



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-93-100>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.37

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

БОЙПРАВ О.В., БОГУШ Н.В., ЛЫНЬКОВ Л.М.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Поступила в редакцию 25 сентября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Цель работы, результаты которой представлены в рамках статьи, заключалась в исследовании закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения диапазона частот 0,7...17 ГГц с двухслойными структурами, поверхностный слой которых изготовлен с использованием порошкообразного диоксида титана, а внутренний слой – с использованием порошкообразного материала на основе оксида трехвалентного железа. Толщина слоев исследованных структур изменялась в пределах от 0,3 до 1 см. Для достижения поставленной цели были решены задачи, связанные с разработкой методики изготовления многослойных структур на основе композиционных материалов, содержащих оксиды переходных металлов, а также с измерением значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17 ГГц образцов таких структур. Указанные измерения проводились с использованием панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0.01–17. На основе полученных результатов измерений показано, что в диапазоне частот 0,7...2 ГГц наименьшими значениями коэффициента отражения электромагнитного излучения, достигающими –20 дБ, характеризуются структуры, толщина поверхностного слоя которых составляет 1 см, а в диапазоне 2...17 ГГц – структуры, толщина поверхностного слоя которых составляет 0,5 или 1 см (в зависимости от толщины внутреннего слоя). Значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7...17 ГГц таких структур достигают величины –23 дБ. С учетом полученных результатов исследования предложено использовать рассмотренные структуры в процессе создания экранированных помещений или усовершенствования последних (например, в случаях, когда необходимо снизить уровень пассивных помех в помещениях, экранированных с помощью металлических материалов).

Ключевые слова: диоксид титана, многослойная структура, оксид железа, электромагнитное излучение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Бойправ О.В., Богуш Н.В., Лыньков Л.М. Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения двухслойных структур на основе оксидов переходных металлов. Доклады БГУИР. 2019; 7–8(126): 93-100.

ELECTROMAGNETIC RADIATION REFLECTION AND TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF TWO-LAYER STRUCTURES BASED ON TRANSITION METAL OXIDES

OLGA V. BOIPRAV, NATALLIA V. BOGUSH, LEONID M. LYNKOU

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

Submitted 25 September 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The aim of the work, the results of which are presented in the framework of the article, was to study the of electromagnetic radiation interaction laws in the frequency range 0.7...17 GHz with two-layer structures, the surface layer of which was made using powdered titanium dioxide, and the inner layer was made using a powder material based on oxide ferric iron. The thickness of the layers of the studied structures varied from 0.3 to 1 cm. To achieve this goal, the objectives associated with the development of a methodology for the manufacture of multilayer structures based on composite materials containing transition metal oxides, as well as with the measurement of such structures samples electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients in the frequency range 0.7...17 GHz. These measurements were carried out using a panoramic meter of reflection and transmission coefficients SNA 0.01–17. Based on the obtained measurement results, it was shown that in the frequency range 0.7...2 GHz, the lowest values of electromagnetic radiation reflection coefficient, reaching –20 dB, are characterized by structures whose surface layer thickness is 1 cm, and in the range 2 ... 17 GHz – structures, thickness the surface layer of which is 0.5 or 1 cm (depending on the thickness of the inner layer). The values of electromagnetic radiation transmission coefficient in the frequency range of 0.7...17 GHz of such structures reach –23 dB. Based on the results of the study, it is proposed to use the considered structures in the process of creating shielded rooms or improving the latter (for example, in cases, when it's necessary to reduce the level of passive interference in rooms shielded with metal materials).

Keywords: titanium dioxide, multi-layer structure, iron oxide, electromagnetic radiation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Boiprav O.V., Bogush N.V., Lynkou L.M. Electromagnetic radiation reflection and transmission characteristics of two-layer structures based on transition metal oxides. Doklady BGUIR. 2019; 7–8(126): 93-100.

Введение

В работе [1] представлены результаты исследования закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения (ЭМИ) с композиционными материалами на основе порошкообразного диоксида титана в зависимости от их толщины. Показано, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц таких материалов – не ниже –14 дБ, а коэффициента передачи – не ниже –20 дБ. В рамках настоящей работы получили развитие исследования, представленные в [1], в частности, реализовано следующее:

– изготовлены двухслойные структуры, поверхностный слой которых представляет собой композиционный материал на основе порошкообразного диоксида титана, а внутренний – композиционный материал на основе порошка, основным элементом которого является оксид трехвалентного железа; толщина каждого из слоев изготовленных структур – 0,3...1 см;

– выполнен анализ характеристик отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц изготовленных структур.

Методика проведения эксперимента

Авторами предложены две методики изготовления многослойных структур на основе композиционных материалов.

Первая из предложенных методик применима для получения многослойных структур, у которых толщина слоев > 5 мм. Она заключается в выполнении следующего.

1. Приготовление раствора связующего вещества (или растворов связующих веществ) для формирования слоев изготавливаемой структуры.

2. Разделение приготовленного (-ых) раствора (-ов) на части, количество которых эквивалентно количеству слоев изготавливаемой структуры.

3. Равномерное распределение порошкообразных наполнителей на основе оксидов переходных металлов по объему растворов путем смешивания первых со вторым при помощи промышленного миксера. Объем каждой из полученных смесей должен превышать на 3...5 % требуемый объем каждого из формируемых на их основе слоев (каждый из слоев представляет собой прямоугольный параллелепипед).

4. Заполнение полученными смесями форм, характеризующихся прямоугольным сечением. Количество форм должно быть эквивалентно количеству слоев изготавливаемой структуры.

5. Высушивание смесей в формах.

6. Извлечение из форм, полученных в результате высушивания композиционных материалов.

7. Соединение извлеченных из форм композиционных материалов при помощи распыляемого или гипсового клея.

Вторая из предложенных методик применима для получения структур, толщина всех или некоторых слоев которых ≤ 5 мм. Она заключается в выполнении следующего.

1. Приготовление раствора связующего вещества для формирования последнего (относительно фронта распространения электромагнитной волны) слоя изготавливаемой структуры.

2. Равномерное распределение порошкообразного наполнителя по объему приготовленного раствора связующего вещества путем смешивания первого со вторым при помощи промышленного миксера. Объем полученной смеси должен превышать на 3...5 % требуемый объем формируемого на ее основе слоя структуры (каждый из слоев представляет собой прямоугольный параллелепипед).

3. Заполнение полученной смесью формы, характеризующейся прямоугольным сечением.

4. Высушивание смеси в форме.

5. Выполнение этапов 1 и 2 с использованием материалов для формирования предпоследнего (относительно фронта распространения электромагнитной волны) слоя изготавливаемой структуры.

6. Распределение при помощи шпателя полученной смеси по поверхности расположенного в форме композиционного материала, полученного в результате выполнения этапа 4.

7. Высушивание распределенной смеси.

8. Повтор этапов 5–7 до того момента, пока не будет нанесен и высушен поверхностный слой изготавливаемой структуры.

Двухслойные структуры, явившиеся объектами исследований в рамках настоящей работы, изготовлены в соответствии с предложенными методиками. В таблице представлены характеристики этих структур.

Таблица. Характеристики изготовленных двухслойных структур
Table. Characteristics of developed two-layer structures

Толщина поверхностного слоя структуры, см Structure surface layer thickness, cm	Толщина внутреннего слоя структуры, см Structure inner layer thickness, cm	Наименование изготовленной структуры Name of the manufactured structure
0,3	0,5	Структура 1
0,5		Структура 2
0,7		Структура 3
1		Структура 4
0,3	1	Структура 5
0,5		Структура 6
0,7		Структура 7
1		Структура 8

Для измерения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ использован панорамный измеритель коэффициентов отражения и передачи SNA 0,01–18. Измерения выполнялись в соответствии с ГОСТ 20271.1-91 Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1, 2 представлены частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ изготовленных структур.

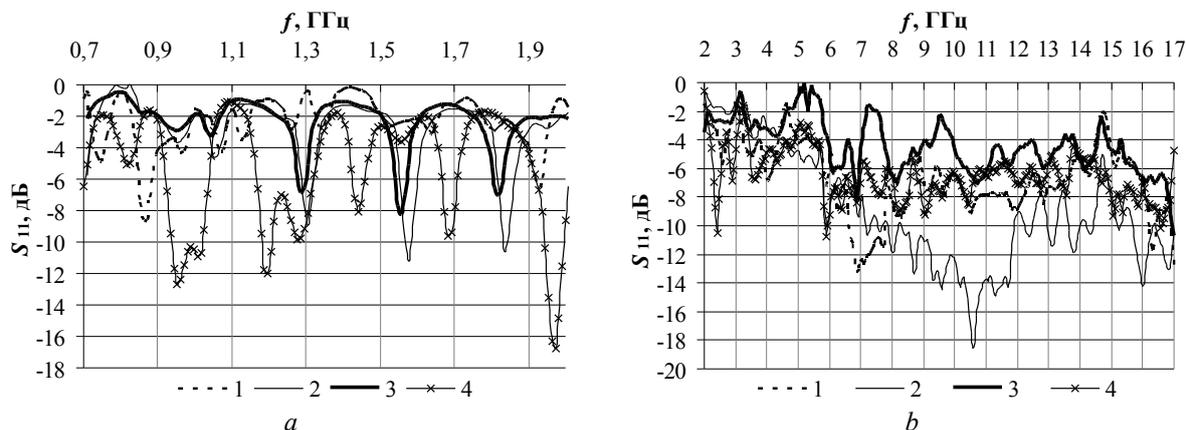


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (a) и 2...17 ГГц (b) структур 1, 2, 3 и 4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 1. Frequency dependences of the EMR reflection coefficient in the range 0.7...2 GHz (a) and 2...17 GHz (b) of structures 1, 2, 3 and 4 (lines 1, 2, 3 and 4 respectively)

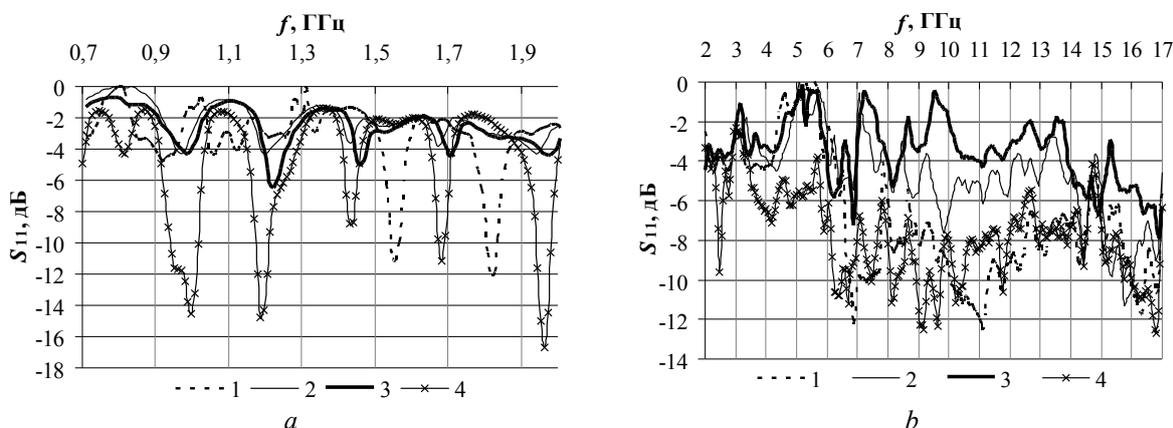


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (a) и 2...17 ГГц (b) структур 5, 6, 7 и 8 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 2. Frequency dependences of the EMR reflection coefficient in the range 0.7...2 GHz (a) and 2...17 GHz (b) of structures 5, 6, 7 and 8 (lines 1, 2, 3 and 4 respectively)

В диапазоне частот 0,7...2 ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ структуры 1 изменяются в пределах от $-0,5$ до -8 дБ, структур 2, 3 и 4 – соответственно в пределах от -2 до -11 дБ, от $-0,5$ до -8 дБ и от -2 до -17 дБ. Математические модели множества точек минимума характеристик отражения ЭМИ этих структур могут быть соответственно представлены следующим образом:

$$(0,75+0,1 \cdot n) \text{ ГГц}, n \in [0; 11], n \in Z; \quad (1)$$

$$(1,05+0,25 \cdot n) \text{ ГГц}, n \in [0; 3], n \in Z; \quad (2)$$

$$(0,85+0,1 \cdot n) \text{ ГГц}, n \in [0; 3], (1,3+0,25 \cdot k) \text{ ГГц}, k \in [0; 2], n, k \in Z; \quad (3)$$

$$(0,8+0,2 \cdot n) \text{ ГГц}, n \in [0; 2], (1,45+0,25 \cdot k) \text{ ГГц}, k \in [0; 2], n, k \in Z. \quad (4)$$

Наличие точек минимума на характеристиках отражения ЭМИ структур обусловлено противофазным взаимодействием электромагнитных волн, отражаемых их слоями [2].

В диапазоне частот 2...17 ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ структуры 1 – от –2 до –12 дБ, а структур 2, 3 и 4 – соответственно от –2 до –18 дБ, от –1 до –8 дБ и от –2 до –10 дБ. Резонансное снижение величины анализируемого параметра с –6 до –12 дБ зарегистрировано в диапазоне частот 6...8 ГГц у структуры 1 и с –10 до –18 дБ в диапазоне частот 9...12 ГГц у структуры 2. У структур 3 и 4 резонансные снижения значений коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2...17 ГГц не наблюдались, что может быть обусловлено тем, что поверхностные слои этих структур ввиду их большей материалоемкости по сравнению со структурами 1 и 2 в большей степени снижают энергию взаимодействующего с ними ЭМИ.

На основе результатов сравнительного анализа характеристик, представленных на рис. 1 и 2, можно сделать вывод о том, что увеличение с 0,5 до 1 см толщины внутреннего слоя структуры 1 обуславливает снижение на 1...10 дБ значений ее коэффициента отражения ЭМИ на частотах, представленных в выражении (1), и на 2...5 дБ на частотах диапазона 2...17 ГГц. Увеличение с 0,5 до 1 см толщины внутренних слоев структур 2, 3 и 4 не оказывает существенного влияния на значения ее коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...2 ГГц. Величина рассматриваемого параметра в диапазоне частот 2...17 ГГц при этом возрастает на 2...10 дБ у структуры 2, остается практически неизменной у структуры 3 и снижается на 1...4 дБ у структуры 4.

Для оценки целесообразности применения изготовленных структур в целях снижения энергии ЭМИ, отражаемого металлическими объектами, выполнены размещения этих структур на металлических подложках и измерения значений их коэффициентов отражения ЭМИ. На основе результатов таких измерений получены частотные зависимости, представленные на рис. 3, 4. Из этих зависимостей следует, что снижение энергии ЭМИ, отражаемого металлическими объектами, в диапазоне частот 0,7...2 ГГц в наибольшей степени (в 2...100 раз) обеспечивается изготовленной двухслойной структурой, толщина поверхностного слоя которой составляет 0,7 см, а внутреннего – 0,5 см, а в диапазоне частот 2...17 ГГц – структурой, толщина поверхностного и внутреннего слоев которой составляет 0,5 см.

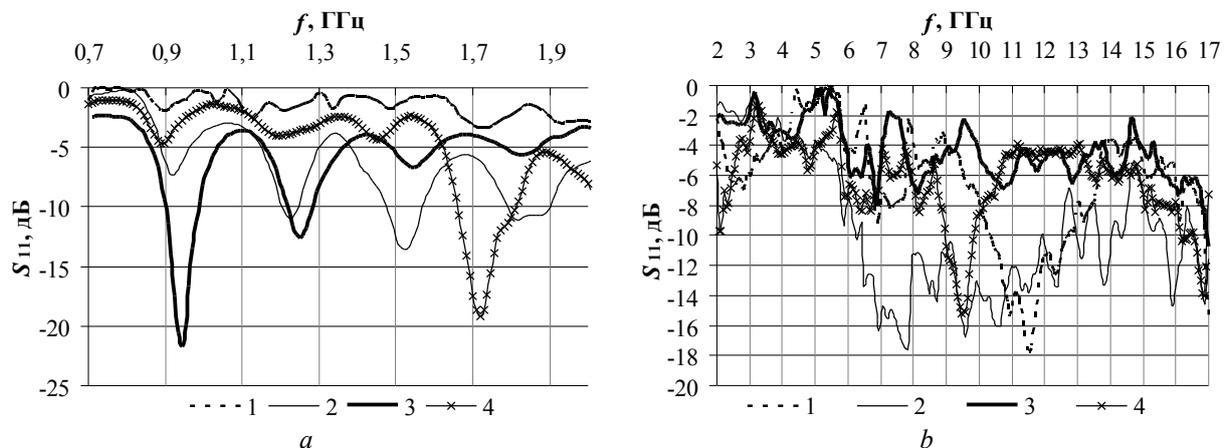


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) размещенных на металлических подложках структур 1, 2, 3 и 4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 3. Frequency dependences of the EMR reflection coefficient in the range of 0.7...2 GHz (a) and 2...17 GHz (b) of structures 1, 2, 3 and 4 placed on metal substrates (lines 1, 2, 3 and 4 respectively)

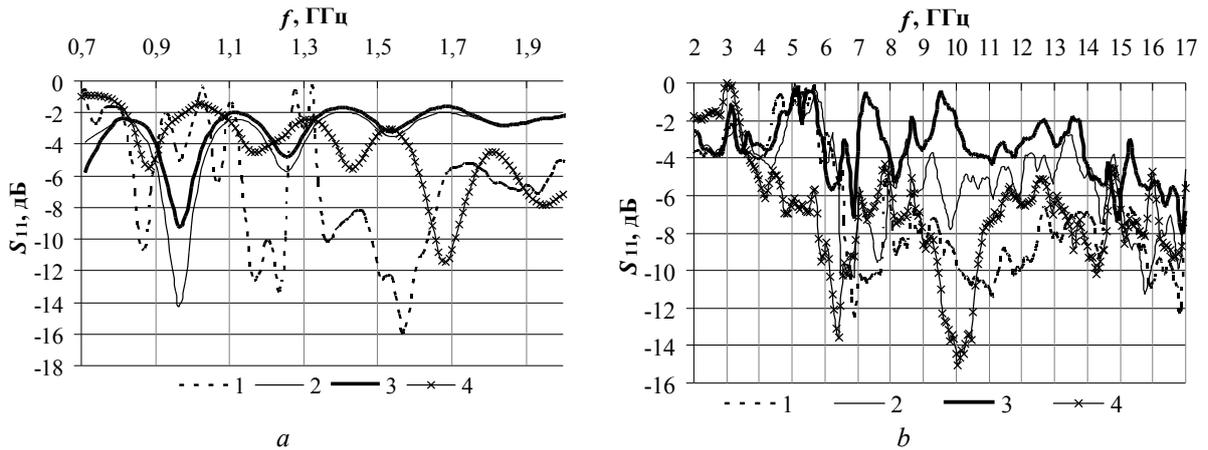


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) размещенных на металлических подложках структур 5, 6, 7 и 8 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 4. Frequency dependences of the EMR reflection coefficient in the range of 0.7...2 GHz (a) and 2...17 GHz (b) of structures 5, 6, 7 and 8 placed on metal substrates (lines 1, 2, 3 and 4 respectively)

На рис. 5, 6 представлены частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ изготовленных структур.

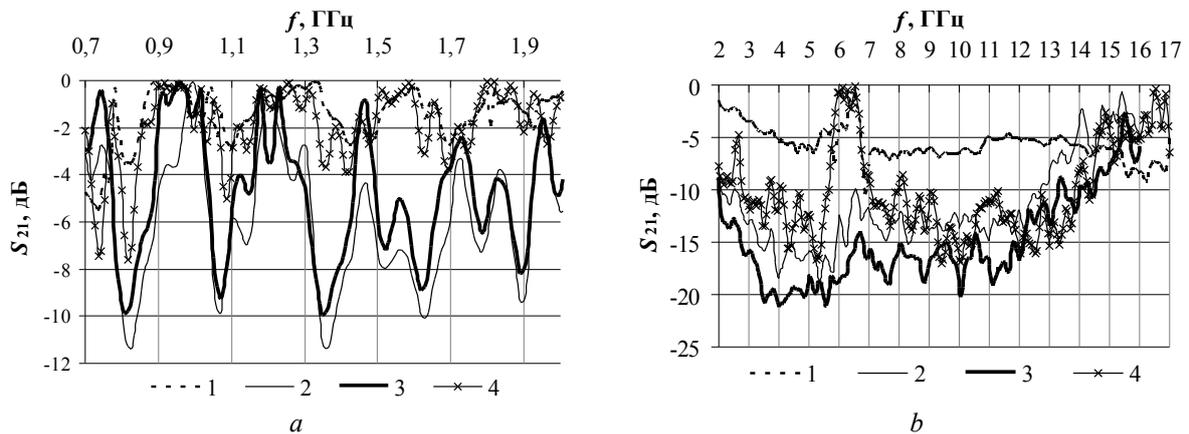


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) структур 1, 2, 3 и 4 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 5. Frequency dependences of the EMR transmission coefficient in the range 0.7...2 GHz (a) and 2...17 GHz (b) of structures 1, 2, 3 and 4 (lines 1, 2, 3 and 4 respectively)

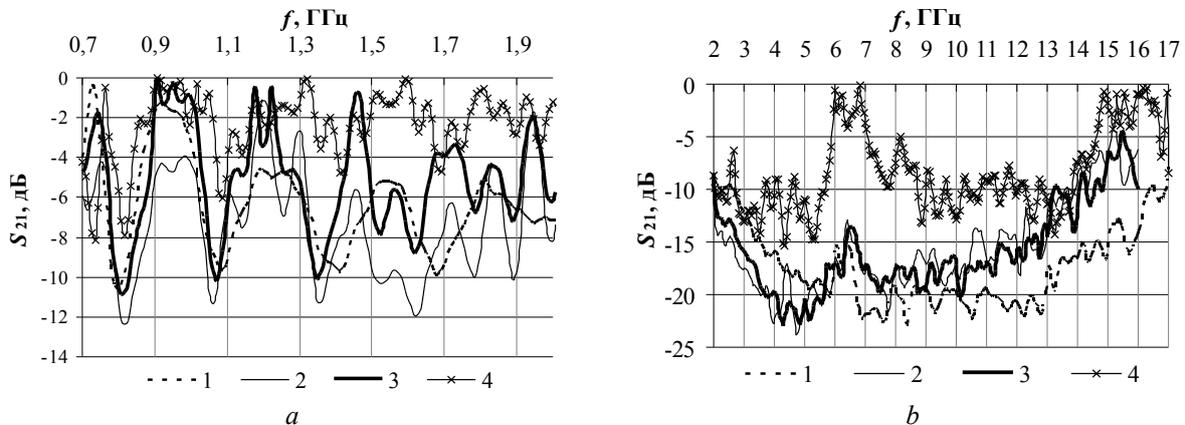


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц (а) и 2...17 ГГц (б) структур 5, 6, 7 и 8 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 6. Frequency dependences of the EMR transmission coefficient in the range 0.7...2 GHz (a) and 2...17 GHz (b) of structures 5, 6, 7 and 8 (lines 1, 2, 3 and 4 respectively)

Из рис. 5 следует, что наименьшими значениями коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц, изменяющимися в пределах от –1 до –23 дБ, характеризуются структуры 2 и 3. В диапазоне частот 0,7...2 ГГц величина рассматриваемого параметра структур 1 и 4 изменяется в пределах от –1 до –8 дБ, а в диапазоне частот 2...17 ГГц – соответственно в пределах от –2 до –7 дБ и от –1 до –16 дБ. На основе результатов сравнения частотных зависимостей, представленных на рис. 5 и 6, установлено, что увеличение с 0,5 до 1 см толщины внутреннего слоя структур 2, 3 и 4 не оказывает существенного влияния на значения их коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц. Величина рассматриваемого параметра структуры 1 при этом снижается на 1...15 дБ. Это позволяет сделать вывод о том, что поверхностные слои структур 1 и 5 являются согласующими (т. е. уменьшающими разность между волновыми сопротивлениями воздуха и их внутренних слоев и оказывающими влияние на значения их коэффициента отражения ЭМИ), а структур 2, 3, 4, 6, 7 и 8 – поглощающими (т. е. оказывающими влияние на значения их как коэффициента отражения, так и коэффициента передачи ЭМИ).

Выводы

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что двуслойная структура толщиной 1,3 или 1,5 см, изготовленная из композиционных материалов, наполнителями которых являются диоксид титана и порошок на основе оксида трехвалентного железа, характеризуется на 2...10 дБ более низкими значениями коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...17 ГГц (в том числе и значениями, полученными при измерениях с применением металлических подложек), чем однослойный композиционный материал толщиной 1,5 см на основе диоксида титана, рассмотренный в работе [1], при сопоставимых значениях коэффициента передачи ЭМИ. В связи с этим исследованные в рамках настоящей работы структуры представляются перспективными для использования в целях усовершенствования эксплуатационных свойств экранированных помещений. Оптимальная толщина поверхностного слоя таких структур для применения в указанных целях – 0,5 см.

Список литературы

1. Бойправ О.В., Неверов Н.А., Богуш Н.В., Лыньков Л.М. Экранирующие характеристики композиционных материалов на основе порошкообразного диоксида титана и гипса. *Доклады БГУИР*. 2018;118:71-75.
2. Муромцев Д.Ю., Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А., Белоусов О.А., Рябов А.В., Головченко Е.В. *Электродинамика и распространение радиоволн*. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; 2012.

References

1. Boiprav O.V., Neverov N.A., Bogush N.V., Lynkou L.M. [Shielding Characteristics of Composite Materials Based on Titanium Dioxide]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2018;118:71-75. (In Russ.)
2. Muromcev D.Ju., Zytjanov Ju.T., Fedjunin P.A., Belousov O.A., Rjabov A.V., Golovchenko E.V. [*Electrodynamics and Radiowave Propagation*]. Tambov: FGBOU VPO «TGTU»; 2012. (In Russ.)

Вклад авторов

Бойправ О.В. разработала методику изготовления двухслойных структур на основе оксидов переходных металлов, а также выполнила сравнительный анализ частотных зависимостей коэффициентов отражения и передачи ЭМИ этих структур.

Богуш Н.В. выполнила изготовление образцов двухслойных структур в соответствии с разработанной методикой, а также измерение значений их коэффициентов отражения и передачи ЭМИ.

Лыньков Л.М. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принимал участие в интерпретации их результатов.

Authors contribution

Boiprav O.V. has developed a method for manufacturing of two-layer structures based on metal oxides, performed a comparative analysis of the frequency dependences of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients of these structures.

Bogush N.V. has performed the production of the samples of two-layer structures in accordance with the developed method, measurement of values of their EMR reflection and transmission coefficients.

Lynkou L.M. has identified the tasks that needed to be solved during the research, and also participated in the interpretation of the research results.

Сведения об авторах

Бойправ О.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Богущ Н.В., научный сотрудник НИЛ 5.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лыньков Л.М., д.т.н., профессор, Почетный профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-22-09;
e-mail: boiprav@tut.by
Бойправ Ольга Владимировна

Information about the authors

Boiprav O.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Information Security Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bogush N.V., Researcher of SRL 5.3 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lynkou L.M., D.Sci., professor, Honorary professor of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-22-09;
e-mail: boiprav@tut.by
Boiprav Olga Vladimirovna