

13.1

## Прозрачное радиоэкранирующее покрытие, полученное при помощи самоорганизованного шаблона

© А.С. Воронин<sup>1,2</sup>, Ю.В. Фадеев<sup>1</sup>, И.В. Говорун<sup>3,4</sup>, А.С. Волошин<sup>2-4</sup>, И.А. Тамбасов<sup>3</sup>, М.М. Симунин<sup>1,2,4</sup>, С.В. Хартов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФИЦ „Красноярский научный центр СО РАН“, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>4</sup> 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  $28.4 \text{ dB}$  на частоте  $8 \text{ GHz}$ , 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  $20\text{--}30 \text{ dB}$  или экранировать  $99\text{--}99.9\%$  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  $3 \text{ ml/l}$  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  $21^\circ\text{C}$  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  $15 \text{ kV}$ .

Спектральная зависимость оптического пропускания серебряных микросетчатых покрытий измерялась в диапазоне  $400\text{--}700 \text{ nm}$ , 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.

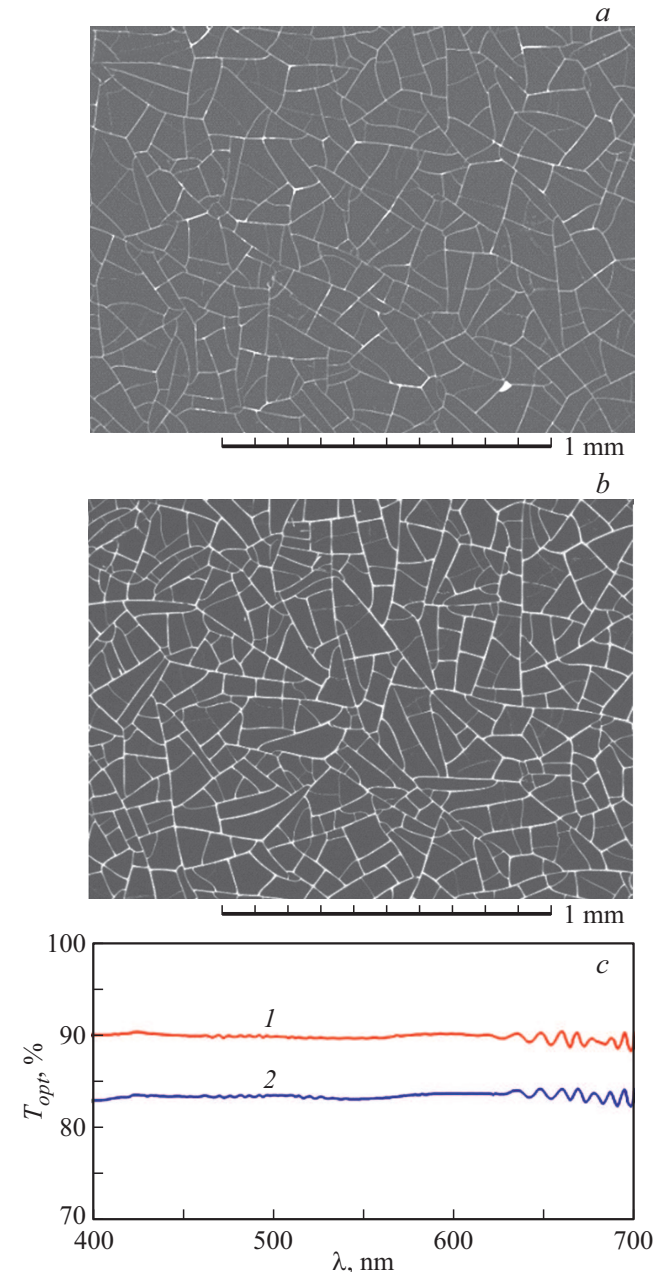
Экранирование электромагнитного излучения происходит за счет поглощения и отражения. Следует отметить, что в случае толстых пленочных структур также необходимо учитывать множественные отражения [10]. Коэффициент отражения ( $R$ ), передачи ( $T_{SHF}$ ) и поглощения ( $A$ ) мощности можно выразить как

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

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

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

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



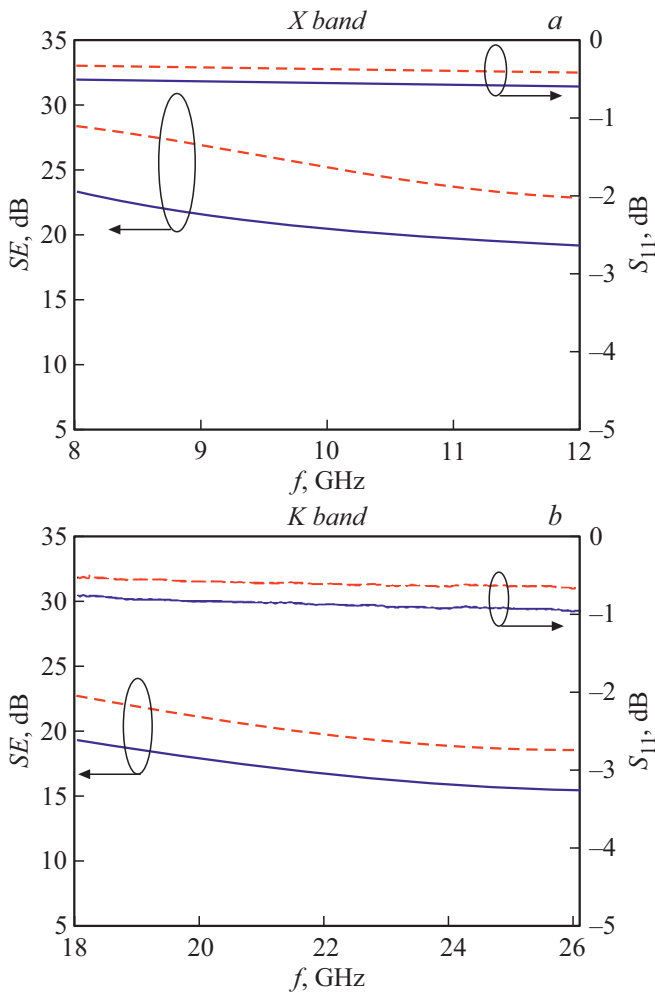
**Рис. 1.** СЭМ-изображения Ag МКС № 1 (*a*) и Ag МКС № 2 (*b*); *c* — оптическое пропускание образцов Ag МКС № 1 (1) и Ag МКС № 2 (2).

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