

*Электричество, 2015, № 6, с. 55–60.*

## **Широкополосные композиционные радиопоглощающие покрытия на основе ультрадисперсных гексаферритовых наполнителей**

**СЕРЕБРЯННИКОВ С.В., ЧЕРКАСОВ А.П., ДОЛГОВ А.В., ЕРЕМЦОВА Л.Л.,  
РУМЯНЦЕВ П.А.**

*Рассматривается создание и исследование пленочных композиционных радиопоглощающих композитов (РПК) на основе ферромагнитных сред. Гексаферриты, обладающие естественным ферромагнитным резонансом (ЕФМР), относятся к материалам, способным поглощать электромагнитные волны. Эти материалы могут быть использованы для создания покрытий, поглощающих электромагнитные волны в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, уменьшающих мощность отраженного сигнала электромагнитной волны в широком диапазоне частот, а также могут применяться в качестве материала для существенного снижения взаимных помех в передающих и приемных трактах, работающих в диапазоне 2,60 ГГц.*

*Ключевые слова: гексагональные ферриты, ферромагнитный резонанс, радиопоглощающее покрытие, легированные материалы*

Применение композиционных материалов – легированных гексаферритов с добавками ультрадисперсных порошков шпинели и карбида железа – позволяет получить системы с поглощающими свойствами, присущими композитам, и хорошими электроизоляционными характеристиками. Комплексное исследование магнитных характеристик методом ферромагнитного резонанса в диапазоне частот 2,60 ГГц, определение влияния состава композиций на частотный спектр магнитной проницаемости и электродинамические свойства ферромагнитных фаз создают основы для улучшения параметров телекоммуникационных и локационных систем и расширения функциональных и технических возможностей электронных средств. Многослойные и композитные образцы в зависи-

мости от материалов, из которых они состоят, и условий, в которых находятся, могут отражать, пропускать электромагнитное излучение (ЭМИ), а также поглощать его.

Способность к отражению и поглощению электромагнитного излучения может быть использована для создания экранирующих и поглощающих материалов (ПМ), в частности радиопоглощающих. Для эффективного поглощения СВЧ-излучения предлагается использовать материалы с высокими значениями мнимых частей диэлектрической и магнитной проницаемости. Основные свойства таких материалов приведены в [1–9].

Создание современных ПМ с заданными характеристиками, в частности с малым коэффициентом отражения, возможно только с применением ком-

позитных материалов [5, 9–11]. Все известные ПМ можно классифицировать по используемым в них материалам, принципу действия, типу конструкции, ширине рабочего диапазона частот электромагнитного излучения (ЭМИ). Наибольшее внимание в настоящее время уделяется созданию широкополосных поглотителей, методам расчета и разработкам которых посвящены, например, работы [12–17].

Предлагаемые решения для коэффициента отражения связывают длину волны, толщину поглотителя и эффективные комплексные диэлектрическую и магнитную проницаемость. Для расширения рабочего диапазона ПМ используются, в частности, многослойные, сотовые и ячеистые структуры. В качестве искусственных наполнителей часто применяют проводники различной формы [18–21]. В СВЧ-области слоисто-периодические структуры, содержащие магнитоупорядоченные среды, являются перспективными для создания покрытий, поглощающих данное излучение [21]. В многослойных поглотителях электропроводность слоев увеличивается от поверхности вглубь поглотителя [13, 22]. Исследования эпоксидной смолы с добавками металлов [26] показали, что минимальный коэффициент отражения фиксируется при объемной концентрации металлических включений 15, 20%. Композитные покрытия на основе металлодиэлектрических волокон [2] имеют коэффициент отражения не более 11 дБ в полосе 10, 32 ГГц.

В [23] теоретически показано принципиальное ограничение ширины рабочего диапазона многослойных поглотителей. Широкий рабочий диапазон частот имеют поглотители на основе композитов с электропроводящими волокнами. На основе композитных электропроводящих волокон в смеси с ферритами разработаны однослойные радиопоглощающие покрытия [26]. Многослойные поглотители с использованием ферритов или ферромагнитных материалов имеют очень широкую полосу поглощения при достаточно малом коэффициенте отражения. Например, трехслойный поглотитель [26] обеспечивает поглощение на уровне 10 дБ в диапазоне частот 5, 40 ГГц при толщине 2 мм. Расширение полосы поглощения обеспечивается плавным изменением комплексных диэлектрической и магнитной проницаемости по толщине поглотителя.

Перспективными магнитными материалами следует считать гранулированные материалы, представляющие собой наноструктурный композит, в котором ферромагнитные наночастицы с кристаллической структурой расположены в диэлектрической матрице [21]. Одним из достоинств таких материалов является возможность простого управления их параметрами путем изменения concentra-

ции внедряемого в композит компонента. При этом возникает реальная возможность создания ПМ с низким коэффициентом отражения электромагнитных волн (ЭМВ) высоких частот [25]. Диэлектрические матрицы с включенными в них мелкими ферромагнитными частицами находят широкое применение как поглотители [21], а также как наполнители волноводов и резонаторов в различных невзаимных устройствах СВЧ-техники. Для разработки этих устройств необходимо располагать информацией о высокочастотных свойствах ансамбля ферромагнитных частиц.

С увеличением концентрации частиц в матрице сближение ферромагнитных частиц неприменимо в связи с усилением межчастичного дипольного взаимодействия. Магнитное дипольное взаимодействие может привести к магнитному упорядочению в системе частиц, причём тип упорядочения зависит от характера пространственного распределения частиц [26].

В [9, 10] показано, что композиты на основе гексагональных ферритов (ГФ) и полимерного связующего, поглощение ЭМИ в которых происходит за счет естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР), перспективны для применения в диапазоне частот 2, 60 ГГц.

Исследования частотной зависимости уровня поглощения для гексаферритов М-типа различного состава на основе бариевого и стронциевого ферритов показали смещение частоты максимума поглощения ЭМИ для поглотителя  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  от максимума частоты ЕФМР  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ . Необходимо выяснить природу смещения частоты, так как теоретически показано, что при толщине радиопоглощающих композитов (РПМ) от 1 до 2 мм не должно быть большого смещения частоты.

**Обсуждение результатов.** Рациональным решением задачи является нанесение композиционного материала распылением при помощи сжатого воздуха. В качестве наполнителя радиопоглощающего композиционного материала используется стронциевый гексагональный феррит М-типа ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ), легированный ионами титана, кобальта и алюминия с добавлением мелкодисперсного карбида железа. Частотная зависимость магнитной проницаемости такого композиционного материала представлена на рис. 1.

При измерениях использовался образец, перекрывающий волновод и состоящий из смеси  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19} + 10\%$  мас. FeC с парафином. Композиционный материал наносился на основу распылением послойно. Изменением количества подаваемого материала и давления воздуха (6–8 атм.) формировался «факел» для равномерного нанесения покрытия. Зависимость максималь-

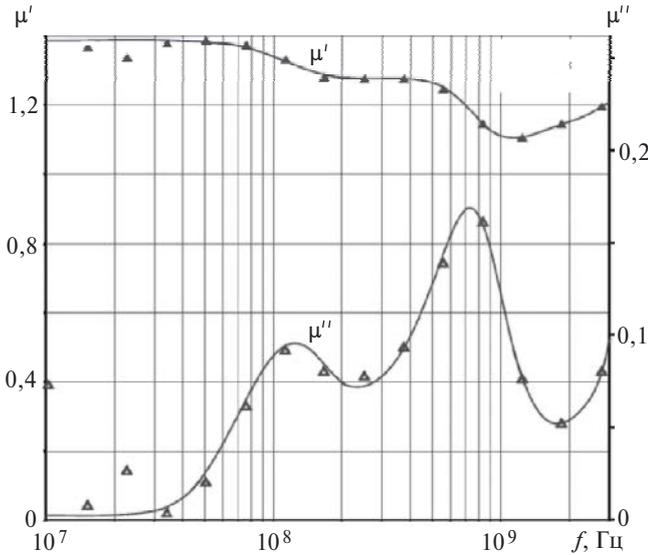


Рис. 1. Частотная зависимость магнитной проницаемости и потерь композиционного материала на основе феррита  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  +10% мас. FeC

ного значения поглощения ЭМИ и частоты максимума поглощения от толщины покрытия представлена на рис. 2.

Число проходов, обеспечивающих равномерность наносимого композиционного покрытия и рациональное время сушки в термостате, составляет 2–4 слоя за один проход. При температуре сушки 40 °С в течение 15 мин наносимые слои высыхают полностью без нарушения целостности покрытия.

Композит, в состав которого входят порошок феррита и тонкодисперсный карбид железа, тщательно перемешивался под воздействием ультразвука с периодическим добавлением воды [27]. Соотношение компонентов композиционного материала, обеспечивающее достаточно низкую вяз-

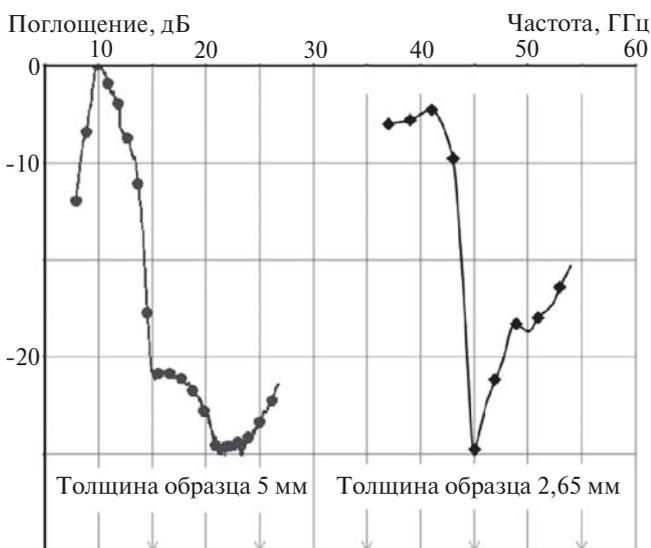


Рис. 2. Частотная зависимость поглощения ЭМИ от толщины покрытия

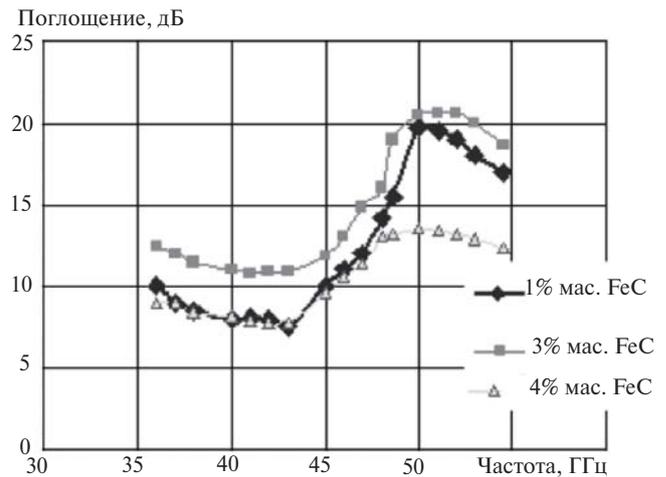


Рис. 3. Частотная зависимость поглощения композита  $\text{SrTi}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{11,6}\text{O}_{19}$  при различном содержании карбида железа

кость, необходимую для его распыления на защищаемую поверхность, а также минимальное время высыхания, соответствует 67% мас. парафин, 33% мас. феррита, содержание FeC изменялось от 1 до 10% мас. и 47% мас. воды от массы композита в качестве растворителя.

Сложность разработки эффективного радиопоглощающего покрытия (РПП) в диапазоне частот 2 , 60 ГГц заключается в том, что длина волны электромагнитного излучения существенно больше, чем толщина наносимого на основу покрытия. В этом случае ЭМИ практически не взаимодействует с покрытием. Авторы [4–9] показали, что добавление мелкодисперсного карбида железа приводит к увеличению эффективности поглощения электромагнитных волн до 9, 10 дБ.

Исследования частотной зависимости поглощения ЭМИ от содержания FeC в композите показали, что наибольшим поглощением обладает композит, содержащий 3% мас. карбида железа. При этой концентрации поглощение составляет 21 дБ при частоте 52 ГГц (рис. 3).

Добавление в состав исходного феррита шпинельной фазы M1000НН (рис. 4) существенно снижает поглощение ЭМИ в высокочастотном диапазоне.

Толщина поглощающего покрытия изменялась. При изменении толщины покрытия от 1,5 до 2 мм можно достаточно эффективно управлять значением магнитных потерь композита в низкочастотном диапазоне.

Исследование содержания ионов титана-кобальта в композитах на основе тонкодисперсных гексаферитов позволило определить влияние их концентрации на закономерности изменения частоты ЕФМР рис. 5.

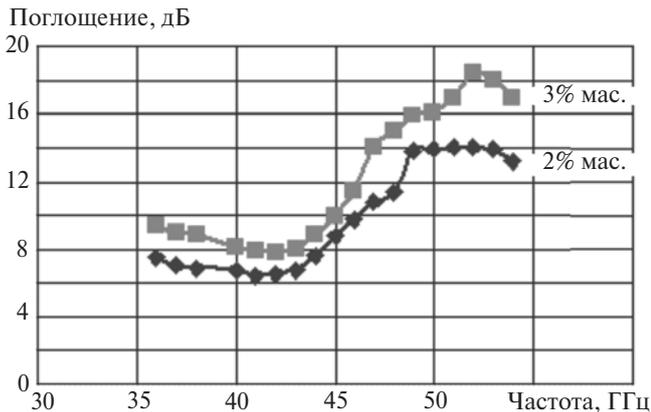


Рис. 4. Частотная зависимость поглощения композита  $\text{SrTi}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{11.6}\text{O}_{19}$  с различным количеством M1000NH

Замещение ионов  $\text{Fe}^{3+}$  ионами  $\text{Ti}^{4+} + \text{Co}^{2+}$  и др., которые занимают предпочтительно положения 2b – с пятерной кристаллографической ориентацией, а также положения 4f<sub>2</sub> и 12k – октаэдрические кристаллографические позиции, приводит к частичной изоляции положения пятерной 2b и, следовательно, к уменьшению ее влияния на анизотропные свойства гексагональных ферритов. При этом частота ЕФМР уменьшается.

**Выводы.** 1. Разработанные и исследованные гексаферриты могут быть применены в виде пленочных радиопоглощающих структур для СВЧ-аппаратуры; их отличительной особенностью является всенаправленное уменьшение отражения в диапазоне 2, 60 ГГц.

2. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что макеты радиопоглощающих материалов и покрытий на основе наномодифицированных и наноструктурированных материалов обладают высокой степенью поглощения ЭМИ в СВЧ диапазоне.

3. Полученные зависимости магнитной проницаемости гексагональных ферритов от химического состава, технологии синтеза, электродинамических характеристик радиопоглощающих материалов и покрытий позволяют рекомендовать к применению методику управления величиной поглощения защитных радиопоглощающих покрытий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. – М.: Наука, 1982, 164 с.
2. Алимин Б.Ф., Торгованов В.А. Методы расчета поглотителей электромагнитных волн. – Зарубежная радиоэлектроника, 1976, № 3, с. 29–57.
3. Тареев Б.М., Коротков Н.В., Петров В.М., Преображенский А.А. Электрорадиоматериалы. – М.: Высшая школа, 1976, 336 с.
4. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике. – М.: Радио и связь, 1989, 287 с.

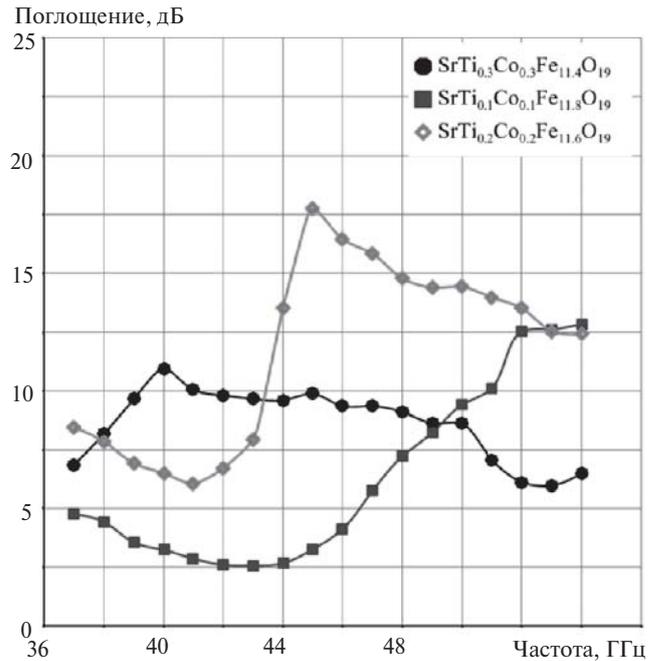


Рис. 5. Частотная зависимость поглощения композита  $\text{Sr}(\text{TiCo})\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$  от содержания ионов  $\text{Ti}^{4+} \text{Co}^{2+}$

5. Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение. – М.:Л.: Энергоиздат, 1959, 336 с.

6. Бутько Л.Н., Бучельников В.Д., Бычков И.В. Коэффициент поглощения электромагнитных волн в слоистой структуре «немагнитный проводник – феррит». – Вестник Челябинского государственного университета. Физика, 2010, № 24 (205), вып. 8, с. 50–54.

7. Антонов А.С., Панина Л.В., Сарычев А.К. Высокочастотная магнитная проницаемость композитных материалов, содержащих карбонильное железо. – Журнал технической физики, 1989, т. 59, № 6, с. 88–94.

8. Алимин Б.Ф. Современные разработки поглотителей электромагнитных волн и радиопоглощающих материалов. – Зарубежная радиоэлектроника, 1989, № 2, с. 75–82.

9. Островский О.С., Сорока А.С., Шматько А.А. Оптимизация широкополосных неотражающих многослойных покрытий. – Материалы конференции «СВЧ-техника и спутниковый прием». Севастополь, 1994, с. 125–127.

10. Бучельников В.Д., Бычков И.В., Шавров В.Г. Влияние магнитоупорной связи на отражение электромагнитной волны от ферродиэлектрика. – Физика твердого тела, 1992, т. 34, № 11, с. 3408–3411.

11. Ковалева Т.Ю., Безъязыкова Т.Г., Шафпанский В.С. Магнитоэлектрики для СВЧ-поглощающих экранов. – Радиоэлектроника и связь, 1991, № 2, с. 84–86.

12. Патент № 2155420 (Россия). Шабанов С.Г., 27.08.2000.

13. Воротницкий Ю.И. Оптимальное проектирование многослойных поглотителей электромагнитных волн. – Болгарский физический журнал, 1987, т. 14, № 4, с. 378–385.

14. Lederer P.G. An introduction to radar absorbent materials. – Malvern: Royal Signals and Radar Establishment, 1986.

15. Abdolali Ali, Oraizi Homaeoon, Tavakoli Ahad. Ultra Wide Band Radar Absorbing Materials. Elektromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 18–21, 2009, 351 с.

16. Taleghani H.G., Aleahmad M., Eisazadeh H. Preparation and Characterization of Polyaniline Nanoparticles Using Various Solutions. – World Applied Sciences Journal, 2009, No. 6 (12), pp. 1607–1611.

17. Патент 2192756 (Великобритания). Оpubл. 20.01.88.
18. Бреховских Л.М. Волны в слоистых структурах. — М.: Изд-во АН СССР, 1957, 360 с.
19. Костин М.В., Шевченко В.В. Теория искусственных магнетиков на основе кольцевых токов. — Радиотехника и электроника, 1992, т. 37, № 11, с. 1922–2003.
20. Bohren Craig F., Luebbers Raymond, Langdon H. Scott. Microwave-absorbing chiral composites: chirality essential or accidental. — Appl. Opt. J., 1992, vol. 31, No. 30, pp. 6403–6407.
21. Казанцева Н.Е., Рывкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона. — Радиотехника и электроника, 2003, т. 48, № 2, с. 196–209.
22. Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн. — Физическая инженерия поверхности, 2003, т. 1, с. 161–163.
23. Футерман Д.Е., Федий А.А., Бычков И.В., Бучельников В.Д., Шавров В.Г. Электродинамические характеристики композита диэлектрик-металл. — Радиотехника и электроника, 2008, № 4, с. 487–489.
24. Розанов К.Н. Фундаментальное ограничение для ширины рабочего диапазона радиопоглощающих покрытий. — Радиотехника и электроника, 1999, т. 44, № 5, с. 526–530.
25. Шнейдерман Я.А. Радиопоглощающие материалы. — Зарубежная радиоэлектроника, 1975, № 2, с. 93–113; № 3, с. 71–92.
26. Торгованов В.А. Безэховые камеры. — Зарубежная радиоэлектроника, 1974, № 12, с. 20–46.
27. Башкиров Ш.Ш., Либерман А.Б., Зарипова Л.Д. Магнитная микроструктура в гексаферритах стронция с коррелированными неизоморфными замещениями. — Физика твердого тела, 1997, т. 39, № 4, с. 676.
28. Серебрянников С.В., Чепарин В.П., Смирнов Д.О., Румянцев П.А., Китайцев А.А., Еремцова Л.Л. Свойства компози-

ционных материалов на основе ультрадисперсных ферритмагнитных наполнителей. — Электричество, 2011, № 3, с. 78–80.

[26.03.15]

*А в т о р ы : Серебрянников Сергей Владимирович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1975 г. В 2004 г. защитил в МЭИ докторскую диссертацию «Влияние электрических полей и модификации полимеров на эксплуатационные свойства материалов электротехнического назначения». Профессор, заведующий кафедрой физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК) НИУ «МЭИ».*

*Черкасов Анатолий Петрович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1968 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию «Свойства висмут замещенных ферритов гранатов» в МЭИ. Доцент кафедры ФТЭМК НИУ «МЭИ».*

*Долгов Андрей Викторович окончил вечерний электромеханический факультет МЭИ в 1987 г. Ведущий инженер кафедры ФТЭМК НИУ «МЭИ».*

*Еремцова Лариса Леонидовна окончила электромеханический факультет МЭИ в 1987 г. Ведущий программист кафедры ФТЭМК НИУ «МЭИ».*

*Румянцев Павел Александрович окончил институт электротехники МЭИ в 2009 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Пленочные радиопоглощающие материалы, содержащие микро- и наночастицы наполнителя» в ВНИИКП. Начальник электротехнического отдела в компании ООО «Спецпроект».*

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 6, pp. 55–60.*

## Composite Wide-Band Radar Absorbing Coatings on the Basis of Ultradisperse Hexaferrite Filling Materials

S.V. SEREBRYANNIKOV, A.P. CHERKASOV, A.V. DOLGOV, L.L. EREMTSOVA  
and P.A. RUMYANTSEV

*Development and investigation of composite film radar absorbing composite materials (RACM) made on the basis of ferromagnetic media are considered. Hexaferrites, substances possessing natural ferromagnetic resonance (NFMR), are among materials able to absorb electromagnetic waves. These materials can be used for making coatings absorbing electromagnetic waves in the microwave band, which decrease the power of reflected electromagnetic wave signal in a wide frequency band. They can also be used as a material for essentially decreasing the mutual interference in receiving and transmitting paths operating in the 2,60 GHz frequency band.*

**Key words:** hexagonal ferrites, ferromagnetic resonance, radar absorbing coating, doped materials

### REFERENCES

1. Kovneristyi Yu.K., Lazareva I.Yu., Ravayev A.A. *Materialy, pogloshchayushchiye SVCh-izlucheniya* (Materials absorb. UHF-radiation). Moscow, Publ. «Nauka», 1982, 164 p.
2. Alimin B.F., Torgovanov V.A. *Zarubeznaya radioelektronika — in Russ. (Foreign radio electronics)*, 1976, No. 3, pp. 29–57.
3. Tareyev B.M., Korotkov N.V., Petrov V.M., Preobrazhenskii A.A. *Elektroradio materialy* (Electroradio materials). Moscow, Publ. «Visshaya shkola», 1976, 336 p.

4. Rez I.S., Poplavko Yu.M. *Dielektriki. Asnovnye svoystva i primeneniye v elektronike* (Dielectrics. Basic properties and use in electronics). Moscow, Publ. «Radio and communications», 1989, 287 p.

5. Khippel' A.R. *Dielektriki i ikh primeneniye* (Dielectrics and their use). Moscow and Leningrad, Publ. «Energoizdat», 1959, 336 p.

6. But'ko L.N., Buchel'nikov V.D., Bychkov I.V. *Vestnik chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika, vyp. 8 — in Russ. (Bulletin of Chelyabinsk State University. Physics, iss. 8)*, 2010, No. 24 (205), pp. 50–54.

7. Antonov A.S., Panina L.V., Saryxhev A.K. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki (Technical physics magazine)*, 1989, t. 59, No. 6, pp. 88–94.
8. Alimin B.F. *Zarubezhnaya radioelektronika – in Russ. (Foreign radio electronics)*, 1989, No. 2, pp. 75–82.
9. Ostrovskii O.S., Soroka A.S., Shmat'ko A.A. *Materialy konf. «SVCh-tekhnika i sputnikovyi priem – in Russ. (Proc. conf. «UHF-technique and satellite reception). Sevastopol', 1994, pp. 125–127.*
10. Buchel'nikov V.D., Bychkov I.V., Shavrov V.G. *Fizika tverdogo tela – in Russ. (Solid state physics)*, 1992, vol. 34, No. 11, pp. 3408–3411.
11. Kovaleva T.Yu., Bez'yazykova T.G., Shafpanskii V.S. *Radioelektronika i svyaz' – in Russ. (Radio electronics and communications)*, 1991, No. 2, pp. 84–86.
12. Patent RF No. 2155420. Shabanov S.G. 27.08.2000.
13. Vorotnitskii Yu.I. *Bolgarskii fizicheskiy zhurnal (Bulgaria physical journal)*, 1987, vol. 14, No. 4, pp. 378–385.
14. Lederer P.G. An introduction to radar absorbent materials. – Malvern: Royal Signals and Radar Establishment, 1986.
15. Abdolali Ali, Oraizi Homaeoon, Tavakoli Ahad. Ultra Wide Band Radar Absorbing Materials. Elektromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 18–21, 2009, 351 c.
16. Taleghani H.G., Aleahmad M., Eisazadeh H. Preparation and Characterization of Polyaniline Nanoparticles Using Various Solutions. – World Applied Sciences Journal, 2009, No. 6 (12), pp. 1607–1611.
17. Patent 2192756 (Great Britain). Publ. 20.01.88.
18. Brekhovskikh L.M. *Volny v sloistykh strukturakh (Waves in layered structures)*. Moscow, Publ. USSR Academy of Sciences, 1957, 360 p.
19. Kostin M.V., Shevchenko V.V. *Radiotekhnika i elektronika – in Russ. (Radio engineering and electronics)*, 1992, vol. 37, No. 11, pp. 1922–2003.
20. Bohren Craig F., Luebbers Raymond, Langdon H. Scott. Microwave-absorbing chiral composites: chirality essential or accidental. – *Appl. Opt. J.*, 1992, vol. 31, No. 30, pp. 6403–6407.
21. Kazantseva N.E., Ryzkina N.G., Chmutin I.A. *Radiotekhnika i elektronika – in Russ. (Radio engineering and electronics)*, 2003, tom 48, No. 2, pp. 196–209.
22. Ostrovskii O.S., Odarenko E.N., Shmat'ko A.A. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti – in Russ. (Physical Surface Engineering)*, 2003, vol. 1, pp. 161–163.
23. Futerman D.E., Fedii A.A., Bychkov I.V., Buchel'nikov V.D., Shavrov V.G. *Radiotekhnika i elektronika – in Russ. (Radio engineering and electronics)*, 2008, No. 4, pp. 487–489.
24. Rozanov K.N. *Radiotekhnika i elektronika – in Russ. (Radio engineering and electronics)*, 1999, vol. 44, No. 5, pp. 526–530.
25. Shneiderman Ya.A. *Zarubezhnaya radioelektronika – in Russ. (Foreign radio electronics)*, 1975, No. 2, pp. 93–113; No. 3, pp. 71–92.
26. Torgovanov V.A. *Zarubezhnaya radioelektronika – in Russ. (Foreign radio electronics)*, 1974, No. 12, pp. 20–46.
27. Bashkurov Ah.Sh., Liberman A.B., Zaripova L.D. *Fizika tverdykh tel – in Russ. (Solid state physics)*, 1997, vol. 39, No. 4, p. 676.
28. Serebryannikov S.V., Cheparin V.P., Smirnov D.O., Rummyantsev P.A., Kitaitsev A.A., Eremitsova L.L. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 3, pp. 78–80.

*Authors: Serebryannikov Sergei Vladimirovich (Moscow, Russia) – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»).*

*Cherkasov Anatolii Petrovich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.) – Associate Professor of the Department, NRU «MPEI».*

*Dolgov Andrei Viktorovich (Moscow, Russia) – Leading engineer, at the Department, NRU «MPEI».*

*Eremitsova Larisa Leonidovna (Moscow, Russia) – Leading programmer at the Department, NRU «MPEI».*

*Rummyantsev Pavel Aleksandrovich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Power Engineering Department, LLC «Spetsproekt».*

\* \* \*

### К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс (495)362-7485).