

## МНОГОСЛОЙНЫЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗВИТЫМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ РЕЛЬЕФОМ ПОВЕРХНОСТИ

А.Д. Гладинов

*Учреждение образования «Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники», г. Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Приведены результаты исследований взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона (2,0–17,0 ГГц) с многослойными тонкопленочными экранами, имеющими развитый периодический рельеф поверхности. Показано, что экраны с нанесенными на полимерные подложки покрытиями систем Al-(Fe-Ni) и Al-Cu-(Fe-Ni) характеризуются значениями коэффициента передачи электромагнитного излучения в пределах от –8,2 до –41,0 дБ. Данные экраны перспективны для защиты электронных устройств от воздействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона.

**Ключевые слова:** тонкопленочные экраны; многослойное покрытие; периодический рельеф; электронно-лучевое испарение; покрытия систем Al-(Fe-Ni) и Al-Cu-(Fe-Ni).

## MULTILAYER THIN-FILM ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDS WITH A DEVELOPED PERIODIC SURFACE RELIEF

A.D. Gladinov

*Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The article presents the results of the study of microwave radiation (2.0–17.0 GHz) interaction with multilayer thin-film shields with a developed periodic surface relief. It is shown that shields with Al-(Fe-Ni) and Al-Cu-(Fe-Ni) coatings applied to polymer substrates are characterized by electromagnetic radiation transmission coefficients ranging from –8.2 to –41.0 dB. These shields are promising for protecting electronic devices from microwave radiation.

**Keywords:** thin-film shields; multilayer coating; periodic relief; electron beam evaporation; coatings of the Al-(Fe-Ni) and Al-Cu-(Fe-Ni) systems.

### Введение

Известно, что искусственно созданные периодические структуры, в частности, двумерные метаповерхности, имеют уникальные свойства пропускания и отражения электромагнитного излучения (ЭМИ), обусловленные, преимущественно, поверхностным электромагнитным импедансом [1]. Достижения в области метаматериалов и метаповерхностей открывают новые возможности для создания материалов с управляемыми свойствами, которые не проявляются природными материалами [2, 3].

Свойства метаматериалов и метаповерхностей определяются повторяющейся периодической формой, геометрией и ориентацией структур, образующих метаматериал. Это позволяет сформировать структурированные среды и поверхности со свойствами, которые не встречаются в естественных материалах, и применять полученные метаматериалы и метаповерхности для управления ЭМИ оптического, СВЧ и терагерцового диапазонов длин волн. При размерах периодических структур меньших характерной длины волны излучения они позволяют сформировать необходимые защитные свойства за счет дифракции и интерференции излучения. При этом характерный размер периодических структур для микроволнового излучения составляет единицы миллиметров. Типичные метаматериалы и метаповерхности СВЧ-диапазона формируются из периодически повторяющихся электропроводящих элементов в диэлектрическом материале или в многослойных металлодиэлектрических системах.

### Основная часть

Тонкопленочные покрытия наносили методом электронно-лучевого испарения с помощью модернизированной установки вакуумного

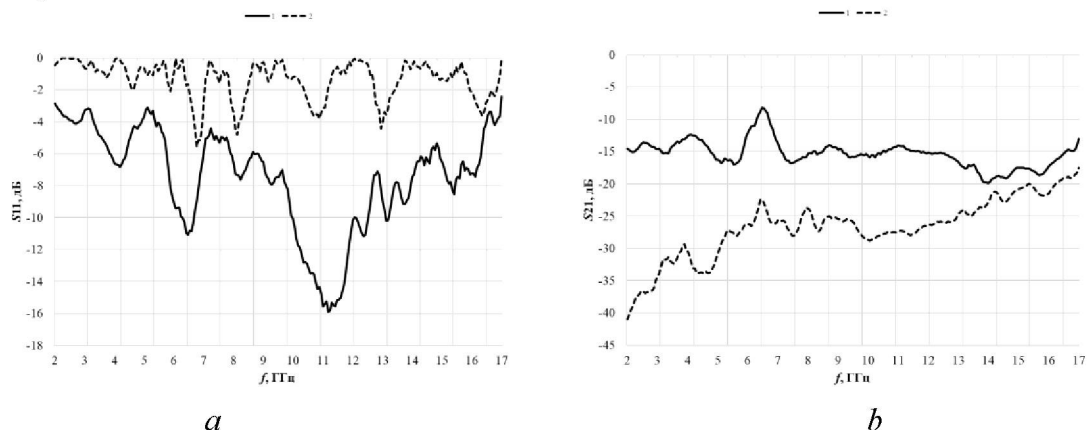
напыления ВУ-1А. Покрытия наносили на полимерную подложку из поликарбоната размерами  $300 \times 300 \times 0,5$  мм имеющую периодический рельеф, состоящий из полусфер диаметром 16 мм, имеющих высоту 8 мм, расположенных рядами  $17 \times 17$  шт. Выбор данного диаметра сфер связан с обеспечением наилучшего экранирования ЭМИ в верхнем диапазоне частот, так как с увеличением частоты эффективность экранирования снижается. Известно, что длина волны  $L$  при частоте 18 ГГц составляет 16,7 мм, и для обеспечения эффективного экранирования на данных частотах оптимальными являются полусферы диаметром  $D \approx 16$  мм, т.е. при соотношении  $L:D \approx 1:1$ . Кроме того, использование поверхностно-развитой подложки позволяет увеличить площадь поверхности экрана на 64 % в сравнении с таким же по размерам плоским экраном, что также повышает защитные свойства. В качестве покрытий использовали системы, состоящие из токопроводящих и магнитных слоев. Для нанесения токопроводящих слоев использовали медь марки М0 и алюминий марки А<sub>5</sub>N, для магнитного слоя использовали сплав железо-никель азеотропного состава Fe<sub>56</sub>Ni<sub>44</sub> [4].

В соответствии с отработанными методиками, представленными в работе [5], были нанесены покрытия со слоями Al, Cu и Fe-Ni толщинами 150 нм каждый. Системы покрытий Al-(Fe-Ni) и Al-Cu-(Fe-Ni) имели общую толщину 300 и 450 нм соответственно. Исследование коэффициентов отражения и передачи проводили, используя измерительный модуль SNA 0.01-18. Измерения с применением этого модуля проводили в диапазоне частот 2-17 ГГц в соответствии с ГОСТ 20271.1-91 «Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров».

Частотные зависимости коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) и передачи ( $S_{21}$ ) экранов с покрытиями систем Al-(Fe-Ni) и Al-Cu-(Fe-Ni) представлены на рисунке. Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2-17 ГГц экранов, изготовленных на основе покрытий системы Al-(Fe-Ni) (часть *a* рисунка, кривая 1) изменяются в пределах от (-2,4) до (-15,8) дБ. Значения  $S_{11}$  экранов с нанесенным на подложку дополнительным токопроводящим слоем Cu системы Al-Cu-(Fe-Ni) (часть *a* рисунка, кривая 2) увеличиваются во всем исследованном диапазоне частот ЭМИ и изменяются в пределах от (-0,1) до (-5,6) дБ.

Значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 2-17 ГГц для экранов системы Al-(Fe-Ni) (часть *b* рисунка, кривая 1) изменяется в пределах от (-19,9) до (-8,2) дБ, для системы Al-Cu-(Fe-Ni) (часть *b* рисунка, кривая 2) от (-41,0) до (-17,4) дБ. Как видно из полученных результатов исследований значений  $S_{11}$  и  $S_{21}$  добавление подслоя Cu толщиной 150 нм приводит к увеличению значений коэффициента отражения ЭМИ более чем в 2,5 раза, по сравнению с экраном ЭМИ без него. При этом за счет увеличения отражения ЭМИ

возрастает коэффициент передачи до 2 раз по сравнению с системой Al-(Fe-Ni).



*a* *b*  
Частотные зависимости в диапазоне частот 2–17 ГГц покрытий систем Al-(Fe-Ni) (кривая 1) и Al-Cu-(Fe-Ni) (2): *a* –  $S_{11}$ ; *b* –  $S_{21}$   
Frequency dependences in the frequency range of 2-17 GHz of system coatings Al-(Fe-Ni) (curve 1) and Al-Cu-(Fe-Ni) (2): *a* –  $S_{11}$ ; *b* –  $S_{21}$

### Заключение

Установлено, что значения коэффициента отражения  $S_{11}$  ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов с нанесенными на полимерную подложку, имеющую периодический рельеф поверхности, покрытиями систем Al-(Fe-Ni) и Al-Cu-(Fe-Ni), изменяются в следующих пределах: (–2,4)–(–15,8) дБ и (–0,1)–(–5,6) дБ соответственно. Коэффициент передачи данных экранов изменяется в следующих пределах: (–19,9)–(–8,2) дБ и (–41,0)–(–17,4) дБ соответственно.

Экран с покрытием системы Al-Cu-(Fe-Ni) имеет повышенные значения коэффициента отражения до 2,5 раз и коэффициента передачи до 2 раз.

### Список использованных источников

1. Xu, Z. Surface Waves on Equivalent Impedance Metasurfaces: Recent Developments and New Goals / Z. Xu // 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Chengdu, China, 21–25 April 2024. — IEEE, 2024. — P. 1–7. — doi: 10.1109/PIERS62282.2024.10618400
2. Метаповерхность на основе одновитковых планарных спиралей со свойством не отражающего поглотителя в СВЧ диапазоне / И. А. Фаняев, А. Л. Самофалов, И. В. Семченко [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. — 2024. — № 3 (60). — С. 38–43.
3. Максимова, А. Г. Широкополосная поглощающая метаповерхность на основе воды / А. Г. Максимова, М. А. Одит // Матер. VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». — Санкт-Петербург, 3–6 июня 2019 г. — С. 514–518.

4. Gladinov, A. D. S-Parameters of Flexible Electromagnetic Radiation Shields with Fe–Ni System Coating / A. D. Gladinov, O. V. Boiprav, V. A. Bogush // *Materials Physics and Mechanics*. 2024. Vol. 52, Iss. 5. P. 74–82.

5. Гладинов, А. Д. Характеристики отражения и передачи многослойных тонкопленочных экранов электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне / А. Д. Гладинов, О. В. Бойправ, В. А. Богуш // *Доклады БГУИР*. 2025. Т. 23, № 6. С. 56–64.

## References

1. Xu, Z. Surface Waves on Equivalent Impedance Metasurfaces: Recent Developments and New Goals / Z. Xu // *2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Chengdu, China, 21–25 April 2024. IEEE, 2024. P. 1–7. doi: 10.1109/PIERS62282.2024.10618400.

2. Metasurface Based on Single-Turn Planar Spirals with the Property of a Non-Reflective Absorber in the Microwave Range / I. A. Fanyaev, A. L. Samofalov, I. V. Semchenko [et al.] // *Problems of Physics, Mathematics and Technology*. 2024. No. 3 (60). P. 38–43 (in Russian).

3. Maksimova, A. G. Broadband Absorbing Metasurface Based on Water / A. G. Maksimova, M. A. Odit // *Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference “Microwave Electronics and Microelectronics”*. St. Petersburg, June 3–6, 2019. P. 514–518 (in Russian).

4. Gladinov, A. D. S-Parameters of Flexible Electromagnetic Radiation Shields with Fe–Ni System Coating / A. D. Gladinov, O. V. Boiprav, V. A. Bogush // *Materials Physics and Mechanics*. 2024. Vol. 52, Iss. 5. P. 74–82.

5. Gladinov A. D., Boiprav O. V., Bogush V. A. Reflection and Transmission Characteristics of Multilayer Thin-Film Screens of Electromagnetic Radiation in the Microwave Range / A. D. Gladinov, O. V. Boiprav, V. A. Bogush // *Doklady BGUIR*. 2025. Vol. 23, iss. 6. P. 56–64 (in Russian).

## Сведения об авторе

Гладинов А. Д., асп. каф. защиты информации, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», a.gladinov@bsuir.by.

## Information about the author

Gladinov A. D., Postgraduate at Information Protection Department, Educational Institution “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, a.gladinov@bsuir.by.