

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 535.34:621.315.5

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-1-22-28>

Поступило в редакцию 20.11.2018

Received 20.11.2018

**И. Д. Парфимович¹, член-корреспондент Ф. Ф. Комаров¹,
О. В. Мильчанин¹, А. Г. Ткачев², А. В. Щегольков²**

¹*Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь*

²*Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация*

МИКРОВОЛНОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОГО ПОЛИМЕРА С ДОБАВЛЕНИЕМ ГРАФЕНОВЫХ И ФЕРРИТНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Проведены исследования взаимодействия электромагнитного излучения микроволнового диапазона с полимерными радиопоглощающими композитными материалами, содержащими наноразмерные ферритные и графеновые добавки. Установлено, что преимущественно слоистые графеновые структуры оказывают существенное влияние на способность композитных материалов к экранированию электромагнитного излучения данного спектрального диапазона.

Ключевые слова: многостенные углеродные нанотрубки, графеновые нанопластины, электромагнитное излучение, композитный материал, экранирование

Для цитирования. Микроволновые характеристики композитного материала на основе эпоксидного полимера с добавлением графеновых и ферритных наноматериалов / И. Д. Парфимович [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 1. – С. 22–28. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-1-22-28>

**Ivan D. Parfimovich¹, Corresponding Member Fadei F. Komarov¹, Oleg V. Milchanin¹,
Alexey G. Tkachev², Alexander V. Shchegolkov²**

¹*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

²*Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation*

MICROWAVE CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON EPOXY POLYMER WITH GRAPHENE AND FERRITE NANOMATERIALS

Abstract. The radio absorption properties of polymer composite materials with ferrite and graphene additives in the microwave frequency range (26–38 GHz) were studied. It was shown that graphene-like structures have a significant effect on the ability of composite materials to shield from electromagnetic radiation.

Keywords: multiwalled carbon nanotubes, graphene nanoplatelets, electromagnetic radiation, composite material, shielding

For citation: Parfimovich I. D., Komarov F. F., Milchanin O. V., Tkachev A. G., Shchegolkov A. V. Microwave characteristics of composite material based on epoxy polymer with graphene and ferrite nanomaterials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 1, pp. 22–28 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-1-22-28>

Введение. В настоящее время развитие электронной техники связано с повышением рабочей частоты электронных приборов, что способствует миниатюризации аппаратуры, снижению энергозатрат, повышению быстродействия, а также увеличению надежности продукции в целом. Но широкое применение высокочастотной аппаратуры приводит и к электромагнитному загрязнению окружающего пространства, что может оказывать негативное воздействие как на работу электронных устройств, так и на здоровье человека [1]. В связи с этим проблема экранирования электромагнитного излучения (ЭМИ) является весьма актуальной.

Известно, что в качестве эффективных экранов от ЭМИ могут выступать любые металлические покрытия, но использование легких композитных материалов на основе полимеров, обладающих высокой проводимостью за счет добавок углеродных наноматериалов, может быть более привлекательным для многих возможных применений их в качестве защитных экранов, в частности в системе космической электроники. В настоящее время быстро растущее производство

дешевых углеродных наноматериалов (например, многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) и графеновых нанопластинок (ГНП) [2]) сильно стимулирует интерес к созданию новых композитов, обладающих уникальными характеристиками, которые присущи самим углеродным наноматериалам: высокая прочность, уникальные механические свойства, высокая проводимость, стойкость к агрессивным средам и т. д.

Авторами работы ранее получен положительный опыт по созданию эффективно-поглощающих микроволновое излучение композитов на основе эпоксидных полимеров, где в качестве проводящих добавок выступали многостенные углеродные нанотрубки различных модификаций [3]. В настоящей работе в качестве добавки в полимер использовались графеновые нанопластины и наноразмерные ферритовые частицы. С одной стороны, ожидалось, что графеновые слоистые структуры должны обеспечить проводимость композита, а с другой – предполагалось, что использование в качестве добавок материалов, характеризующихся сильными магнитными потерями (например, составных ферритов [4]), позволит добиться еще большей эффективности экранирования за счет взаимодействия ферритных магнитных моментов с магнитной составляющей ЭМИ.

Материалы и методы исследования. Образцы композитных материалов были изготовлены путем ультразвукового диспергирования в эпоксидной смоле добавок углеродного наноматериала и частиц никель-кобальт-цинкового феррита с последующей стандартной процедурой полимеризации полимера. Компоненты диспергировались при помощи ультразвукового гомогенизатора UP400St в течение 30 мин при температуре, не превышающей 60 °С. Мощность ультразвука в течение всего процесса диспергирования постепенно повышалась до 80 Вт. В качестве углеродного наноматериала использовались графеновые нанопластины двух типов: малослойные и многослойные [2]. Для сравнения результатов исследований также были изготовлены образцы композитов, в которых в качестве активных включений выступали углеродные нанотрубки марки «Таунит-М», близкой к графеновым добавкам концентрации и при аналогичных условиях приготовления композитов. Образцы, подобные последним, были нами ранее исследованы и проявляли сильную поглощающую способность в Ка-диапазоне СВЧ-излучения [3].

Для определения оптических характеристик композитных материалов в Ка-диапазоне (эффектов пропускания, отражения и поглощения микроволнового электромагнитного излучения) использовался скалярный анализатор цепей R2-408R, построенный на основе генератора качающейся частоты, волноводного измерительного тракта, блока анализатора и системы обработки сигналов. В качестве выходных данных выступали S -параметры пропускания (S_{21}) и отражения (S_{11}). Подробное описание установки представлено в [5]. Следует отметить, что конструкция волноводного измерительного тракта позволяла исследовать экспериментальные образцы с толщинами не более 1,5 мм, что составляло всего лишь 0,13–0,19 частей длин волн в Ка-диапазоне на частотах 26–38 ГГц соответственно.

Электрофизические характеристики композитных материалов регистрировались на установке для частотной диэлектрической спектроскопии, использующей метод характеристики на переменном токе [6] на основе измерителей импеданса HIOKI 3532 LCR HiTESTER с границами измерительных частот в диапазоне 50 Гц – 1 МГц. Исследования проводились при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены типичные для изучаемых композитных материалов зависимости коэффициентов отражения, пропускания и поглощения в Ка-диапазоне СВЧ-излучения, которые рассчитывались по измеряемым S -параметрам в соответствии с формулами

$$K_{\text{прох}} = (S_{21})^2,$$

$$K_{\text{отр}} = (S_{11})^2,$$

$$K_{\text{погл}} = 1 - (S_{21})^2 - (S_{11})^2.$$

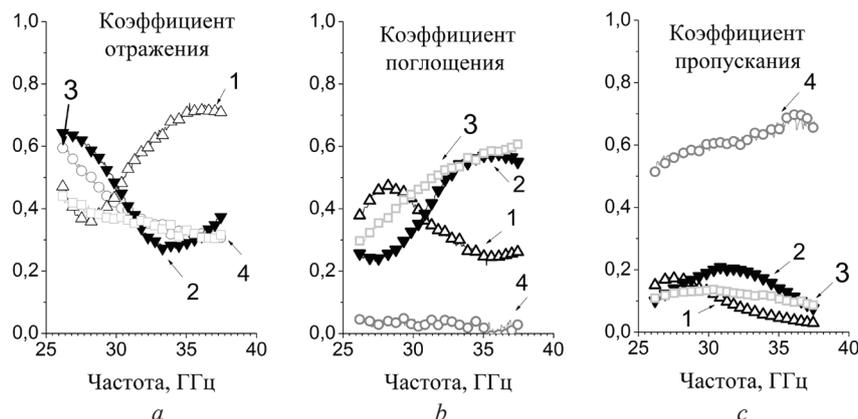


Рис. 1. Коэффициенты отражения (а), поглощения (б) и пропускания (с) электромагнитного излучения композитными материалами с добавками наноматериала: 1 – 35,7 вес. % феррит + 7,1 вес. % графен многослойный; 2 – 35,7 вес. % феррит + 7,1 вес. % графен малослойный; 3 – 8 вес. % УНТ «Таунит-М» [2]; 4 – эпоксидный полимер

Fig. 1. Reflection (a), absorption (b) and transmission (c) coefficients of electromagnetic radiation across/by the composite materials with the nanomaterial additives: 1 – 35.7 wt. % ferrite + 7.1 wt. % multi nanoplatelets graphene; 2 – 35.7 wt. % ferrite + 7.1 wt. % mono nanoplatelets graphene; 3 – 8 wt. % “Taunit-M” MWCNTs [2]; 4 – epoxy polymer

Исходный эпоксидный полимер (рис. 1, кривые 4) практически не поглощает излучения в Ка-диапазоне – значения коэффициента поглощения находятся в пределах погрешности измерений, составляющей несколько процентов величины. При этом, коэффициент отражения от границы «композит–воздух» монотонно убывает от 45 до 30 % с увеличением частоты излучения в данном СВЧ-диапазоне, что в свою очередь обуславливает и симметричный монотонный рост коэффициента пропускания от 55 до 70 % в этой области излучения.

Анализ результатов измерений параметров от композитов, содержащих ГНП и сравнимые количества ферритных наночастиц, показывает, что количество графеновых слоев оказывает существенное влияние на частотную зависимость коэффициентов отражения, поглощения и пропускания. В графен-ферритном композите с многослойными ГНП (образец № 1 – рис. 1, кривые 1) наблюдается снижение коэффициента отражения от 50 до 37 % на частотах 26–28 ГГц и дальнейший рост до 74 % на частотах 28–38 ГГц. Значение коэффициента пропускания монотонно меняется в исследуемом диапазоне частот от 17 до 3 %. Вследствие этих факторов, расчетное значение коэффициента поглощения на частотах 26–28 ГГц возрастает от 33 до 50 % и убывает от 50 до 26 % на частотах 28–38 ГГц. В графен-ферритном композите с малослойными ГНП (образец № 2 – рис. 1, кривые 2) наблюдается обратная к образцу № 1 зависимость коэффициентов отражения и поглощения от частоты. Коэффициент отражения монотонно убывает от 65 до 25 % в диапазоне частот 26–33 ГГц и возрастает до 40 % на частотах 33–38 ГГц. Для коэффициента поглощения наблюдается монотонное возрастание значений от 25 до 60 % на частотах 26–34 ГГц и убывание до 55 % на частоте 38 ГГц. Коэффициент пропускания монотонно возрастает от 10 до 20 % на частотах 26–32 ГГц и далее убывает до 5 % на частоте 38 ГГц.

На рис. 1 (кривая 3) представлены и результаты исследований по определению характеристик отражения, поглощения и пропускания от композитных материалов на основе эпоксидного полимера, содержащего в качестве добавок многостенные углеродные нанотрубки сравнимой с ГНП концентрации. У образца композитного материала с близкой концентрацией углеродной добавки – 8 вес. % МУНТ «Таунит-М» также отмечалось убывание функции (коэффициента) отражения от 60 % (26 ГГц) до 30 % (38 ГГц), рост функции поглощения от 30 % (26 ГГц) до 60 % (38 ГГц) и слабая зависимость от частоты функции пропускания (порядка 10 % по всему диапазону частот). Стоит отметить, что у образцов композитных материалов с 8 вес. % МУНТ «Таунит-М» и 8 вес. % малослойных ГНП, обладающих близкими характеристиками коэффициентов отражения, поглощения и пропускания, наблюдается схожесть структурных характеристик наполнителей. Во-первых, продольные размеры обоих типов добавки колеблются в диапазоне от 2 до 10 мкм. Во-вторых, толщина малослойных ГНП составляет 2–3 нм, а при

внешнем диаметре УНТ «Таунит-М», равном 8–15 нм, и внутреннем диаметре, равном 4–8 нм, толщина графеновых слоев в нанотрубке также составляет ~2–3 нм.

В случае композитного материала с 8 вес. % многослойных ГНП, обладающего обратной частотной зависимостью коэффициентов отражения и поглощения, толщина и соответственно количество графеновых слоев увеличивается в два-три раза – ~6–8 нм. Учитывая, что для образцов композитных материалов с тремя разными типами углеродных добавок наблюдаются как близкие числовые значения, так и подобный характер частотной зависимости коэффициента пропускания, количество и толщина графеновых слоев являются одним из ключевых факторов, определяющих поведение коэффициента отражения.

С целью исследования влияния ферритной составляющей графен-ферритного композитного материала на характер взаимодействия с ЭМИ, была изготовлена партия образцов с 35, 50 и 60 вес. % ферритной добавки. В ходе исследования было установлено, во всех ферритных композитных материалах наблюдается схожая с исходным полимером частотная зависимость коэффициентов отражения, пропускания и поглощения (рис. 2). При этом с увеличением концентрации ферритной добавки наблюдается пропорциональное возрастание коэффициента отражения и убывание коэффициента пропускания. Изменения коэффициента поглощения в зависимости от концентрации добавки обнаружено не было. Таким образом, существенное влияние на характер взаимодействия графен-ферритных композитных материалов с ЭМИ оказывают углеродные наноматериалы графеноподобных структур.

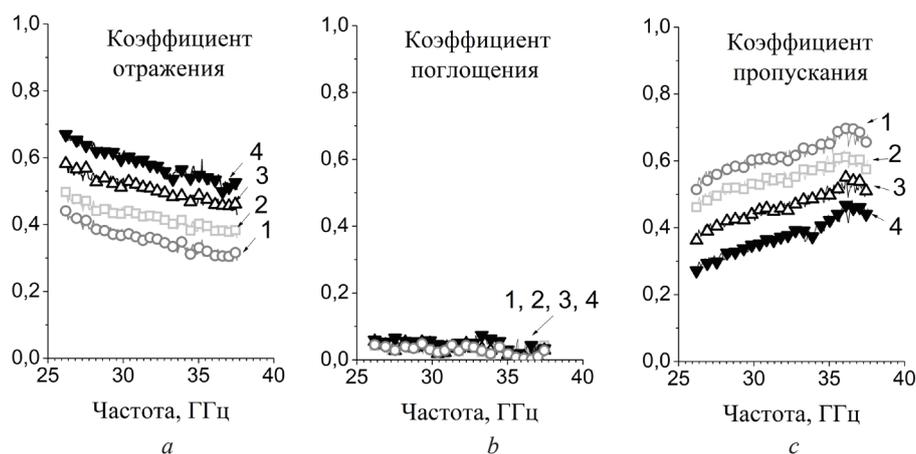


Рис. 2. Коэффициенты отражения (а), поглощения (b) и пропускания (с) электромагнитного излучения композитными материалами с добавлением никель-кобальт-цинкового феррита: 1 – эпоксидный полимер; 2 – 35,7 вес. % феррит; 3 – 50 вес. % феррит; 4 – 60 вес. % феррит

Fig. 2. Reflection (a), absorption (b) and transmission (c) coefficients of electromagnetic radiation across/by the composite materials with the ferrite additives: 1 – epoxy polymer; 2 – 35.7 wt. % ferrite; 3 – 50 wt. % ferrite; 4 – 60 wt. % ferrite

Мы предполагаем, что в графен-ферритном композитном материале, как и в случае нашей предыдущей работы с наполнителем из МУНТ [4], формируется трехмерная проводящая сетка за счет перекрытий сгустков и кластеров графеновых нанопластинок. На рис. 3, а представлены результаты ПЭМ исследований композитного материала, содержащего 4 вес. % материала «Таунит-М» [2]. На тонких участках образцов регистрируются сгустки МУНТ размерами до нескольких мкм (рис. 3, а, стрелки 2). Между этими сгустками обнаружены отдельные связующие нанотрубки (рис. 3, а, стрелки 1), которые плотно сплетены в узлы. На рис. 3, b представлена ПЭМ-микротография структуры композитного материала с добавками тонкослойных ГНП и феррита (%). После утонения образца и регистрации в нем малослойных ГНП хорошо видно, что нанопластины имеют геометрически плавильную вытянутую форму и их размеры превышают несколько микрон. На рис. 3, c представлено ПЭМ изображение от образца с кластерами ферритовых наночастиц, которые имеют размеры от сотен нанометров до нескольких микрон. Следует отметить, что при формировании композитного материала происходит «сби-

вание» металлических наночастиц в массивные группы, что приводит к нарушению однородности заполнения композитного материала. При этом в композитах с углеродными нанотрубками, благодаря нитевидной форме наполнителя, возможно формирование проводящих каналов между отдельными кластерами. В случае же композитного материала с ферритными наночастицами, обладающими более компактной формой, образование проводящих каналов не происходит.

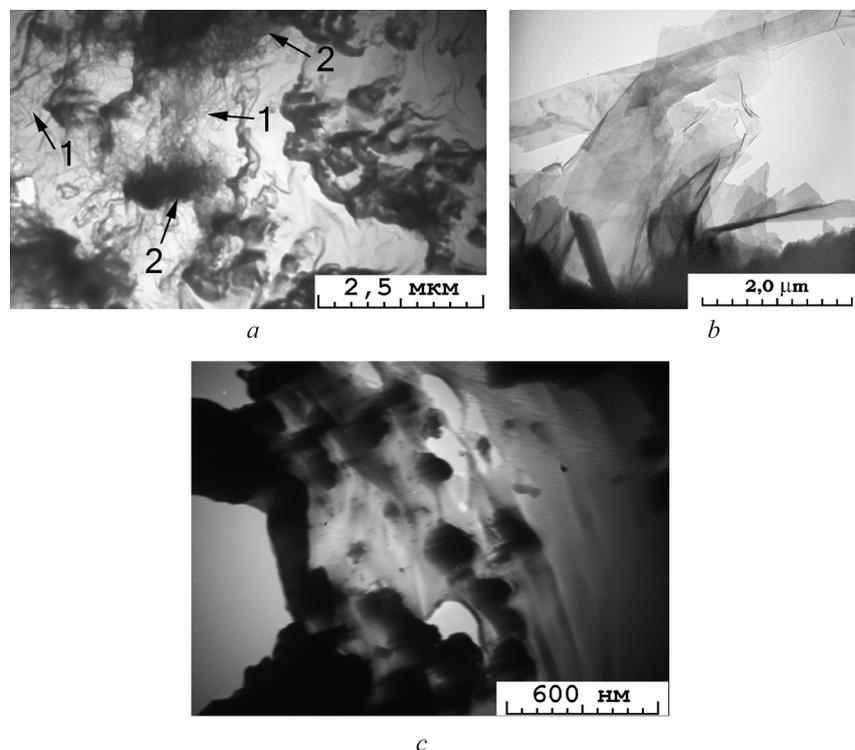


Рис. 3. Светлопольные ПЭМ-микрофотографии структуры композита на основе эпоксидного полимера с добавками МУНТ – Таунит-М (4 вес. %) (а); с добавкой 35,7 вес. % феррита и 7,1 вес. % графена малослойного (b); с добавкой 50 вес. % феррита (с)

Fig. 3. Bright-field TEM microphotographs of the nanocomposites based on epoxy polymer with the addition of 4 wt. % “Tounit-M” MWCNTs (a); with the addition of 35.7 wt. % ferrite and 7.1 wt. % mono nanoplatelets graphene (b); with the addition of 50 wt. % ferrite (c)

Формирование проводящей сетки в структуре композита приводит к появлению неоднородных локальных областей с различными проводящими характеристиками материала, на границах раздела между которыми происходит многократное преломление и отражение падающего излучения, т. е. подобная решетчатая структура композита может существенно препятствовать пропуску через него микроволнового электромагнитного излучения.

Благодаря образованию проводящей сетки становится возможным процесс переноса заряда в объеме композита и придание ему проводящих свойств, сравнимых с проводящими свойствами самих ГНП, которые обладают металлической либо полупроводниковой проводимостью. Поэтому в качестве дополнительного метода исследования формирования проводящей структуры в композите были проведены измерения проводимости композитных материалов. Результаты представлены на рис. 4.

Добавление даже значительного количества ферритного наполнителя к эпоксидному полимеру не приводит к существенному изменению величины электропроводности. Проводимость композитных образцов с 35 и 60 вес. % феррита практически не отличаются (образцы № 1 и № 6). Также для данных образцов наблюдается такая же зависимость проводимости от частоты, как и для исходного полимера – монотонный рост проводимости с увеличением частоты. В образце с 8 вес. % материала «Таунит-М» на частотах до 10 кГц значение проводимости имеет постоянное значение порядка 10^{-7} См/см (образец № 4). В композитных образцах, содержащих ГНП

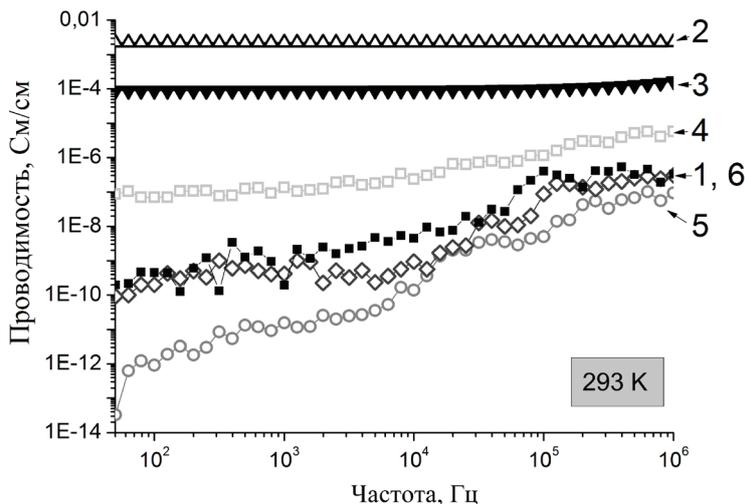


Рис. 4. Частотная зависимость проводимости эпоксидных композитов с различными типами добавок: 1 – 35,7 вес. % феррит; 2 – 35,7 вес. % феррит + 7,1 вес. % графен многослойный; 3 – 35,7 вес. % феррит + 7,1 вес. % графен малослойный; 4 – 8 вес. % УНТ «Таунит-М»; 5 – эпоксидный полимер; 6 – 60 вес. % феррит

Fig. 4. Frequency dependence of the conductivity of epoxy composite with different types of additives: 1 – 35.7 wt. % ferrite; 2 – 35.7 wt. % ferrite + 7.1 wt. % multi nanoplatelets graphene; 3 – 35.7 wt. % ferrite + 7.1 wt. % mono nanoplatelets graphene; 4 – 8 wt. % MWCNTs “Taunit-M”; 5 – epoxy polymer; 6 – 60 wt. % ferrite

и ферритные добавки, значение проводимости и вовсе остается постоянным во всем измеряемом частотном диапазоне (образцы № 2, № 3). Появление на графике частотной зависимости участка с постоянным значением проводимости связано с образованием в структуре композита проводящей структуры.

Заключение. В результате выполненных исследований было установлено, что существенное влияние на характер взаимодействия графен-ферритных композитных материалов с ЭМИ оказывают как углеродные наноматериалы графеноподобных структур, так и их геометрические и структурные параметры. При использовании графеновых нанопластинок с толщиной слоев равной толщине слоев многостенных нанотрубок в композитных материалах на их основе наблюдаются схожие частотные характеристики коэффициентов отражения, поглощения и пропускания.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ–БРФФИ № Т18Р-249.

Acknowledgements. The work is supported by the Russian Foundation for Basic Research and Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grants № Т18Р-249).

Список использованных источников

1. Recent advances in research on radiofrequency fields and health / D. Krewski [et al.] // *J. Toxicology and Environmental Health. Part B.* – 2001. – Vol. 4, N 1. – P. 145–159. <https://doi.org/10.1080/109374001459467>
2. Официальный сайт компании ООО «НаноТехЦентр» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: nanotc.ru. – Дата доступа: 17.10.2018.
3. A composite based on epoxy polymer and carbon nanotubes: structure, optical properties and interaction with microwave radiation / F. F. Komarov [et al.] // *Advanced Materials & Technologies.* – 2017. – N 2. – P. 19–25. <https://doi.org/10.17277/amt.2017.02.pp.019-025>
4. Enhanced microwave absorption in nickel/hexagonal-ferrite/polymer composites / B. W. Li [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89, N 13. – P. 132504 (1–3). <https://doi.org/10.1063/1.2357565>
5. Exploring carbon nanotubes/BaTiO₃/Fe₃O₄ nanocomposites as microwave absorbers / D. Bychanok [et al.] // *Progress In Electromagnetics Research C.* – 2016. – Vol. 66. – P. 77–85. <https://doi.org/10.2528/pier16051106>
6. Koltunowicz, T. N. Test Station for Frequency-Domain Dielectric Spectroscopy of Nanocomposites and Semiconductors / T. N. Koltunowicz // *J. Appl. Spectroscopy.* – 2015. – Vol. 82, N 4. – P. 653–658. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0158-0>

References

1. Krewski D., Byus C. V., Glickman B. W., Lotz W. G., Mandeville R., McBride M. L., Prato F. S., Weaver D. F. Recent advances on radiofrequency fields and health. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part. B*, 2001, vol. 4, no. 1, pp. 145–159. <https://doi.org/10.1080/109374001459467>

2. NanoTechCenter (2018). Available at: nanotc.ru (accessed 17 October 2018).
3. Komarov F. F., Tkachev A. G., Milchanin O. V., Parfimovich I. D., Grinchenko M. V., Parkhomenko I. N., Bychanok D. S. A composite based on epoxy polymer and carbon nanotubes: structure, optical properties and interaction with microwave radiation. *Advanced Materials & Technologies*, 2017, no. 2, pp. 19–25. <https://doi.org/10.17277/amt.2017.02.pp.019-025>
4. Li B. W., Shen Y., Yue Z. X., Nan C.-W. Enhanced microwave absorption in nickel/hexagonal-ferrite/polymer composites. *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 89, no. 13, pp. 132594(1–3). <https://doi.org/10.1063/1.2357565>
5. Bychanok D., Gorokhov G., Meisak D., Plyushch A., Kuzhir P., Sokal A., Lapko K., Sanchez-Sanchez A., Fierro V., Celzard A., Gallagher C., Hibbins A. P., Ogrin F. Y., Brosseau C. Exploring carbon nanotubes/BaTiO₃/Fe₃O₄ nanocomposites as microwave absorbers. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2016, vol. 66, pp. 77–85. <https://doi.org/10.2528/PIERC16051106>
6. Koltunowicz T. N. Test Station for Frequency-Domain Dielectric Spectroscopy of Nanocomposites and Semiconductors. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015, vol. 82, no. 4, pp. 653–658. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0158-0>

Информация об авторах

Парфимович Иван Дмитриевич – мл. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: parfimovich@bsu.by.

Комаров Фадей Фадеевич – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: komarovF@bsu.by.

Мильчанин Олег Владимирович – ст. науч. сотрудник. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко (ул. Курчатова, 7, 220045, Минск, Республика Беларусь). E-mail: milchanin@bsu.by.

Ткачев Алексей Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой. Тамбовский государственный технический университет (ул. Советская, 106, 392000, Тамбов, Российская Федерация). E-mail: postmaster@kma.tstu.ru.

Щегольков Александр Викторович – канд. техн. наук, доцент. Тамбовский государственный технический университет (ул. Советская, 106, 392000, Тамбов, Российская Федерация). E-mail: energynano@yandex.ru.

Information about the authors

Parfimovich Ivan Dmitrievich – Junior researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: parfimovich@bsu.by.

Komarov Fadey Fadeevich – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: komarovF@bsu.by.

Milchanin Oleg Vladimirovich – Senior researcher. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University (7, Kurchatov Str., 220045, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: milchanin@bsu.by.

Tkachev Alexey Grigorievich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department. Tambov State Technical University (106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russian Federation). E-mail: postmaster@kma.tstu.ru.

Shchegolkov Alexander Viktorovich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor. Tambov State Technical University (106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russian Federation). E-mail: energynano@yandex.ru.