

13.1

Прозрачное радиоэкранирующее покрытие, полученное при помощи самоорганизованного шаблона

© А.С. Воронин^{1,2}, Ю.В. Фадеев¹, И.В. Говорун^{3,4}, А.С. Волошин²⁻⁴, И.А. Тамбасов³, М.М. Симунин^{1,2,4}, С.В. Хартов¹

¹ ФИЦ „Красноярский научный центр СО РАН“, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

⁴ Сибирский университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

E-mail: a.voronin1988@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 августа 2020 г.

В окончательной редакции 24 ноября 2020 г.

Принято к публикации 24 ноября 2020 г.

Представлена простая и доступная технология получения тонкопленочного прозрачного радиоэкранирующего материала. Материал представляет собой серебряное микросетчатое покрытие, полученное при помощи самоорганизованного шаблона. Представлены результаты исследования радиоэкранирующих свойств данных покрытий в X - и K -диапазонах. Показано, что микросетчатое покрытие с поверхностным сопротивлением $6.8 \Omega/\text{sq}$ и интегральным оптическим пропусканием 83.6% характеризуется эффективностью экранирования 28.4 dB на частоте 8 GHz , что соответствует экранированию 99.85% излучения. Основным механизмом экранирования радиоизлучения микросетчатыми покрытиями является отражение.

Ключевые слова: самоорганизованный шаблон, микросетчатое покрытие, экранирование электромагнитного излучения.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.05.50674.18496

В 80-х годах XX века была показана принципиальная возможность перехвата побочного радиоизлучения от монитора персонального компьютера (ПЭМИН-утечки) с его последующей декодировкой. В литературе методика получила название „перехват ван Эйка“ [1]. Для борьбы с паразитным радиоизлучением монитора и других прозрачных объектов используется экранирование. Для электромагнитного экранирования подобного рода объектов необходимо использовать такие материалы, которые сочетают оптическую прозрачность более 80% с поверхностным сопротивлением R_s менее $10 \Omega/\text{sq}$. Низкое значение поверхностного сопротивления позволяет материалу эффективно экранировать электромагнитное излучение в радиодиапазоне не менее чем на $20-30 \text{ dB}$ или экранировать $99-99.9\%$ мощности падающего излучения. Основными материалами, применяемыми для радиоэкранирования прозрачных объектов, являются прозрачные проводящие оксиды, такие как ITO, AZO и т.д. [2]; тонкие пленки одностенных углеродных нанотрубок [3,4]; композитные пленки на основе нанотрубок и проводящих полимеров [5]; пленки металлических нанопроволок [6,7]; литографические сетчатые микро- и наноструктуры [8]. В настоящей работе в качестве прозрачного радиоэкранирующего материала предлагается использовать серебряное микросетчатое (МКС) покрытие, полученное при помощи самоорганизованного шаблона.

Процесс формирования самоорганизованного шаблона подробно описан в [9]. В настоящей работе в качестве материала для формирования самоорганизо-

ванного шаблона был выбран яичный белок. Раствор яичного белка с концентрацией желтка 3 ml/l наносился методом Meyer rod на PET-подложки толщиной $50 \mu\text{m}$. Толщина слоя яичного белка t_w составляла $35.56 \mu\text{m}$ (Meyer rod #14) — образец Ag МКС № 1 — и $71.1 \mu\text{m}$ (Meyer rod #28) — образец Ag МКС № 2. После нанесения жидкая пленка высушивалась при комнатной температуре 21°C и влажности $\sim 50\%$. В процессе сушки происходит растрескивание пленки яичного белка, что и является конечным этапом формирования самоорганизованного шаблона [9].

Напыление серебра на самоорганизованные шаблоны производилось магнетронным методом на установке Emitech K575XD (Quorum Technologies Ltd, UK). Толщина пленки серебра на пластине-спутнике составляла $\sim 200 \text{ nm}$. После напыления серебра шаблон отмывался в дистиллированной воде [9]. Морфология микросетчатых покрытий была исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) при помощи микроскопа Hitachi TM3000 (Japan), ускоряющее напряжение 15 kV .

Спектральная зависимость оптического пропускания серебряных микросетчатых покрытий измерялась в диапазоне $400-700 \text{ nm}$, прибор Shimadzu UV-3600 (Japan). Вольт-амперные характеристики покрытий были измерены с помощью прибора IPPP-1 (Belarus). Удельное поверхностное сопротивление покрытий вычислялось из тангенса угла наклона вольт-амперных характеристик.

Эффективность экранирования электромагнитного излучения (SE) полученных образцов определялась вол-

Таблица 1. Значение толщины слоя яичного белка t_w , коэффициента заполнения FF , оптической прозрачности T_{opt} и поверхностного сопротивления R_s для образцов Ag МКС № 1 и Ag МКС № 2

Тип покрытия	$t_w, \mu\text{m}$	$FF, \%$	$T_{opt} (550 \text{ nm}), \%$	$R_s, \Omega/\text{sq}$
Ag МКС № 1	35.56	10.2	90.2	11.2
Ag МКС № 2	71.1	15.5	83.6	6.8

новодным методом в X -диапазоне (8–12 GHz) и K -диапазоне (18–26 GHz). Для этого при помощи векторного анализатора цепей (VNA) Rohde&Schwarz ZVA 50 (Germany) проводилось измерение параметров отраженной и прошедшей электромагнитной волны (S_{11} , S_{21}). Исследуемые образцы серебряных микросетчатых покрытий имели прямоугольную форму (размер $3 \times 4 \text{ cm}$). Образцы полностью перекрывали волновое окно размером $23 \times 10 \text{ mm}$ для X -диапазона и $11 \times 5.5 \text{ mm}$ для K -диапазона.

СЭМ-изображения покрытий Ag МКС № 1 и Ag МКС № 2 представлены на рис. 1, a и b . Согласно статистической обработке СЭМ-изображений, средний размер ячейки составляет $63 \pm 22 \mu\text{m}$ для Ag МКС № 1 и $67 \pm 25 \mu\text{m}$ для Ag МКС № 2. Величина ширины трещины составляет $3.3 \pm 0.8 \mu\text{m}$ для Ag МКС № 1 и $5.4 \pm 1.4 \mu\text{m}$ для Ag МКС № 2. Коэффициент заполнения поверхности металлом (fill factor, FF) может быть вычислен согласно выражению $FF = (1 - (p - w)^2/p^2) \cdot 100\%$, где p — средний размер ячейки шаблона, а w — средняя ширина трещины. На рис. 1, c приведены спектральные зависимости оптического пропускания покрытий Ag МКС № 1 и Ag МКС № 2 в диапазоне 400–700 nm.

В табл. 1 представлены основные данные о геометрических и оптоэлектрических характеристиках полученных микросетчатых покрытий. Как видно из таблицы, увеличение толщины слоя яичного белка образца приводит к увеличению коэффициента заполнения и, как следствие, к уменьшению поверхностного сопротивления и оптической прозрачности.

Экранирование электромагнитного излучения происходит за счет поглощения и отражения. Следует отметить, что в случае толстых пленочных структур также необходимо учитывать множественные отражения [10]. Коэффициент отражения (R), передачи (T_{SHF}) и поглощения (A) мощности можно выразить как

$$R = \frac{P_r}{P_i} = (10^{0.1S_{11}}) \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$T_{SHF} = \frac{P_t}{P_i} = (10^{0.1S_{21}}) \cdot 100\%, \quad (2)$$

$$A = 100\% - T_{SHF} - R, \quad (3)$$

где P_i , P_r , P_t — мощности падающей, отраженной и прошедшей волны, параметры матрицы рассеяния S_{11} и S_{21} следует брать в dB. Полную эффективность экранирования можно характеризовать исходя из величины

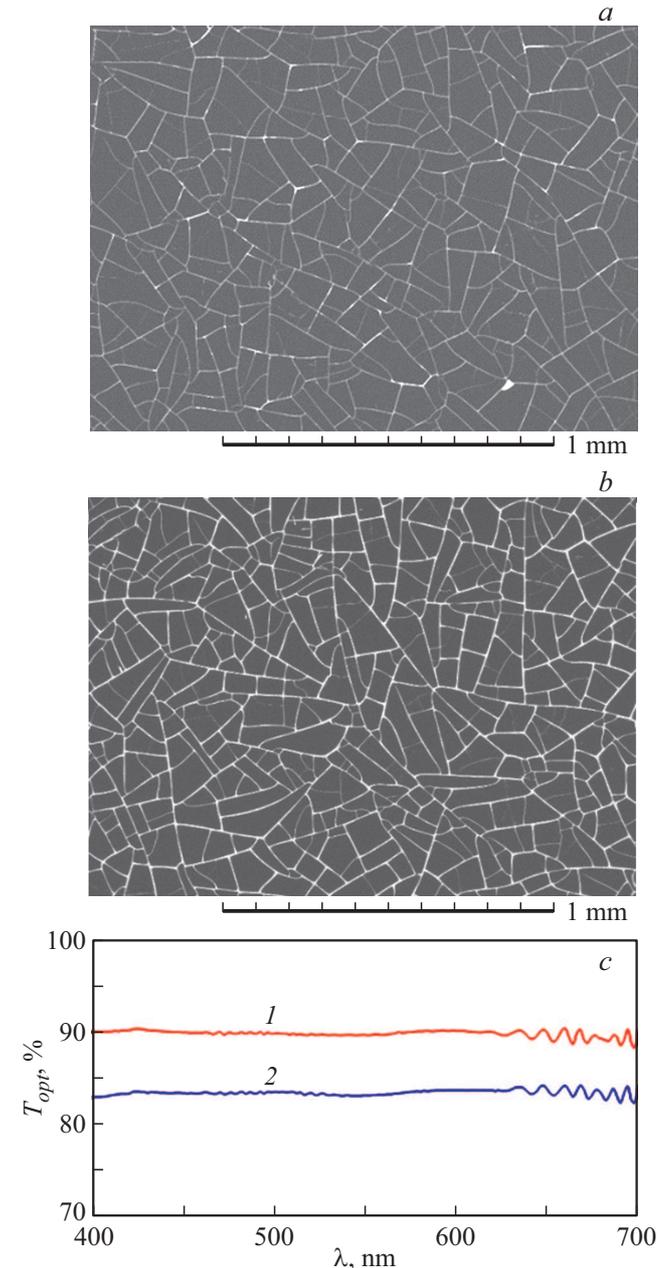


Рис. 1. СЭМ-изображения Ag МКС № 1 (a) и Ag МКС № 2 (b); c — оптическое пропускание образцов Ag МКС № 1 (1) и Ag МКС № 2 (2).

коэффициента прохождения согласно выражению

$$SE = -10 \lg T_{SHF}. \quad (4)$$

Таблица 2. Значения параметра SE , коэффициента передачи T_{SHF} и коэффициента отражения R для покрытий Ag МКС № 1 и Ag МКС № 2 на граничных частотах

Тип покрытия	SE (8 GHz), dB	T_{SHF} (8 GHz), %	R (8 GHz), %	SE (26 GHz), dB	T_{SHF} (26 GHz), %	R (26 GHz), %
Ag МКС № 1	23.1	0.49	89.3	15.5	2.82	80.5
Ag МКС № 2	28.4	0.15	93.1	18.5	1.4	86.1

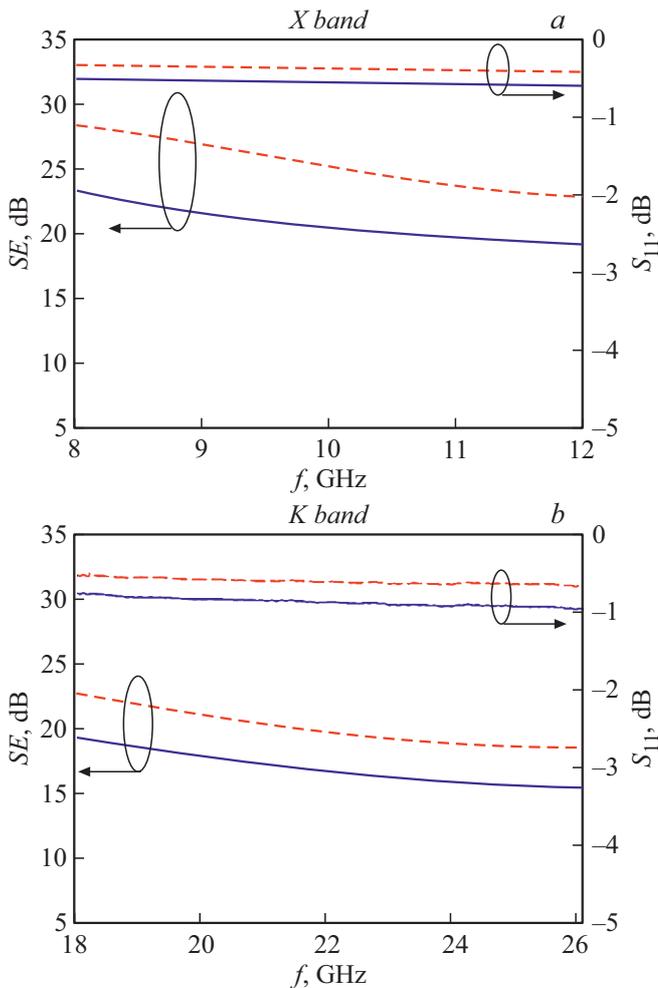


Рис. 2. Частотные зависимости эффективности экранирования SE и коэффициента отражения S_{11} в X- (*a*) и K-диапазоне (*b*). Сплошные линии — Ag МКС № 1, штриховые — Ag МКС № 2.

Частотные зависимости эффективности экранирования SE и коэффициента отражения S_{11} для образцов Ag МКС № 1 и Ag МКС № 2 в X- и K-диапазонах приведены на рис. 2. Как видно, для исследуемых образцов с ростом частоты величина SE незначительно уменьшается, а значит, эффективность экранирования электромагнитного излучения падает. При этом уменьшение SE с ростом частоты сопровождается уменьшением S_{11} . Это проявляется в том, что уменьшается доля падающей

мощности, которая отражается от образцов. Так, для Ag МКС № 1 в X-диапазоне величина SE плавно уменьшается от 23.4 dB на частоте 8 GHz до 19.2 dB на частоте 12 GHz, а в K-диапазоне SE принимает значения 19.2 и 15.4 dB на частотах 18 и 26 GHz соответственно. Уменьшение SE и S_{11} с ростом частоты связано с частотной зависимостью поверхностного сопротивления металла, на основе которого изготовлен образец. Как известно, для обычных проводников с металлическим типом проводимости активная часть их поверхностного сопротивления с увеличением частоты растет, причем пропорционально корню из частоты [10].

Во всех рассматриваемых частотных диапазонах образец Ag МКС № 2 эффективнее экранирует электромагнитное излучение, чем образец Ag МКС № 1. Так, на частоте 10 GHz SE составляет 20 и 25 dB для Ag МКС № 1 и Ag МКС № 2 соответственно. Это объясняется тем, что поверхностное сопротивление (R_s) для образца Ag МКС № 2 меньше, чем для Ag МКС № 1 (табл. 1).

Величины SE , а также коэффициентов передачи T_{SHF} и отражения R для покрытий Ag МКС № 1 и Ag МКС № 2 на границах исследуемых диапазонов приведены в табл. 2.

Используя формулы (1)–(3), можно оценить часть падающей мощности, которая поглощается в образце. Например, на частоте 8 GHz для Ag МКС № 2 $SE = 28.4$ dB, а $S_{11} = -0.31$ dB. В данном случае через исследуемый образец проходит всего 0.15% падающей мощности. Следует заметить, что такое значительное ослабление обусловлено тем, что подавляющая часть (93.1%) падающей мощности отражается от образца.

Таким образом, в работе представлены результаты исследования радиоэкранирующих свойств серебряных микросетчатых покрытий в X- и K-диапазонах. Микросетчатое покрытие характеризуется величиной SE , равной 28.4 dB на частоте 8 GHz, что соответствует экранированию 99.85% излучения. Предлагаемые покрытия могут быть использованы для экранирования прозрачных объектов, таких как дисплеи компьютеров и смартфонов, а также при остеклении зданий в случае высоких требований к защите информации.

Благодарности

Исследования методом сканирующей электронной микроскопии и спектрофотометрии выполнены на обо-

рудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. van Eck, *Comput. Security*, **4** (4), 269 (1985). doi.org/10.1016/0167-4048(85)90046-X
- [2] Y.-J. Choi, K.-M. Kang, H.-S. Lee, H.-H. Park, *Thin Solid Films*, **583**, 226 (2015). doi.org/10.1016/j.tsf.2015.04.001
- [3] H. Xu, S.M. Anlage, L. Hu, G. Gruner, *Appl. Phys. Lett.*, **90** (18), 3119 (2007). doi.org/10.1063/1.2734897
- [4] K.F. Akhmadishina, I.I. Bobrinetskii, R.A. Ibragimov, I.A. Komarov, A.M. Malovichko, V.K. Nevolin, V.A. Petukhov, *Inorgan. Mater.*, **50** (1), 23 (2014). DOI: 10.7868/S0002337X14010011
- [5] А.С. Воронин, М.М. Симунин, Ф.С. Иванченко, А.В. Шиверский, Ю.В. Фадеев, И.А. Тамбасов, И.В. Немцев, А.А. Мацынин, С.В. Хартов, *Письма в ЖТФ*, **43** (17), 12 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.17.44941.16702
- [6] I. Anoshkin, I. Nefedova, I.S. Nefedov, D. Lyubchenko, A. Nasibulin, A. Raisanen, *Micro & Nano Lett.*, **11** (7), 343 (2016). DOI: 10.1049/mnl.2015.0582
- [7] M. Hu, J. Gao, Y. Dong, K. Li, G. Shan, S. Yang, R.K.-Y. Li, *Langmuir*, **28** (18), 7101 (2012). doi.org/10.1021/la300720y
- [8] Y. Han, J. Lin, Y. Liu, H. Fu, Y. Ma, P. Jin, J. Tan, *Sci. Rep.*, **6**, 25601 (2016). doi.org/10.1038/srep25601
- [9] А.С. Воронин, М.М. Симунин, Ю.В. Фадеев, Ф.С. Иванченко, Д.В. Карпова, И.А. Тамбасов, С.В. Хартов, *Письма в ЖТФ*, **45** (7), 59 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.07.47542.17626
- [10] Y. Liu, J. Tan, *Prog. Electromagn. Res.*, **140**, 353 (2013). DOI: 10.2528/PIER13050312