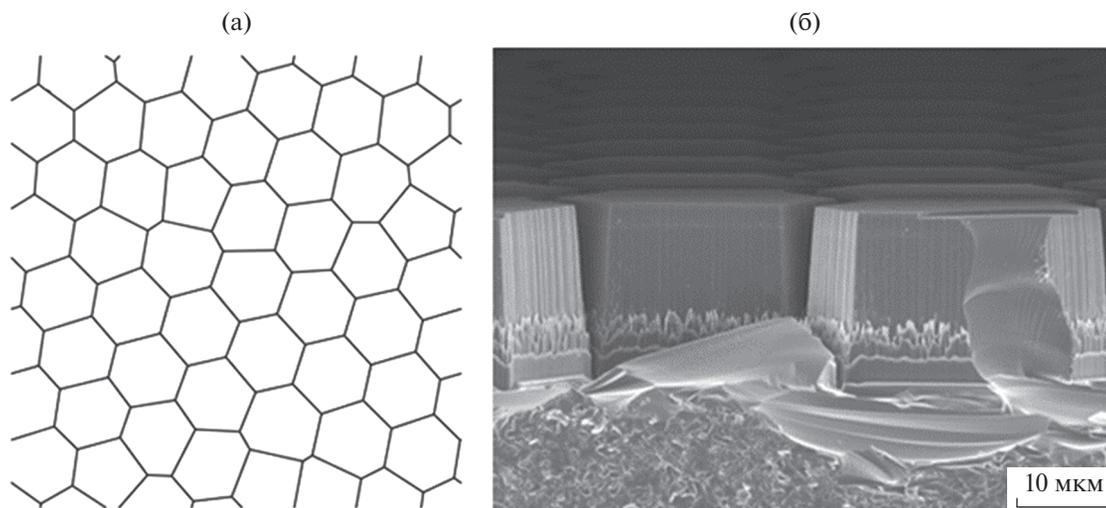


Рис. 7. Конструкция разупорядоченной сетчатой структуры: а – топология предлагаемой структуры; б – изображение полученной структуры, выполненное методом электронной микроскопии.

65 дБ) по результатам математического моделирования было получено на сетчатой структуре. Однако на сегодняшний день подобные характеристики могут быть получены лишь с использованием технологий микроэлектроники, включая литографические процессы, что является существенным ограничивающим фактором данного подхода из-за высокой стоимости и ограничений по размерам получаемых образцов. При этом ожидается, что развитие методов самоорганизации и аддитивных технологий приведет к суще-

ственному упрощению технологического процесса, снижению стоимости и возможности его масштабирования на образцы большой площади.

Вместе с тем задача масштабирования технологии в случае с многослойными структурами может решаться значительно проще, так как уже сейчас в промышленности широко применяются технологии нанесения тонкопленочных покрытий на рулонные материалы. При этом для подобных структур также имеется большой потенциал улучшения их характеристик путем оптимизации конструкторско-технологических решений.

В этой связи при выборе подхода для реализации рассматриваемых материалов с заданными характеристиками на первый план могут выходить именно технологические аспекты получения таких материалов с учетом возможности последующего масштабирования технологии и экономических показателей.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 0705-2020-0032).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы также выражают благодарность И.А. Дамарскому (МГТУ им. Н.Э. Баумана) за измерение коэффициентов экранирования.

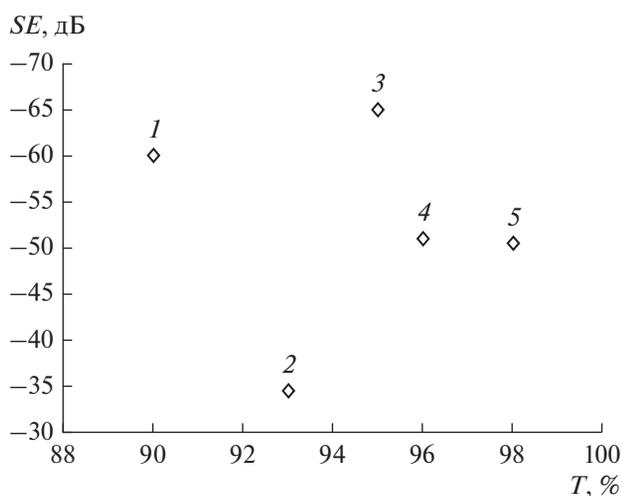


Рис. 8. Теоретически рассчитанные значения коэффициентов экранирования и прозрачности, и поля зрения при различных размерах сетчатых структур: кривая 1 – $l = 17$ мкм, $f = 22$ ГГц, $FOV = 135^\circ$; 2 – $l = 66$ мкм, $f = 27.4$ ГГц, $FOV = 169^\circ$; 3 – $l = 20$ мкм, $f = 2.7$ ГГц, $FOV = 150^\circ$; 4 – $l = 50$ мкм, $f = 15$ ГГц, $FOV = 140^\circ$; 5 – $l = 35$ мкм, $f = 8.7$ ГГц, $FOV = 160^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wessapan T., Rattanadecho Ph.* // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2018. V. 119. P. 65.
2. *Pasquino N.* // Measurement. 2017. V. 109. P. 373.
3. *Lee S., Jo I., Kang S. et al.* // Acs Nano. 2017. V. 11. P. 5318.
4. *Jang T.* Transparent and Flexible Radio Frequency (RF) Structures. PhD Diss. Michigan: University of Michigan, 2017. 117 p. https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/147562/tjang_1.pdf?sequence=1
5. *Сильченко Е.В., Николаев С.Д.* // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. № 1. С. 79.
6. *Zhou C., Gui L., Liu D. et al.* // IET Science, Measurement & Technology. 2017. V. 11. № 1. P. 25.
7. *Liu Q.F., Yin W.Y., Xue M.F. et al.* // IEEE Trans. 2009. V. EC-51. № 2. P. 284.
8. *Kim D.H., Kim Y., Kim J.W.* // Materials & Design. 2016. V. 89. P. 703.
9. *Jia L.C., Yan D.X., Liu X. et al.* // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2018. V. 10. № 14. P. 11941.
10. *Han Y., Liu Y., Han L. et al.* // Carbon. 2017. V. 115. P. 34.
11. *Zhao Y.L., Ma F.H., Li X.F. et al.* // Chinese Phys. B. 2018. V. 27. № 2. P. 027302.
12. *Lin S., Wang H., Wu F. et al.* // npj Flexible Electron. 2019. V. 3. № 1. P. 1.
13. *Zhang Y., Dong H., Li Q. et al.* // RSC Adv. 2019. V. 9. № 39. P. 22282.
14. *Lu Z., Ma L., Tan J. et al.* // 2D Mater. 2017. V. 4. № 2. P. 025021.
15. *Huang C.C., Gupta S., Lo C.Y., Tai N.H.* // Mater. Lett. 2019. V. 253. P. 152.
16. *Xu X., Liu Z., He P., Yang J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. V. 52. № 45. P. 455401.
17. *Sannicolo T., Lagrange M., Cabos A. et al.* // Small. 2016. V. 12. № 44. P. 6052.
18. *Xu Y., Liu J.* // Small. 2016. V. 12. № 11. P. 1400.
19. *Oh H.J., Dao V.D., Choi H.S.* // Appl. Surf. Sci. 2018. V. 435. P. 7.
20. ГОСТ Р. 54164–2010 (ИСО 9050: 2003). Стекло и изделия из него. Методы определения оптических характеристик. Определение световых и солнечных характеристик. М.: Стандартинформ, 2010.
21. *Gold G., Helmreich K.* // 7th Eur. Microwave Integrated Circuit Conf. Amsterdam, Netherlands. N.Y.: IEEE. 2012. P. 631.
22. *Marvin A.C., Dawson L., Flintoft I.D., Dawson J.F.* // IEEE Trans. 2009. V. EC-51. № 2. P. 255.
23. *Dvurechenskaya N., Bajurko P.R., Zieliński R.J., Yashchyshyn Y.* // Metrology and Measurement Systems. 2013. V. 20. № 2. P. 217.
24. *Crupi I., Boscarino S., Strano V. et al.* // Thin Solid Films. 2012. V. 520. № 13. P. 4432.
25. *Kim B.R., Lee H.K., Kim E., Lee S.H.* // Synthetic Metals. 2010. V. 160. № 17–18. P. 1838.
26. *Lee S.H., Lee D.H., Lee K., Lee C.W.* // Adv. Functional Mater. 2005. V. 15. № 9. P. 1495.
27. *Lee K., Cho S., Park S. H. et al.* // Nature. 2006. V. 441. № 7089. P. 65.
28. *Залесский В., Волочко А., Марков Г.* // Наука и инновации. 2017. Т. 4. № 170.
29. *Granqvist C.G., Hultåker A.* // Thin Solid Films. 2002. V. 411. № 1. P. 1.
30. *Мельников А.А., Шур П.А.* // Труды ВИАМ. 2019. № 8. P. 56.
31. *Yuan C., Huang J., Dong Y. et al.* // ACS Appl. Materials Interfaces. 2020. V. 12. № 23. P. 26659.
32. *Jung J., Lee H., Ha I. et al.* // ACS Appl. Materials Interfaces. 2017. V. 9. № 51. P. 44609.
33. *Babych B., Borisova A., Machulyansky A. et al.* // IEEE 37th Intern. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). N.Y.: IEEE, 2017. P. 52.
34. *Corredores Y., Castel X., Besnier P. et al.* // J. Engineering. 2018. V. 2018. № 4. P. 239.
35. *Han Y., Zhong H., Liu N. et al.* // Adv. Electronic Mater. 2018. V. 4. № 11. P. 1800156.
36. *Wang Q., Li B.J., Toor F., Ding H.* // J. Laser Appl. 2019. V. 31. № 2. P. 022505.
37. *Wang H., Lu Z., Liu Y. et al.* // Optics Lett. 2017. V. 42. № 8. P. 1620.
38. *Zhu X., Xu Q., Li H. et al.* // Adv. Mater. 2019. V. 31. № 32. P. 1902479.
39. *Shiriaev P., Makeev M., Ryzhenko D., Popkov O.* // Mater. Today: Proc. 2019. V. 19. P. 2179.
40. *Shiriaev P.P., Ryzhenko D.S., Makeev M.O., Popkov O.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1410. P. 012206.
41. *Lloyd S.* // IEEE Trans. 1982. V. IT-28. № 2. P. 129.