



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-56-64>

УДК 537.874; 620.22

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ МНОГОСЛОЙНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

А. Д. ГЛАДИНОВ, О. В. БОЙПРАВ, В. А. БОГУШ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Представлены результаты исследований характеристик отражения и передачи экранов электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне, представляющих собой полимерные подложки с многослойными покрытиями, состоящими из слоя магнитного сплава систем Fe–Ni, Fe–Co или Ni–Co и подслоя Al или Al–Cu с поверхностным сопротивлением не более 0,1 Ом/кв. Приведены режимы нанесения таких покрытий и технологии изготовления экранов. Исследовано влияние включения в структуру покрытий рассматриваемых экранов подслоев Al и Al–Cu на значения их коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне. Установлено, что наименьшие значения коэффициентов отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц (до –8,5 дБ) имеют экраны с покрытием системы Fe–Ni. При этом коэффициент передачи электромагнитного излучения в указанном диапазоне частот таких экранов составляет –11,8 дБ. Показано, что в результате включения в структуру покрытий этих экранов подслоев из Al и Cu значение их коэффициентов отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц увеличивается до –0,1 дБ, а значение коэффициента передачи уменьшается до –31,3 дБ. Полученные данные можно использовать при разработке экранов электромагнитного излучения СВЧ-диапазона со сниженными массогабаритными параметрами.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, тонкопленочные экраны, многослойные покрытия, электронно-лучевое испарение, коэффициенты отражения и передачи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. 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. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-56-64>.

REFLECTION AND TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF MULTILAYER THIN-FILM SCREENS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE MICROWAVE RANGE

ANTON D. GLADINOV, OLGA V. BOIPRAV, VADIM A. BOGUSH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of studies of the characteristics of reflection and transmission of electromagnetic radiation screens in the microwave range, which are polymer substrates with multilayer coatings consisting of a layer of magnetic alloy of the Fe–Ni, Fe–Co or Ni–Co systems and an Al or Al–Cu sublayer with a surface resistance of no more than 0.1 Ohm/sq. The application modes for such coatings and screen manufacturing technologies are presented. The effect of the inclusion of Al and Al–Cu sublayers in the coating structure of the screens under consideration on the values of their reflection and transmission coefficients of microwave electromagnetic radiation is investigated. It is established that screens with a Fe–Ni coating have the lowest values of the reflection coefficients of electromagnetic radiation in the frequency range of 2–17 GHz (up to –8.5 dB). At the same time, the transmission coefficient of electromagnetic radiation in the specified frequency range of such screens is –11.8 dB. It was shown that by incorporating Al and Cu sublayers into the coating structure of these screens, their electromagnetic radiation reflectivity in the 2–17 GHz frequency range increases to –0.1 dB, while their transmission coefficient decreases to –31.3 dB. These data can be used in the development of microwave electromagnetic radiation screens with reduced weight and dimensions.

Keywords: microwave radiation, thin-film shields, multilayer coatings, electron beam evaporation, reflection and transmission coefficients.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Gladinov A. D., Boiprav O. V., Bogush V. A. (2025) Reflection and Transmission Characteristics of Multilayer Thin-Film Screens of Electromagnetic Radiation in the Microwave Range. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 56–64. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-56-64> (in Russian).

Введение

Экраны электромагнитного излучения (ЭМИ) представляют собой нанесенные на диэлектрические подложки покрытия, состоящие из слоев толщиной от нескольких нанометров до сотен микрометров, выполненные из материалов высокой проводимости и/или из магнитных материалов [1, 2]. Среди экранирующих покрытий ЭМИ особое место занимают тонкопленочные (толщиной до 1 мкм) металлические покрытия. Применяемые в настоящее время экранирующие покрытия обеспечивают электромагнитную защиту изделий электроники в корпусах из полимерных диэлектрических материалов. В случаях, когда защищаемый объект имеет сложный профиль поверхности, особые условия эксплуатации, например, в космосе, где важны его массогабаритные параметры, как правило, применяют многослойные экраны, состоящие из последовательно чередующихся слоев, выполненных из магнитных сплавов систем Fe–Ni, Fe–Co или Ni–Co, а также из высокопроводящих элементов, чаще всего из меди или алюминия, обеспечивающих получение слоев с поверхностным электросопротивлением на уровне 0,1 Ом/кв. Многослойные экраны характеризуются высокой эффективностью экранирования в L-, S-, C-, X- и K_u-диапазонах частот от 1 до 18 ГГц. Но вместе с тем у них высокий коэффициент отражения радиоволн, что обусловлено существенным различием волнового сопротивления металлических слоев и воздуха [3–5].

Сегодня наиболее перспективные области применения тонкопленочных покрытий экранирования ЭМИ – это аэрокосмические технологии (наноспутники), электротранспортные средства, беспилотные летательные аппараты. Актуальность использования тонкопленочных экранов в данных областях обусловлена повышенными требованиями к их массогабаритным параметрам.

В статье представлены результаты исследований в сфере создания тонкопленочных экранов ЭМИ СВЧ-диапазона [6–8]. Установлены закономерности изменения коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} ЭМИ в СВЧ-диапазоне многослойных тонкопленочных экранов, представляющих собой полимерные подложки с многослойными покрытиями, состоящими из слоя магнитного сплава систем Fe–Ni, Fe–Co или Ni–Co и подслоя Al и/или Cu, в зависимости от состава указанных слоев. Такие экраны, в отличие от ранее исследованных в [9, 10], обладают меньшими массогабаритными параметрами, что расширяет сферу их применения.

Методика проведения экспериментальных исследований

В ходе проведения исследований использовался измерительный модуль SNA 0.01-18. Измерения с применением этого модуля проводились в диапазоне частот 2–17 ГГц в соответствии с ГОСТ 20271.1–91 «Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров». Схема соединения блоков измерительного модуля SNA 0.01-18 при измерении S_{11} и S_{21} приведена на рис. 1, где ГКЧ – генератор качающейся частоты.

В качестве подложек использовались сотовый поликарбонат (ГОСТ Р 56712–2015) и полиметилметакрилат (ПММА, оргстекло, ГОСТ 17622–72). Размеры образцов в плане составляли 300×400 мм, толщина 4 мм. Внешний вид подложек и экрана ЭМИ показан на рис. 2.

Покрытия на полимерные подложки наносили с помощью модернизированной установки вакуумного напыления ВУ-1А. Схема формирования слоев электронно-лучевым испарением на полимерных подложках приведена на рис. 3. В качестве покрытий использовались системы, состоящие из токопроводящих и магнитных слоев. На подложки из ПММА наносили следующие системы покрытий: Al–Cu–(Fe–Ni), Al–Cu–(Fe–Co), Al–Cu–(Ni–Co) и Al–(Fe–Ni); на подложки из поликарбоната – слои из сплавов систем Fe–Ni, Fe–Co и Ni–Co. Для приготовления сплавов и нанесения пленок использовали металлы следующих марок: алюминий A₅N, медь M0, кобальт K1, АРМКО-железо, никель H0. Сплавы систем Fe–Ni, Fe–Co и Ni–Co являлись азеотропными и имели химические составы, масс.-%: Fe₅₅Ni₄₅, Fe₅₄Co₄₆, Ni₄₉Co₅₁.

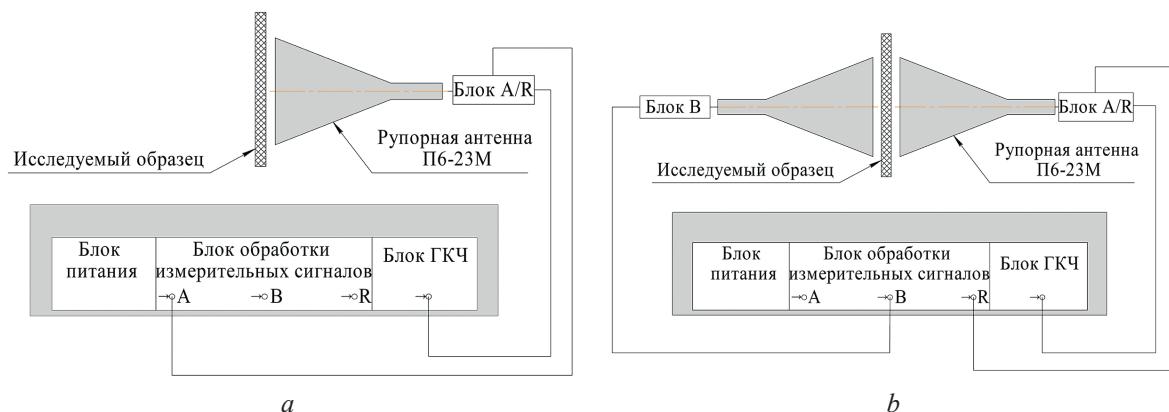


Рис. 1. Схема соединения блоков измерительного модуля SNA 0.01-18 при измерении: *a* – S_{11} ; *b* – S_{21}
Fig. 1. Connection diagram of the SNA 0.01-18 measuring module blocks during measurement: *a* – S_{11} ; *b* – S_{21}



Рис. 2. Внешний вид подложек из сотового поликарбоната (*a*) и оргстекла (*b*)
и экрана электромагнитного излучения (*c*)
Fig. 2. External appearance of substrates made of cellular polycarbonate (*a*) and organic glass (*b*)
and an electromagnetic radiation screen (*c*)

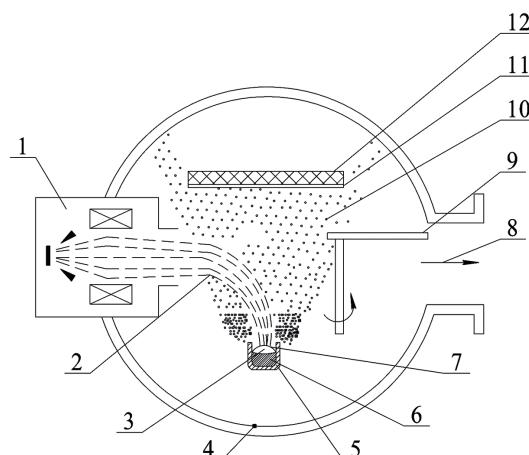


Рис. 3. Схема формирования слоев электронно-лучевым испарением металлов на полимерную подложку: 1 – электронная пушка;
2 – электронный пучок; 3 – поверхность, бомбардируемая пучком; 4 – кожух технологической камеры;
5 – молибденовый тигель; 6 – испаряемый металл; 7 – поверхность испарения; 8 – откачка вакуумной камеры;
9 – диафрагма испарителя; 10 – поток пара; 11 – напыляемый слой; 12 – полимерная подложка
Fig. 3. Schematic diagram of the formation of layers by electron-beam evaporation of metals on a polymer substrate:
1 – electron gun; 2 – electron beam; 3 – surface bombarded by the beam;
4 – process chamber housing; 5 – molybdenum crucible; 6 – evaporated metal; 7 – evaporation surface;
8 – vacuum chamber pumping; 9 – evaporator diaphragm; 10 – vapor flow;
11 – deposited layer; 12 – polymer substrate

Общая методика изготовления экранов ЭМИ состояла из следующих этапов.

- Подготовка подложек размерами $300 \times 400 \text{ мм}^2$.
- Обезжиривание рабочих поверхностей полимерных подложек перед нанесением покрытий.
- Высушивание подложек после обезжиривания на воздухе в течение 10 мин.
- Подготовка металлов/сплавов перед нанесением в соответствии с табл. 1.
- Загрузка металлов/сплавов в молибденовые тигли.
- Загрузка полимерной подложки, обезжиренной и высушенной в результате реализации этапов 2–3, в вакуумную камеру электронно-лучевой установки.
- Установка молибденовых тиглей, загруженных сплавами в результате реализации этапа 5, в вакуумную камеру установки таким образом, чтобы расстояние S между графитовыми тиглями и полимерной подложкой было согласно табл. 2.
- Запуск установки электронно-лучевого испарения и выполнение процедуры нанесения покрытий в соответствии с режимами из табл. 2.
- Отключение установки электронно-лучевого испарения и по истечении 1800 с извлечение из нее полученного электромагнитного экрана.

В табл. 1 приведены системы покрытий и толщина слоев покрытий, а также общая толщина нанесенных на образцы экранов покрытий.

Таблица 1. Системы и толщины слоев покрытий на экранах электромагнитного излучения
Table 1. Systems and thicknesses of coating layers on electromagnetic radiation screens

Номер образца экрана	Система покрытия	Толщина слоя покрытия, нм					Тип полимерной подложки	Общая толщина покрытия, нм
		Al	Cu	Fe–Ni	Fe–Co	Ni–Co		
1	Fe–Ni	–	–	150	–	–	Поликарбонат	150
2	Al–(Fe–Ni)	150	–	150	–	–	ПММА	300
3	Al–Cu–(Fe–Ni)	150	150	150	–	–	ПММА	450
4	Fe–Co	–	–	–	150	–	Поликарбонат	150
5	Al–Cu–(Fe–Co)	150	150	–	150	–	ПММА	450
6	Ni–Co	–	–	–	–	150	Поликарбонат	150
7	Al–Cu–(Ni–Co)	150	150	–	–	150	ПММА	450

Согласно табл. 1, толщина каждого нанесенного слоя в покрытиях составляла 150 нм. Режимы нанесения слоев покрытий методом электронно-лучевого испарения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Режимы нанесения слоев покрытий
Table 2. Coating layer application modes

Система покрытия	Параметр						
	p , Па	$T_{\text{подл}}$, °C	t , с	v , нм/с	$T_{\text{исп}}$, °C	S , мм	$m_{\text{нав}}$, г
Al	$5 \cdot 10^{-2}$	40	30	5	1100	400	30
Cu			75	2	1300	350	20
Fe–Ni			150	1	1800	350	20
Fe–Co			150	1	1580	350	20
Ni–Co			150	1	1575	350	20

Обозначения: p – давление в вакуумной камере; $T_{\text{подл}}$ – температура подложки; t – время нанесения покрытия; v – скорость нанесения покрытия; $T_{\text{исп}}$ – температура испарения; S – расстояние от тигля до подложки; $m_{\text{нав}}$ – масса навески.

Результаты исследований и их обсуждение

Частотные зависимости коэффициента отражения S_{11} образцов экранов № 1, 2, 3 системы Fe–Ni представлены на рис. 4. Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов, изготовленных на основе покрытия системы Fe–Ni (рис. 4, a, кривая 1) изменяются в пределах от (–0,9) до (–8,5) дБ. Значения S_{11} экранов с предварительно нанесенными на подложку токопроводящими слоями Al и Al–Cu (рис. 4, a, кривые 2 и 3) увеличиваются во всем исследованном диапазоне частот ЭМИ и изменяются в пределах от (–0,2) до (–2,5) дБ и от (–0,1) до (–2,3) дБ соответственно.

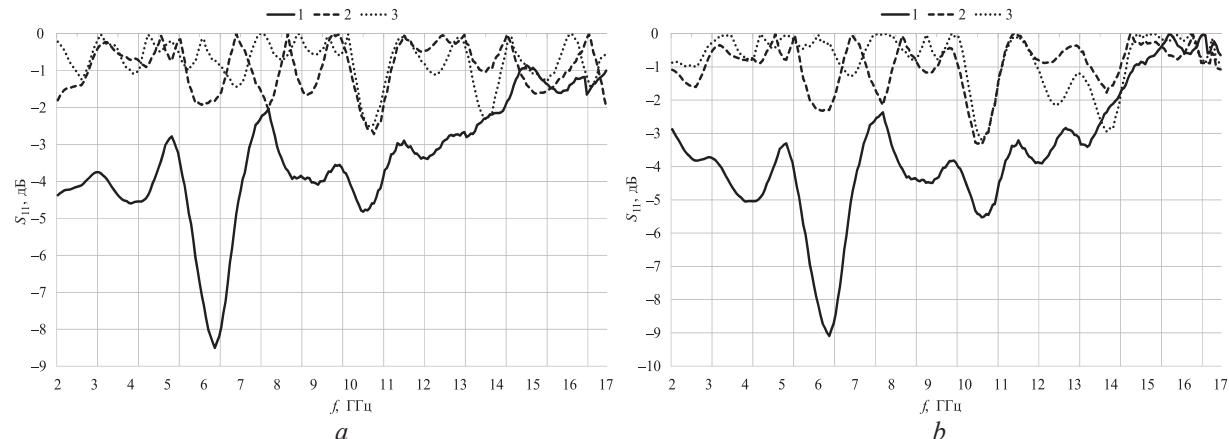


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения образцов экранов № 1 (кривые 1), № 2 (2) и № 3 (3) при измерении: *a* – без отражателя; *b* – с отражателем

Fig. 4. Frequency dependence of the reflection coefficient of screen samples No 1 (curves 1), No 2 (2) and No 3 (3) during measurement: *a* – without reflector; *b* – with reflector

Коэффициент отражения S_{11} экранами системы Fe–Ni при измерении с металлическим отражателем в диапазоне частот 2–17 ГГц изменяется от (–0,1) до (–9,0) дБ, а при предварительном нанесении токопроводящих слоев Al или Al–Cu – от (–0,1) до (–3,2) дБ и от (–0,1) до (–3,0) дБ соответственно.

Для системы Fe–Ni свойственно резонансное согласование, проявляющееся в пикообразных уменьшениях значений коэффициента отражения S_{11} в частотных диапазонах 3–5, 5–7 и 10–11 ГГц (рис. 4, a, кривая 1). Нанесение слоев Al и Cu приводит к обратному эффекту, т. е. к отражению большей части энергии ЭМИ, что проявляется в скачкообразном увеличении коэффициента S_{11} во всем исследованном частотном диапазоне (рис. 4, a, кривые 2 и 3 соответственно). Увеличение резонанса при измерениях коэффициента отражения S_{11} с металлическим отражателем особенно сильно проявляется в частотных диапазонах 5–6 и 10–11 ГГц (рис. 4, b).

Частотные зависимости S_{11} образцов экранов № 4 и 5 системы Fe–Co представлены на рис. 5. Значения S_{11} экранов с покрытием Fe–Co (рис. 5, a, кривая 1) изменяются в пределах от (–0,1) до (–3,7) дБ.

Предварительное нанесение на подложки слоев Al и Cu приводит к изменению коэффициента отражения ЭМИ покрытием Al–Cu–(Fe–Co) от (–0,1) до (–2,6) дБ. При измерении с отражателем (рис. 5, b) значения S_{11} для системы Fe–Co изменяются от (–0,1) до (–3,6) дБ, а при предварительном нанесении токопроводящих слоев Al и Cu – от (–0,1) до (–2,6) дБ (рис. 5, b, кривые 1 и 2 соответственно).

Система покрытия Fe–Co, по сравнению с Fe–Ni, обладает более чем в два раза большим значением S_{11} во всем исследованном диапазоне частот. Коэффициент отражения экрана с покрытием системы Ni–Co в диапазоне частот 2–17 ГГц изменяется от (–0,2) до (–2,7) дБ (рис. 6, a, кривая 1), а при предварительном нанесении на подложки слоев Al и Cu – от (–0,1) до (–2,6) дБ (рис. 6, a, кривая 2).

Частотные зависимости S_{11} образцов экранов № 6 и 7 системы Ni–Co представлены на рис. 6.

При измерениях с металлическим отражателем значения S_{11} экранов № 6 и 7 изменяются от (–0,1) до (–2,6) дБ и от (–0,1) до (–2,8) дБ соответственно (рис. 6, b, кривые 1 и 2).

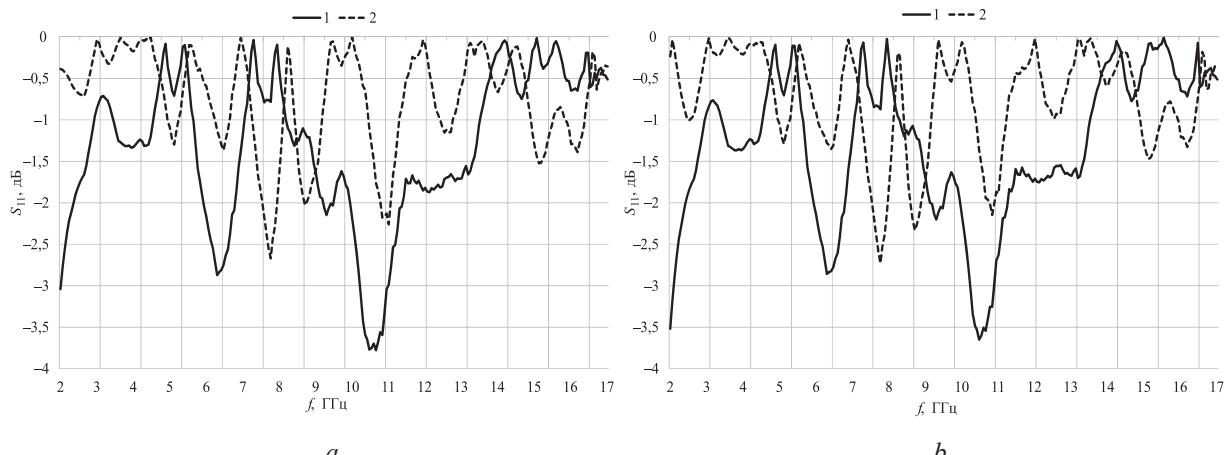


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента отражения образцов экранов № 4 (кривые 1) и № 5 (2) при измерении: *a* – без отражателя; *b* – с отражателем

Fig. 5. Frequency dependence of the reflection coefficient of screen samples No 4 (curves 1) and No 5 (2) during measurement: *a* – without reflector; *b* – with reflector

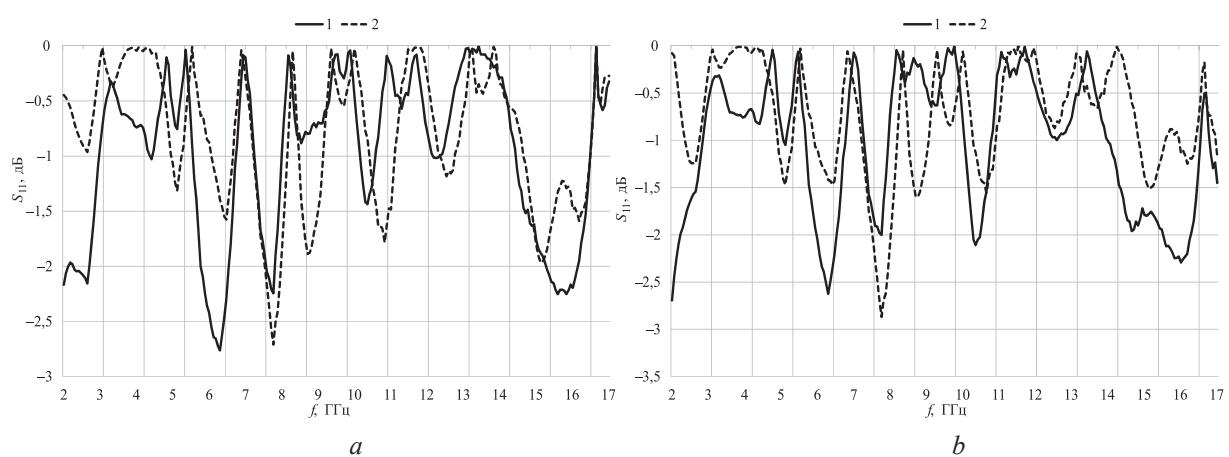


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента отражения образцов экранов № 6 (кривые 1) и № 7 (2) при измерении: *a* – без отражателя; *b* – с отражателем

Fig. 6. Frequency dependence of the reflection coefficient of screen samples No 6 (curves 1) and No 7 (2) during measurement: *a* – without reflector; *b* – with reflector

В сравнении с системами Fe–Ni и Fe–Co система Ni–Co проявляет наибольшее количество резонансных пиков, имеющих место в частотных диапазонах 5–6, 7–8, 10–11 и 14–16 ГГц.

Результаты измерений коэффициента передачи S_{21} образцов экранов № 1–7 приведены на рис. 7.

Наименьшие значения S_{21} в диапазоне частот 2–17 ГГц, изменяющиеся в пределах от (–5) до (–11,8) дБ, имеют экраны с покрытием системы Fe–Ni (рис. 7, *a*, кривая 1). Наибольшие значения S_{21} , изменяющиеся в диапазоне (–32,2)–(–17,1) дБ, имеют экраны с покрытием системы Ni–Co (рис. 7, *c*, кривая 1). И это единственная система покрытия, при добавлении к которой токопроводящих слоев происходит не увеличение коэффициента передачи ЭМИ, а наоборот, уменьшение. Данное явление, скорее всего, связано с образованием твердых растворов замещения в покрытии системы Ni–Co, что приводит к уменьшению магнитной проницаемости и, как следствие, к ухудшению экранирующих характеристик. Поэтому необходимы дальнейшие исследования фазового состава и измерения магнитной проницаемости слоев. Экраны ЭМИ, содержащие магнитные и токопроводящие слои, характеризуются значениями коэффициента передачи излучения СВЧ-диапазона $S_{21} > -30$ дБ. Полученные результаты и методика изготовления тонкопленочных экранов могут быть использованы при создании экранов ЭМИ, отличающихся минимальной массой на единицу площади экранируемых объектов.

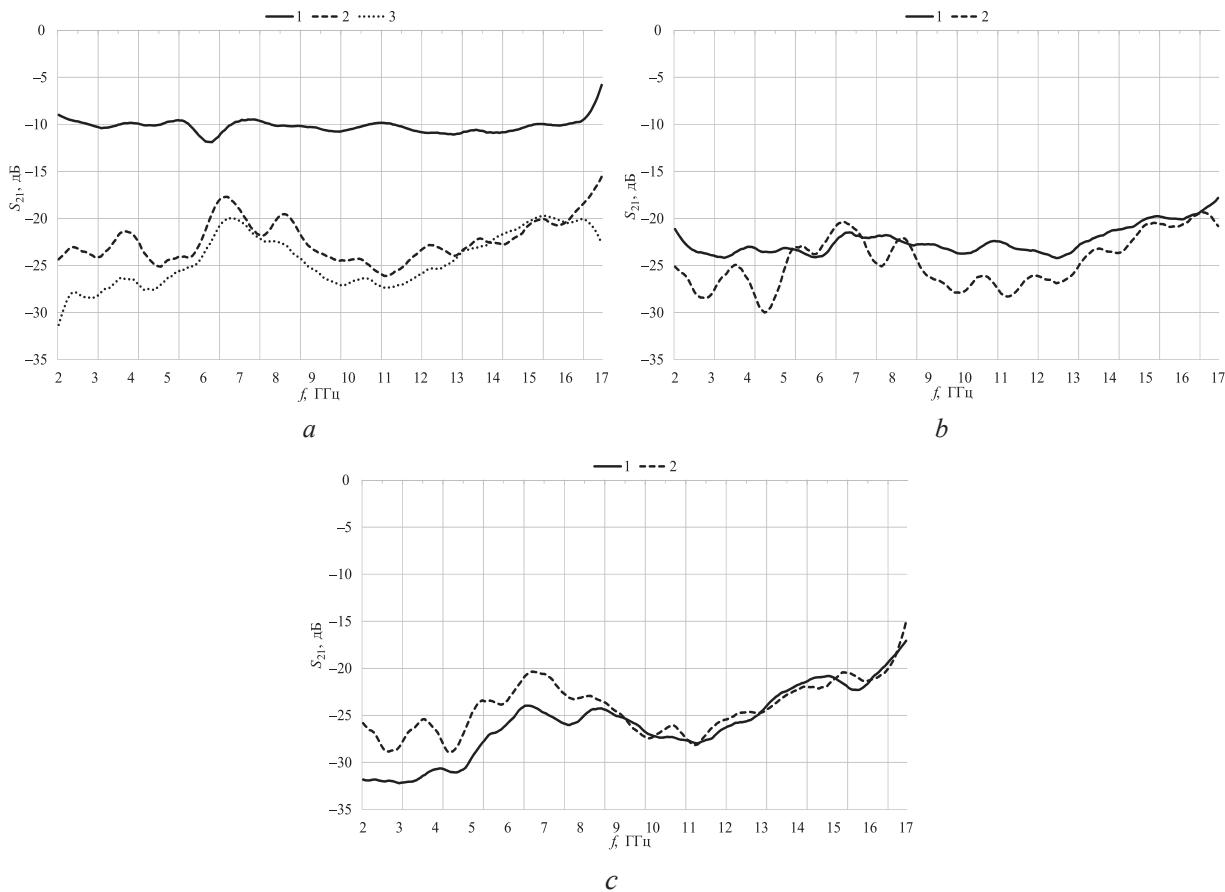


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента передачи образцов экранов:
 а – № 1, 2, 3 (кривые 1, 2, 3 соответственно);
 б – № 4, 5 (1, 2 соответственно);
 в – № 6, 7 (1, 2 соответственно)

Fig. 7. Frequency dependence of the transmission coefficient of screen samples:
 a – No 1, 2, 3 (curves 1, 2, 3 respectively);
 b – No 4, 5 (1, 2 respectively);
 c – No 6, 7 (1, 2 respectively)

Заключение

1. Установлено, что значения коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов с нанесенным на полимерную подложку слоем сплава Fe–Ni, Fe–Co или Ni–Co толщиной 150 нм изменяется соответственно в следующих пределах: (–0,9)–(–8,5) дБ, (–0,1)–(–3,7) дБ и (–0,1)–(–2,8) дБ. Коэффициент передачи данных экранов соответственно изменяется в следующих пределах: (–5)–(–11,8) дБ, (–17,8)–(–24,2) дБ и (–17,1)–(–32,2) дБ.

2. При нанесении на полимерную подложку подслоя Al толщиной 150 нм экран с покрытием системы Al–(Fe–Ni) имеет повышенные значения коэффициента отражения в пределах (–0,1)–(–3,2) дБ и коэффициента передачи в пределах (–15,5)–(–26,1) дБ. При нанесении подслоя Al–Cu толщиной 150 нм экраны систем Al–Cu–(Fe–Ni), Al–Cu–(Fe–Co) и Al–Cu–(Ni–Co) имеют более высокую эффективность экранирования электромагнитного излучения при значениях коэффициента отражения в диапазонах (–0,1)–(–3,0) дБ, (–0,1)–(–2,6) дБ и (–0,1)–(–2,7) дБ соответственно и коэффициента передачи в пределах (–20)–(–31,3) дБ, (–20)–(–30,1) дБ и (–15)–(–28,8) дБ соответственно.

3. Полученные результаты перспективны для применения в разработках аэрокосмических аппаратов, электротранспортных средств, беспилотных летательных аппаратов, а также при совершенствовании экранов электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, отличающихся минимальной массой на единицу площади экранируемых объектов.

Список литературы

1. Данилин, Б. С. Вакуумное нанесение тонких пленок / Б. С. Данилин. М.: Энергия, 1967.
2. Минайчев, В. Е. Нанесение пленок в вакууме / В. Е. Минайчев. М.: Высш. шк., 1989.
3. Holger, H. Development of New PVD Coatings for Magnesium Alloys with Improved Corrosion Properties / H. Hoche, S. Groß, M. Oechsner // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 259. P. 102–108.
4. Берлин, Е. В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. В. Берлин, С. А. Двинин, Л. А. Сейдман. М.: Техносфера, 2007.
5. Проводящие и отражающие свойства тонких металлических пленок / И. В. Антонец [и др.] // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, вып. 11.
6. Гладинов, А. Д. Конструкции экранов электромагнитного излучения на основе гофрированной металлизированной полимерной пленки / А. Д. Гладинов // Информационная безопасность: сб. матер. 60-й науч. конф. аспир., магистр. и студ. БГУИР, Минск, 22–26 апр. 2024 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2024. С. 39–43.
7. Гладинов, А. Д. Коэффициенты отражения и передачи покрытий систем Al–Fe–Ni и Al–Cu–Fe–Ni гибких экранов электромагнитного излучения / А. Д. Гладинов // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики: электрон. сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 14 нояб. 2024 г. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т имени Евфросинии Полоцкой, 2025. С. 450–453.
8. 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.
9. Особенности синтеза многослойных структур на основе электролитически осажденных пленок никель–железо и эффективность их радиационной защиты / С. С. Грабчиков [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2017. № 2. С. 23–29.
10. Электрохимически осажденные покрытия на основе висмута и эффективность их защиты от электронного излучения / Д. И. Тишкевич [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. 2017. № 3. С. 19–29.

Поступила 17.10.2025

Принята в печать 28.11.2025

References

1. Danilin B. S. (1967) *Vacuum Deposition of Thin Films*. Moscow, Energy Publ. (in Russian).
2. Minaichev V. E. (1989) *Application of Films in Vacuum*. Moscow, Higher School Publ. (in Russian).
3. Holger H., Groß S., Oechsner M. (2014) Development of New PVD Coatings for Magnesium Alloys with Improved Corrosion Properties. *Surface and Coatings Technology*. 259, 102–108.
4. Berlin E. V., Dvinin S. A., Seidman L. A. (2007) *Vacuum Technology and Equipment for Deposition and Etching of Thin Films*. Moscow, Tekhnosfera Publ. (in Russian).
5. Antonets I. V., Kotov L. N., Nekipelov S. V., Karpushov E. V. (2004) Conductive and Reflective Properties of Thin Metal Films. *Journal of Technical Physics*. 74 (11) (in Russian).
6. Gladinov A. D. (2024) Designs of Electromagnetic Shields Based on Corrugated Metallized Polymer Film. *Information Security, Collection of Materials of the 60th Scientific Conference of Postgraduate, Master's and Undergraduate Students of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. 39–43 (in Russian).
7. Gladinov A. D. (2025) Reflection and Transmission Coefficients of Al–Fe–Ni and Al–Cu–Fe–Ni Coatings of Flexible Electromagnetic Radiation Shields. *Actual Problems of Physics, Electronics and Power Engineering, Electronic Collection of Articles of the II International Scientific and Practical Conference*. 450–453 (in Russian).
8. Gladinov A. D., Boiprav O. V., Bogush V. A. (2024) S-Parameters of Flexible Electromagnetic Radiation Shields with Fe–Ni System Coating. *Materials Physics and Mechanics*. 52 (5), 74–82.
9. Grabchikov S. S., Lastovskii S. B., Solobai A. A., Trukhanov A. V., Chushkova D. I. (2017) Synthesis Features and Radiation Protection Efficiency of Multilayer Structures Based on Ni–Fe Electrodeposited Films. *News of the National Academy of Sciences of Belarus. Gray Physics-Technical Sciences*. (2), 23–29 (in Russian).
10. Tishkevich D. I., Bogatyrev Y. V., Grabchikov S. S., Lastovskii S. B., Tsybulskaya L. S., Shendyukov V. S., et al. (2017) Electrochemical Deposited Bismuth Coatings and the Efficiency of Their Protection from Electron Irradiation. *News of the National Academy of Sciences of Belarus. Gray Physics-Technical Sciences*. (3), 19–29 (in Russian).

Received: 17 October 2025

Accepted: 28 November 2025

Вклад авторов

Гладинов А. Д. разработал метод изготовления экранов электромагнитного излучения на основе токопроводящих и магнитных покрытий, провел измерения коэффициентов отражения и передачи экранов и выполнил сравнительный анализ их частотных зависимостей в СВЧ-диапазоне.

Бойправ О. В. оказала помощь в интерпретации результатов измерений и написании статьи.

Богуш В. А. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принимал участие в интерпретации результатов.

Authors' contribution

Gladinov A. D. has developed a method for manufacturing electromagnetic radiation shields based on conductive and magnetic coatings, measured the shields' reflection and transmission coefficients, and performed a comparative analysis of their frequency dependences in the microwave range.

Boiprav O. V. has assisted in interpreting the measurement results and writing the article.

Bogush V. A. has defined the tasks that needed to be addressed during the research and participated in interpreting the results.

Сведения об авторах

Гладинов А. Д., асп. каф. защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Бойправ О. В., канд. техн. наук, доц., зав. каф. защиты информации, БГУИР

Богуш В. А., д-р физ.-мат. наук, проф., ректор БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-38
E-mail: a.gladinov@bsuir.by
Гладинов Антон Дмитриевич

Information about the authors

Gladinov A. D., Postgraduate at Information Protection Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Boiprav O. V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of Information Protection Department, BSUIR

Bogush V. A., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Rector of the BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-38
E-mail: a.gladinov@bsuir.by
Gladinov Anton Dmitrievich