



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-5-11>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.317.335.3

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

В. А. БОГУШ, А. В. ГУСИНСКИЙ, В. А. КАРПОВИЧ, Н. А. ПЕВНЕВА,
В. Н. РОДИОНОВА, М. М. КАСПЕРОВИЧ, И. А. КАШКО, Д. В. ГРАПОВ,
Ю. М. КУКУТЬ, В. А. ЛАБУНОВ

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

Поступила в редакцию 14.03.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Выполнены исследования многослойного материала – полимерной радиопрозрачной электропроводящей пленки полианилина концентрации 5, 10 и 50 % по массе на радиопрозрачной подложке из стеклопластика. Такие материалы являются многофункциональными – собственно материал с требуемыми характеристиками, но при воздействии внешнего электромагнитного излучения выполняет экранирующие функции. Образцы электропроводящего полимера (пленки полианилина), нанесенные на подложку из стеклопластика, обладают малым затуханием в полосе прозрачности 8–12 ГГц, низким коэффициентом отражения электромагнитного излучения, высокими проводимостью и эксплуатационными характеристиками, технологичностью.

Ключевые слова: электромагнитные волны, поглощение, отражение, «умный» материал, проводящий полимер.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Перспективные интеллектуальные материалы для радиоэлектроники / В. А. Богуш [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-5-11>.

PROMISING SMART MATERIALS FOR RADIOELECTRONICS

VADIM A. BOGUSH, ALEXANDER V. GUSINSKY, VIKTAR A. KARPOVICH,
NATALIA A. PEVNEVA, VALENTINA N. RODIONOVA, MARINA M. KASPEROVICH,
IVAN A. KASHKO, DMITRY V. GRAPOV, YURIY M. KUKUT, VLADIMIR A. LABUNOV

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

Submitted 14.03.2023

Abstract. The investigations of a multilayer material – a polymeric radio-transparent electrically conductive film of polyaniline with a concentration of 5, 10 and 50 % by weight on a radio-transparent fiberglass substrate were carried out. Such materials are multifunctional – the material itself has the required characteristics, but when it is exposed to external electromagnetic radiation, it provides shielding functions. Electrically conductive polymer samples (polyaniline film) deposited on a fiberglass substrate have low attenuation in the 8–12 GHz transparency band, low electromagnetic radiation reflection coefficient, high conductivity and performance characteristics, as well as manufacturability.

Keywords: electromagnetic waves, absorption, reflection, “smart” material, conductive polymer.

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

For citation. Bogush V. A., Gusinsky A. V., Karpovich V. A., Pevneva N. A., Rodionova V. N., Kasperovich M. M., Kashko I. A., Grapov D. V., Kukut Yu. M., Labunov V. A. (2023) Promising Smart Materials for Radioelectronics. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-5-11> (in Russian).

Введение

Одним из важнейших современных направлений развития материаловедения являются разработка и создание материалов 3-го поколения – интеллектуальных материалов (англ. – smart materials). К ним относятся такие, которые способны активно противодействовать внешним факторам (нагрузкам, излучению и т. д.) и адаптироваться к ним после оценки характера внешнего воздействия и собственного состояния; радиопоглощающие материалы, реагирующие на внешние электромагнитные воздействия, и т. д. Отличительные черты «умных» материалов – дополнительные функциональные возможности, которые выходят за пределы свойств, определяемых их структурой. Они выполняют двойную или даже тройную функцию – собственно материала с требуемыми характеристиками, датчика на внешнее воздействие и в некоторых случаях устройства, «запрограммированного» на определенное поведение. Это достигается благодаря структуре и составу таких материалов. К таким относятся и электропроводящие полимеры [1].

Электропроводящие полимерные материалы способны экранировать высокочастотное электромагнитное излучение от внешних источников. Существуют проводящие полимеры (полимеры с собственной проводимостью), которые возвращаются к исходному состоянию после воздействия света, электричества, магнитного поля [2]. Отличительная особенность этих материалов состоит в том, что они эффективно экранируют не только высокочастотное электромагнитное, но и радиационное излучение.

Существование электропроводности в полимерах объясняется тем, что в местах дефектов их структуры возникает неспаренный электрон, который может передвигаться вдоль полимерной цепи. Легирование проводящего полимера акцепторами или донорами электронов приводит к увеличению его электропроводности за счет уменьшения энергии, требующейся для образования подвижного электрона. Наиболее известными и широко применяемыми проводящими полимерами являются полианилин и полипиррол [3]. Минимальное удельное сопротивление наблюдается в чистых ориентированных полимерах с большой молекулярной массой. Наибольшие полученные значения составляют ~ 10 Ом·м для полиацетилена и 2–10 Ом·м для полианилина [1].

Полианилин является распространенным электропроводящим полимером благодаря простоте получения и разнообразию свойств, достижимых за счет допирования. Получение полианилина основано на полимеризации анилина, которая осуществляется электрохимически, методом окислительной полимеризации либо другими способами [4–6].

Цель исследований – изучение комплекса свойств макетных образцов полимерной радиопрозрачной электропроводящей пленки полианилина различной концентрации, нанесенной на радиопрозрачную подложку, для технологий создания материалов, взаимодействующих с электромагнитным излучением.

Методика проведения расчетов и эксперимента

В процессе исследований разработаны два метода формирования слоев проводящего полимера полианилина (PANI) – из его суспензии и порошка. В качестве растворителя использовался *n*-метилпирролидон (NMP). Слои полианилина были сформированы на подложках стеклопластика размерами 100×60×3 мм. Для улучшения адгезии поверхность подложек смачивалась водой и обрабатывалась наждачной бумагой с зернистостью P150 до достижения матирования. После матирования подложки вытирали бумажными салфетками и сушили на воздухе не менее 20 мин.

Для получения суспензии использовали 0,4 г полианилина в виде гранул, которые измельчали в ступке при помощи пестика. Полученный порошок полианилина помещали в стаканчик для взвешивания и добавляли 5 мл *n*-метилпирролидона. Суспензирование полученной смеси осуществлялось с помощью ультразвука на протяжении 30 мин. По завершении суспензирования на стенках стаканчика наблюдались крупные частицы полианилина размерами 100–300 мкм (рис. 1, а). Для улучшения гомогенности в суспензию добавляли еще 5 мл *n*-метилпирролидона и проводили повторное суспензирование ультразвуком в течение 20 мин. По завершении процесса частиц на стенках стаканчика больше не наблюдалось (рис. 1, б), а крупные частицы полианилина выпали в осадок на дно стаканчика (рис. 1, в).

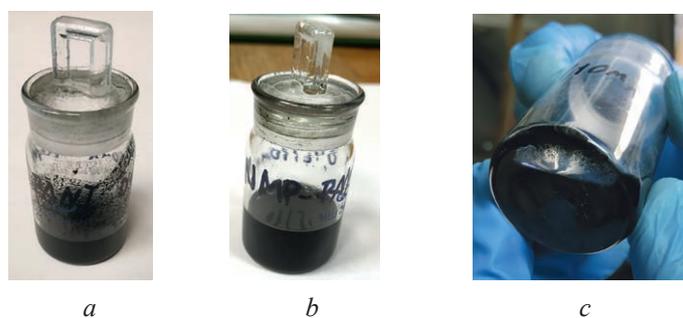


Рис. 1. Суспензия полианилина: *a, b* – в 5 и 10 мл *n*-метилпирролидона соответственно; *c* – ее осадок в 10 мл *n*-метилпирролидона
Fig. 1. Suspension of polyaniline: *a, b* – in 5 and in 10 ml *n*-methylpyrrolidone respectively; *c* – its pellet in 10 ml *n*-methylpyrrolidone

При формировании слоя полианилина из суспензии подложки размещали на строго горизонтальной поверхности для обеспечения равномерности слоя. На поверхность подложек суспензию полианилина наносили капельно, затем при помощи стеклянной палочки капли распределяли по площади подложки. Объем нанесенной суспензии составил 1 и 2 мл, что в пересчете на площадь подложки соответствует 1,65 и 3,30 мл/дм². Суспензия удерживалась на поверхности образца силами поверхностного натяжения (они не удерживают более 2 мл вещества). Сушка осуществлялась на воздухе на протяжении 16 ч при нормальных условиях. Исследование поверхности образцов методом оптической микроскопии при увеличении $\times 65$ не позволило рассмотреть и определить размер частиц, составляющих пленку. Из этого можно сделать вывод, что их размер менее 10 мкм. Сопротивление слоев превышало 10 МОм/квадрат. При полном растворении полианилина в суспензии толщины слоев составили 5 и 10 мкм. Толщина слоя определялась исходя из известной площади подложки, прироста веса и плотности полианилина, равной 1,33 г/см³. Достоинства метода формирования слоев полианилина из суспензии – равномерность и хорошая адгезия слоя (слой не осыпается). Недостатки – большой расход растворителя и необходимость формировать более толстые слои за несколько итераций. Метод можно использовать для создания пленок толщиной до 10–20 мкм, но при этом каждая итерация нанесения слоя будет занимать сутки.

Для формирования на подложке слоя полианилина толщиной 50 мкм из порошка было использовано 0,4 г полианилина. Гранулы полианилина механически измельчали в ступке пестиком до состояния порошка. Порошок переносили на подложку (рис. 2, *a*), после чего смачивали *n*-метилпирролидоном и полученную пасту распределяли по поверхности подложки при помощи шпателя (рис. 2, *b*). Сушка NMP происходила в среде воздуха в вытяжном шкафу в течение 16 ч при нормальных условиях. Высушенный образец исследовали визуально, после чего измеряли удельное сопротивление нанесенного слоя (рис. 3).

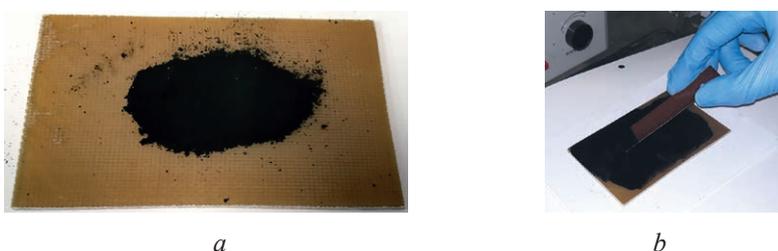
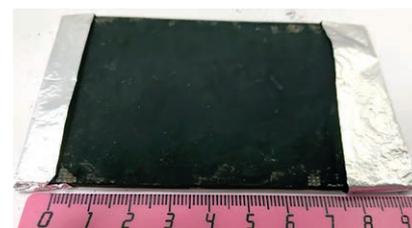


Рис. 2. Формирование слоя полианилина толщиной 50 мкм: *a* – порошок полианилина на подложке; *b* – распределение пасты полианилин + *n*-метилпирролидон на подложке

Fig. 2. Formation of a layer of polyaniline with a thickness of 50 μm :
a – polyaniline powder on a substrate; *b* – distribution of polyaniline + *n*-methylpyrrolidone on a substrate

Рис. 3. Образец полианилина толщиной 50 мкм, подготовленный для измерения удельного сопротивления

Fig. 3. Sample with a 50 μm polyaniline prepared for resistivity measurements



Сопrotивление слоя измеряли посредством накладных контактов из алюминиевой фольги, размещенных по краям образца. Образец помещали слоем полианилина вниз, чтобы улучшить прижим алюминиевых электродов к слою. Сопrotивление образца в данной конфигурации составило 150–1500 кОм. При повторном изготовлении образца толщиной 50 мкм гранулы полианилина массой 0,421 г измельчали с помощью валика. На поверхности образца образовывался слой из суспензии полианилина и твердого остатка, состоящего из твердых частиц полианилина. Образец сушили в течение 16 ч в среде воздуха при нормальных условиях. После высыхания сопротивление образца составило 300 кОм при наличии механического прижима. После сушки в вакууме сопротивление образца увеличилось до (8000 ± 4000) кОм. Улучшение механических свойств пленок, сформированных из порошка полианилина, возможно за счет применения связующих веществ, таких как эпоксидные смолы и силикон. Измерение коэффициента ослабления и коэффициента отражения электромагнитного излучения макетных образцов композиционных структур P5, P10, P50 в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц выполняли волноводным методом с использованием векторного анализатора цепей Anritsu MS4644B и двух коаксиально-волноводных переходов КВП-23x10 (рис. 4). Макетные образцы представляли собой стеклопластик с нанесенным слоем полианилина концентрацией по массе: P5 – 5 %, P10 – 10 %, P50 – 50 %.

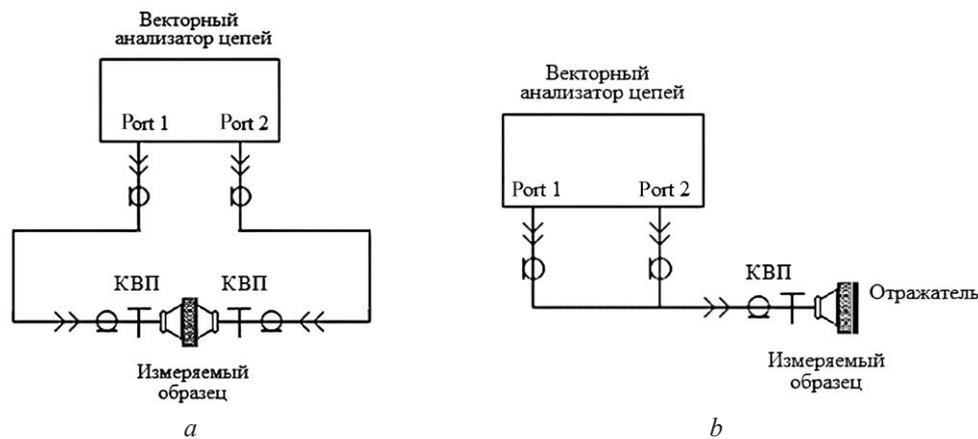


Рис. 4. Схема для измерений коэффициентов ослабления (а)

и отражения электромагнитного излучения (б) макетных образцов композиционных структур P5, P10, P50

Fig. 4. Scheme for measurements of coefficients (a) and reflection of electromagnetic radiation (b) of prototype samples of composite structures P5, P10, P50

Результаты исследований и их обсуждение

Выполнены исследования макетных образцов композиционных структур, содержащих полимерную радиопрозрачную электропроводящую пленку полианилина, по измерению радиопоглощающих и радиоотражающих свойств в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц. Результаты измерения коэффициента ослабления (радиопрозрачность) образца стеклопластика (подложки) размерами $500 \times 500 \times 2$ мм в диапазоне частот 1–12 ГГц приведены на рис. 5.

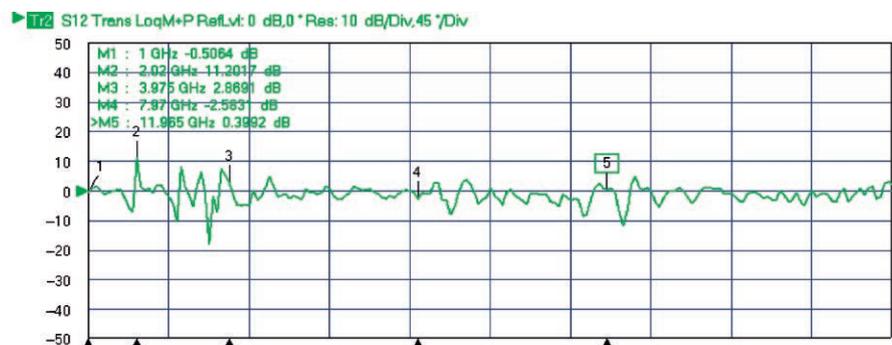


Рис. 5. Диаграмма поглощения экспериментального образца стеклопластика (подложка) в диапазоне частот 1–12 ГГц

Fig. 5. The absorption diagram of the experimental fiberglass sample (substrate) in the frequency range 1–12 GHz

Результаты измерения коэффициента ослабления и коэффициента отражения макетных образцов композиционных структур P5, P10 и P50 (стеклопластик со слоем полианилина) в диапазоне частот 8–12 ГГц представлены на рис. 6.

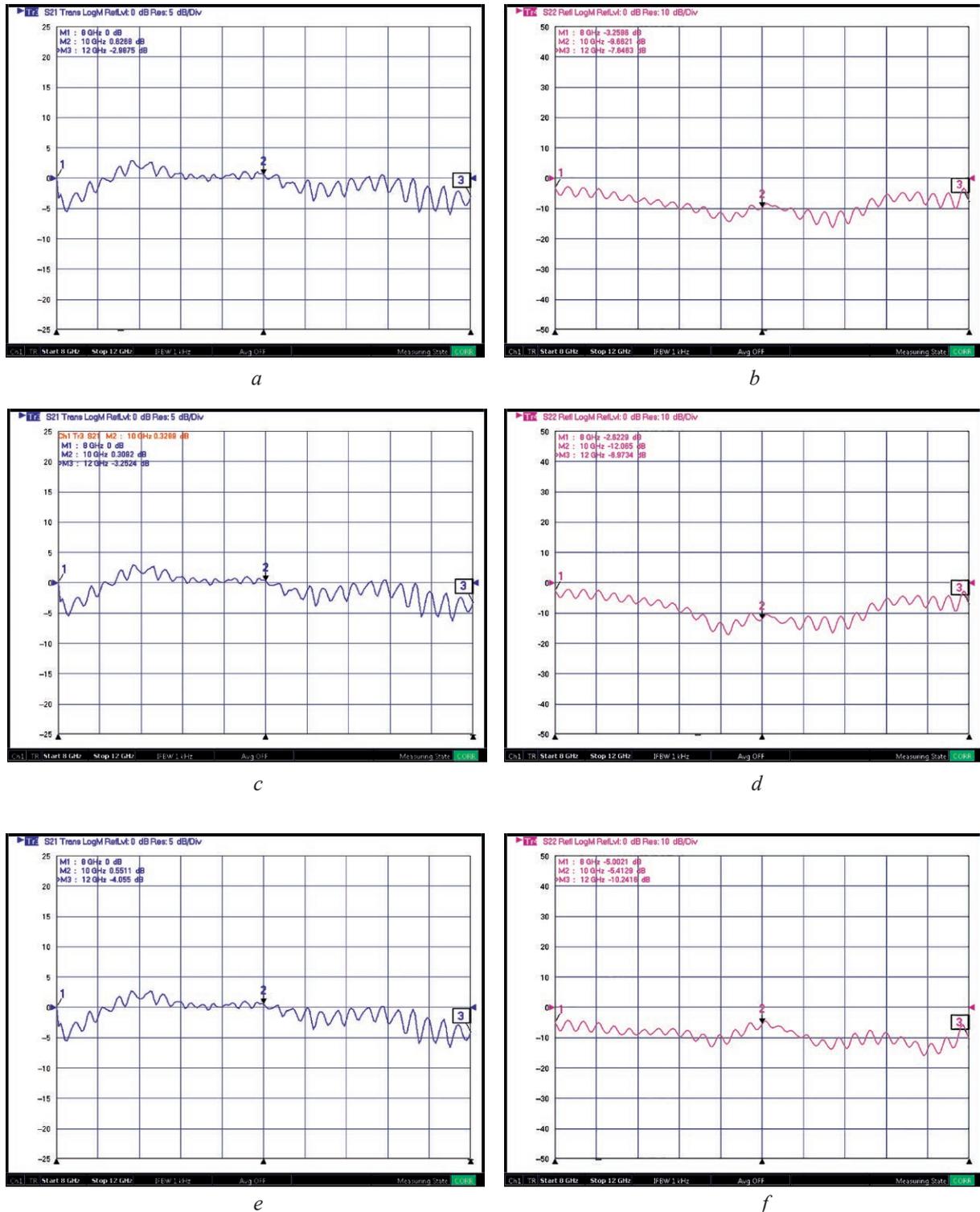


Рис. 6. Зависимости коэффициента ослабления макетных образцов P5 (a), P10 (c), P50 (e) и коэффициента отражения электромагнитного излучения P5 (b), P10 (d), P50 (f) от частоты в диапазоне 8–12 ГГц

Fig. 6. Dependences of the attenuation coefficient of prototype samples P5 (a), P10 (c), P50 (e) and the coefficient reflection of electromagnetic radiation P5 (b), P10 (d), P50 (f) on frequency in the range 8–12 GHz

Заключение

1. Исследованная пленка полианилина – электропроводящего полимера, нанесенная на подложку из стеклопластика, обладает малым затуханием, низким коэффициентом отражения электромагнитного излучения, высокими проводимостью и эксплуатационными характеристиками, технологичностью.

2. Многослойный электропроводящий материал – пленка полианилина – может использоваться в различных отраслях для решения следующих задач: обеспечение оптимальных условий эксплуатации устройств электроники, электро- и радиотехники на разных частотах и интенсивностях электромагнитного излучения для устранения нежелательных отражений сигналов; обеспечение минимального отражения электромагнитного излучения; создание локальных радиопоглощающих поверхностей на участках антенн, в корпусах и элементах оборудования; подавление поверхностных излучений в широком диапазоне частот и др.

Список литературы

1. Блайт, Э. Р. Электрические свойства полимеров / Э. Р. Блайт, Д. Блур. М.: Физматлит, 2008.
2. Михайлин, Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. М.: Научные основы и технологии, 2009.
3. Schwartz, M. *Encyclopedia of Smart Materials* / M. Schwartz. New York: John Wiley and Sons, 2002.
4. Yu, K. Conductive Shape Memory Polymer Composite Incorporated with Hybrid Fillers: Electrical, Mechanical, and Shape Memory Properties / K. Yu, Y. Liu, J. Leng // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2011. No 22. P. 369–379.
5. Yanilmaz, M. A Review: Effect of Conductive Polymers on the Conductivities of Electrospun Mats / M. Yanilmaz, A. S. Sarac // *Textile Research Journal*. 2014. Vol. 84, No 12. P. 1325–1342.
6. Muthukumar, N. Polyaniline-Coated Polyurethane Foam for Pressure Sensor Applications / N. Muthukumar, G. Thilagavathi, T. Kannaian // *High Performance Polymers*. 2015. Vol. 28, No 3. P. 1–8. DOI: 10.1177/0954008315583703.

References

1. Blythe E. R., Bloor D. (2008) *Electrical Properties of Polymers*. Moscow, Fizmatlit.
2. Mikhailin Yu. A. (2009) *Special Polymer Composite Materials*. Moscow, Scientific Bases and Technologies.
3. Schwartz M. (2002) *Encyclopedia of Smart Materials*. New York, John Wiley and Sons.
4. Yu K., Liu Y., Leng J. (2011) Conductive Shape Memory Polymer Composite Incorporated with Hybrid Fillers: Electrical, Mechanical, and Shape Memory Properties. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. (22), 369–379.
5. Yanilmaz M., Sarac A. S. (2014) A Review: Effect of Conductive Polymers on the Conductivities of Electrospun Mats. *Textile Research Journal*. 84 (12), 1325–1342.
6. Muthukumar N., Thilagavathi G., Kannaian T. (2015) Polyaniline-Coated Polyurethane Foam for Pressure Sensor Applications. *High Performance Polymers*. 28 (3), 1–8. DOI: 10.1177/0954008315583703.

Вклад авторов

Богуш В. А. осуществил постановку задачи, проанализировал и интерпретировал данные, отредактировал и окончательно утвердил рукопись для публикации, произвел ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Гусинский А. В. представил замысел и дизайн исследования электродинамических параметров электропроводящих полимеров.

Лабунов В. А. осуществил выработку технических требований к комплексу свойств композиционных структур для перспективных технологий создания материалов, взаимодействующих с электромагнитным излучением, проанализировал и интерпретировал данные.

Остальные авторы внесли равнозначный вклад в подготовку статьи.

Authors' contribution

Bogush V. A. carried out the statement of the problem, analyzed and interpreted the data, edited and finally approved the manuscript for publication, made its critical revision in terms of significant intellectual content.

Gusinsky A. V. presented the idea and design of the study of the electrodynamic parameters of electrically conductive polymers.

Labunov V. A. carried out the development of technical requirements for a set of properties of composite structures for advanced technologies for creating materials interacting with electromagnetic radiation, analyzed and interpreted the data.

The other authors made equal contributions to the preparation of the article.

Сведения об авторах

Богущ В. А., д. ф.-м. н., профессор, ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Гусинский А. В., д. т. н., доцент, начальник научно-производственно-образовательного инновационного центра СВЧ технологий и их метрологического обеспечения (Центр 1.9) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Карпович В. А., к. ф.-м. н., вед. н. с. экспериментальной базы «Свислочь» НАН Беларуси

Певнева Н. А., к. т. н., ст. н. с. Центра 1.9 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Родионова В. Н., к. ф.-м. н., вед. н. с. Центра 1.9 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Касперович М. М., науч. сотр. Центра 1.9 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кашко И. А., науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории интегрированных микро- и наносистем (НИЛ 4.6) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Грапов Д. В., науч. сотр. НИЛ 4.6 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Кукуть Ю. М., мл. н. с. НИЛ 4.6 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Лабунов В. А., академик Национальной академии наук Беларуси, д. т. н., профессор, заведующий НИЛ 4.6 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-20-92
E-mail: peuneva@bsuir.by
Певнева Наталья Алексеевна

Information about the authors

Bogush V. A., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Gusinsky A. V., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Research and Production and Educational Innovative Center of Microwave Technologies and their Metrological Supply (Center 1.9) of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Karpovich V. A., Cand. of Sci., Leading Researcher at the Experimental Base "Svisloch" of the National Academy of Sciences of Belarus

Pevneva N. A., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Rodionova V. N., Cand. of Sci., Leading Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kasperovich M. M., Researcher at the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kashko I. A., Researcher at the Research Laboratory of Integrated Micro- and Nanosystems (Researcher Lab. 4.6) of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Grapov D. V., Researcher at the Research Lab. 4.6 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kukut Yu. M., Junior Researcher at the Research Lab. 4.6 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Labunov V. A., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Research Lab. 4.6 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-20-92
E-mail: peuneva@bsuir.by
Pevneva Natalia Alekseevna