

# ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НАНОКОМПЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

**Хлопов Борис Васильевич,**

АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт  
им. академика А.И. Берга", Москва, Россия, [hlopovu@yandex.ru](mailto:hlopovu@yandex.ru)

**Бондарев Юрий Степанович,**

АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт  
им. академика А.И. Берга", Москва, Россия

**Шашурин Василий Дмитриевич,**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, [shashurin@bmstu.ru](mailto:shashurin@bmstu.ru)

**Чучева Галина Викторовна,**

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. академика В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия, [gvc@ms.ire.rssi.ru](mailto:gvc@ms.ire.rssi.ru)

*Работа выполнена при  
поддержке Российского  
фонда фундаментальных  
исследований  
(грант №16-07-00642)*

*Ключевые слова: наночастицы,  
метаматериалы, нанокompозит,  
электромагнитное поле,  
полеобразующая система.*

Исследованы свойства образцов метаматериалов на основе решетчатых упаковок наносфер SiO<sub>2</sub> (опаловых матриц), содержащих в межсферических полостях кластеры металлов (Ni, Fe) и их соединений. Разработан метод оценки восприимчивости к магнитным полям композитных материалов при воздействии на них внешними электромагнитными полями. Разработано испытательное оборудование, представлены аттестованные стенды для оценки электромагнитной восприимчивости испытываемых образцов. Анализ полученных экспериментальных характеристик метаматериалов позволил уточнить их фазовые изменения от внешних воздействий и исследовать магнитные свойства. Проведены исследования характеристик образцов материалов. Исследовались частотные зависимости магнитной проницаемости, частотная зависимость магнитной восприимчивости композитных материалов, а также их зависимость от технологических условий изготовления опытных образцов опаловых матриц. Образцы, на которых проведены испытания, представляют собой наноструктурированную дискретную среду, периодическую по электромагнитным свойствам составляющих её элементов и относятся к трех мерным решетчатым упаковкам микросфер кремнезема со структурой опала (опаловые матрицы), с заполнением их межсферических нанополостей кластерами различных магнитных и немагнитных материалов (кристаллитами металлов или магнитных соединений). Плотнейшая упаковка наносфер образует межсферические полости, что позволяет заполнять их различными веществами. Практическая значимость подобных материалов определяется тем, что они обладают новыми функциональными свойствами, недостижимыми для ранее использовавшихся. С их применением можно управлять размерами наносфер SiO<sub>2</sub>, составом и строением веществ, заполняющих межсферические полости.

В опаловых матрицах, в которых нанополости частично заполнены металлами (Ni, Fe), имеет место микроволновая проводимость. В связи с этим, при воздействии внешних электромагнитных полей наблюдается значительный электрический "отклик", приводящий к эффекту мультиплицирования интегральных магнитных полей. В материалах приведены экспериментальные результаты исследования полученных образцов нанокompозитов в переменном электрическом поле. В исследуемом диапазоне частот образцы нанокompозиты имеют низкие диэлектрические потери и мало зависят от частоты, за исключением некоторого подъема в области низких частот. Диэлектрическая дисперсия частот выражена слабо в микроволновом диапазоне, а все основные изменения, протекают на более низких частотах. Экспериментально подтверждено, что в указанном диапазоне частот электромагнитная восприимчивость испытываемых образцов меняется, изменяя значение напряженности электромагнитного поля в полеобразующей системе технологического оборудования. Полученные экспериментальные результаты и использование на этапе разработки новейших технологий и материалов становятся предпосылкой для решения задач в системах управления радиоэлектронной аппаратурой с улучшением их технических характеристик. Прогнозируется появление на опаловых матрицах и нанокompозитах на их основе приборов управления фазовыми скоростями в оптическом, СВЧ- и ТГц-диапазонах.

## Информация об авторах:

**Хлопов Борис Васильевич**, д.т.н., начальник отдела, АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия

**Бондарев Юрий Степанович**, д.воен.н., заместитель генерального директора, АО "Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга", Москва, Россия

**Шашурин Василий Дмитриевич**, д.т.н., профессор. Зав. Кафедрой "Технологии приборостроения", МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Чучева Галина Викторовна**, д.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе, ученый секретарь, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. академика В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязино, Россия

## Для цитирования:

Хлопов Б.В., Бондарев Ю.С., Шашурин В.Д., Чучева Г.В. Воздействие на нанокompозитные материалы электромагнитным полем // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №5. С. 4-8.

## For citation:

Khlopov B.V., Bondarev Yu.S., Shashurin V.D., Chucheva G.V. (2017). Electromagnetic field impact on nanocomposite materials. T-Comm, vol. 11, no.5, pp. 4-8. (in Russian)

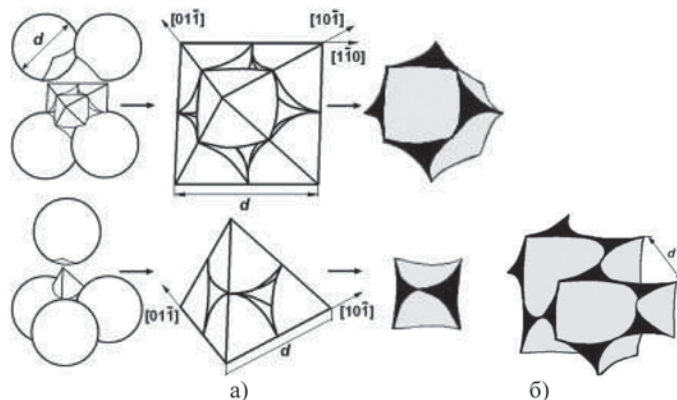
**Введение**

При разработке управляемой радиоэлектронной аппаратуры вопросы повышения качества приема, передачи сигналов, обнаружение объектов источников излучения остаются актуальными и постоянно требуют повышения технических характеристик составных частей. Использование на этапе разработки новейших технологий и материалов становятся предпосылкой для решения поставленных задач. Применение новых нанокompозитных и магнитных метаматериалов в системах управления радиоэлектронной аппаратурой, может позволить улучшить их технические характеристики. Одним из новых типов метаматериалов являются нанокompозиты на основе опаловых матриц, упорядоченно заполненных различными электрически-, оптически- или магнитоактивными веществами. Опаловые матрицы представляют 3D-кубическую структуру на основе решетчатой упаковки наносфер SiO<sub>2</sub> диаметром 200...300 нм. В настоящее время на предприятиях активно ведутся разработки металлодиэлектрических метаматериалов с пространственной дисперсией электрофизических свойств, что позволяет применять новые решения при разработке современных устройств радиоэлектроники.

**Структура опаловой матрицы**

Опаловая матрица представляет собой плотно упакованную периодическую структуру микросфер рентгеноаморфного кремнезема (SiO<sub>2</sub>) – другими словами решетчатую упаковку микросфер, чьи тетраэдрические и октаэдрические полости, образованные контактирующими микросферами не заполнены. Получены 3D правильные упаковки наносфер SiO<sub>2</sub> объемом >15 см<sup>3</sup> с размерами монодоменных областей до 0,1 мм<sup>3</sup>, Δd<4%. Образцы нанокompозитов на основе опаловых матриц были изготовлены методом пропитки, который основан на заполнении нанополостей опаловой матрицы веществом–прекурсором с определенным химическим составом (пропитка опаловых матриц смесью водных растворов солей нитратов металлов из расчета формирования заданного состава). Метод предполагает проведение последующей термообработки при 600-1100<sup>0</sup>С на воздухе и в атмосфере водорода, в процессе которой в указанных полостях формируется необходимый фазовый состав [1-4]. Степень заполнения межсферических нанополостей вводимыми материалами изменяется от ~15% до ~60% в зависимости от числа пропиток. Рентгеновской дифрактометрии и спектроскопией комбинационного рассеяния света контролировали состав и строение синтезированных в нанополостях материалов.

Методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, прибор JEM 200С) было установлено, что степень нарушений периодичности зависит от вводимых материалов и для образцов с соединениями на основе Ni и Fe незначительна. Сформированные кластеры металла, как правило, бесформенны и хаотично ориентированы, но иногда имеют форму тетраэдров и октаэдров, соответствующую форме межсферических полостей [5]. На рис.1 приведены модели наноструктур в октаэдрической и тетраэдрической полостях (а), образованные наносферами SiO<sub>2</sub> и объемная модель вещества, заполняющего октаэдрическую и тетраэдрическую полости, а также объемная модель вещества (б), при заполнении двух октаэдрических и трех тетраэдрических полостей



**Рис. 1.** Модели наноструктур в октаэдрической и тетраэдрической полостях

Опаловые матрицы характеризуются высокой механической и термической (до 1100<sup>0</sup>С) прочностью, а также химической стойкостью [6], что позволяет изготавливать образцы необходимой формы и размеров для их практического применения. Введение в межсферические полости различных веществ не снижает механической и термической прочности образцов.

С использованием полученных нанокompозитов изготовлены 3D периодически упорядоченные образцы (объемные среды) с частотно зависимыми свойствами (электрическими, диэлектрическими и магнитными) при пространственной (в диапазоне 200–300 нм) модуляции указанных характеристик. Размеры активных областей (кластеров) в диапазоне 15-30 нм [4, 7-9]. Подобные пространственно-неоднородные метаматериалы с частотной модуляцией (дисперсией) электрических и диэлектрических параметров, обладающие большими значениями реальной компонентой диэлектрической проницаемости (ε') и малыми – для мнимой компоненты (ε'') создают различные эффекты, один из которых выражается в неравномерном распределении локальных токов, образующихся (при импульсном электромагнитном воздействии) по сечению образцов из указанных материалов.

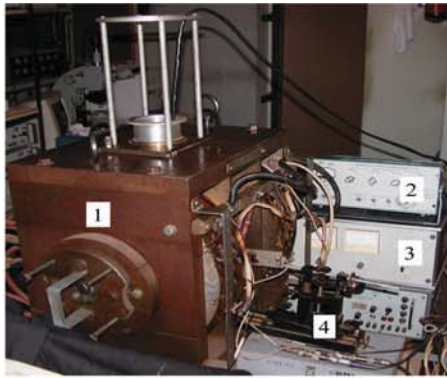
**Исследование магнитных свойств образцов нанокompозитных метаматериалов**

Измерения компонент магнитной проницаемости были проведены на разработанном технологическом оборудовании, которое представляет собой стенд для исследования магнитных свойств нанокompозитов с использованием диэлектрического спектрометра и импедансным анализатором Agilent 4291В. Фотография стенда представлена на рис. 2.

Измерительное оборудование включало компонент для измерения диэлектрической и магнитной проницаемости в диапазоне 100-110 ГГц; исследованные образцы имели габаритные размеры 10,0×10,0×2,0 мм [3, 4].

Для исследования магнитной восприимчивости и магнитных свойств нанокompозитных материалов при воздействии импульсных электромагнитных полей на структуры образцов композитных метаматериалов разработан и использован аттестованный стенд. Фотография стенда представлена на рис. 3. В состав стенда входят: 1 – катушки Гельмгольца; 2 – исследуемый образец (нанокompозитная опаловая матрица); 3 – устройство позиционирования образца; 4 – электронный ключ; 5 – импульсный генератор; 6 – источник питания; 7 – осциллограф; 8 – ПК; 9 – измеритель комплексного импеданса; 10 – измеритель магнитной индукции.



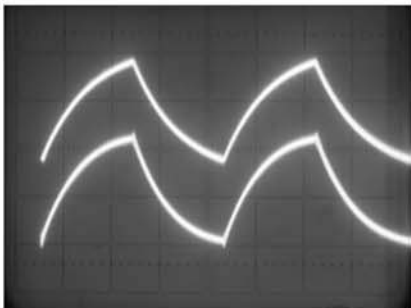


**Рис. 2.** Стенд для исследования магнитных свойств нанокompозитных материалов: 1 – электромагнит 800 КА/м (10 КЭ); 2 – измеритель магнитной индукции Ш 1-8; 3 – источник питания электромагнита RFT 3217; 4 – юстировочное приспособление для нанокompозитных образцов



**Рис. 3.** Стенд для исследования и оценки восприимчивости к магнитным полям композитных материалов

Электромагнитные поля создавались полеобразующей системой (катушкой Гельмгольца). Предельные значения длительности импульса импульсного генератора устанавливались от 0,2 мс до 10,0 мс. Конструктивно технологическое оборудование исключает электрическое соединение нанокompозитных образцов и, одновременно, обеспечивает облучение бесконтактным методом [4]. Оно предусматривает воздействие различными электромагнитными полями последовательно [10].

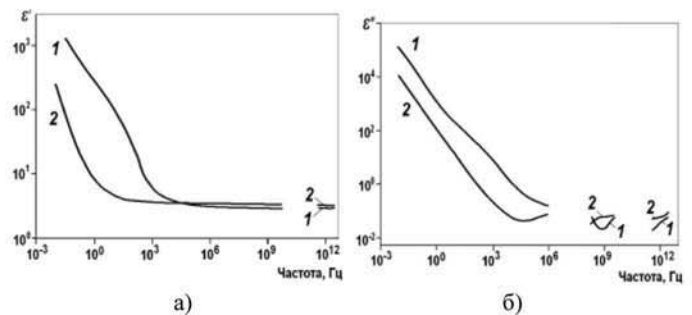


**Рис. 4.** Осциллограммы импульса тока

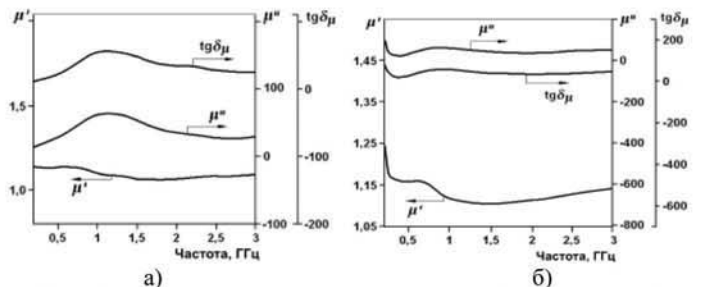
На рисунке 4 приведены осциллограммы импульса тока через электромагнит (верхняя кривая) и индуктивного датчика напряжённости магнитного поля (нижняя кривая). Развёртка по горизонтали 0,2 мс/клетку.

**Экспериментальные диэлектрические и магнитные характеристики нанокompозитов**

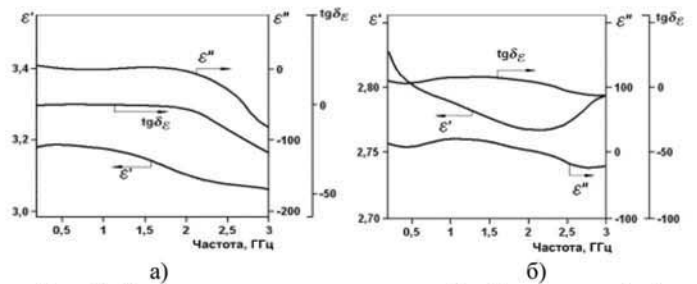
Проведены исследования полученных образцов нанокompозитов в переменном электрическом поле в диапазоне частот от 100 Гц до 3012 МГц. Исследована частотная зависимость действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) компонент диэлектрической проницаемости, а также электрической проводимости опаловых матриц, заполненных кристаллитами  $Ni_3Fe$  и  $Ni_2Fe_3$  [11, 12]. Полученные результаты для образцов опаловых матриц, содержащих в межсферических нанополостях кластеры  $Ni_3Fe$ ;  $Ni_2Fe_3$  представлены на рис. 5-7. Во всем исследуемом диапазоне частот образцы нанокompозиты имеют низкие диэлектрические потери и мало зависят от частоты, кроме некоторого подъема в области низких частот. Диэлектрическая дисперсия частот выражена слабо в микроволновом диапазоне, а все основные изменения, возможно, протекают на более низких частотах [13].



**Рис. 5.** Графики частотных зависимостей действительной (а) и мнимой (б) параметров диэлектрической проницаемости опаловых матриц, межсферические полости которых заполнены кластерами  $Ni_2Fe_3(1)$  и  $Ni_2Fe_3(2)$



**Рис. 6.** Графики частотных зависимостей действительной  $\mu'$  и мнимой  $\mu''$  параметров магнитной восприимчивости, а также тангенса потерь  $tg\delta\mu$  образцов опаловых матриц, межсферические полости которых заполнены кристаллитами  $Ni_2Fe_3$



**Рис. 7.** Графики частотных зависимостей действительной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  параметров диэлектрической проницаемости, а также тангенса потерь  $tg\delta\epsilon$  образцов опаловых матриц, межсферические полости которых заполнены кристаллитами  $Ni_3Fe$ , сформированными при температурах: а) 1200°C (термообработка на воздухе; б) 1000°C (термообработка в  $H_2$ )



Из приведенных на рисунках 6, 7 данных хорошо видны зависимости параметров действительной  $\mu'$  и мнимой  $\mu''$  магнитной восприимчивости и параметров диэлектрической проницаемости.

По результатам исследований были сделаны выводы, что метаматериалы могут определяться как композиты, состоящие из элементов (наноблоков), чьи геометрические размеры (десятки и сотни нанометров) значительно превосходят атомарные. Последнее означает, что для таких материалов в случае  $\mu(\omega)$  невозможно пренебречь вкладом от диэлектрической проницаемости (зависящей от времени), поскольку магнитный момент единицы объема определяется токами электрической поляризации.

### Заключение

1. Для нанокompозитных материалов на основе опаловых матриц в случае  $\mu(\omega)$  невозможно пренебречь вкладом от диэлектрической проницаемости (зависящей от времени), поскольку магнитный момент единицы объема определяется токами электрической поляризации.

2. В опаловых матрицах, в которых нанополости частично заполнены металлами (Fe и Ni), имеет место микроволновая проводимость, так что, при воздействии внешних электромагнитных полей, наблюдается электрический “отклик”, в свою очередь, приводящий к изменению параметров действительной  $\mu'$  и мнимой  $\mu''$  магнитной восприимчивости и параметров диэлектрической проницаемости, а также тангенса потерь  $\operatorname{tg}\delta\mu$  образцов опаловых матриц.

3. Проведенные исследования могут быть использованы при дальнейших исследованиях для разработки управляемой радиоэлектронной аппаратуры.

### Литература

1. *Хлопов Б.В., Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Клецева С.М.* Использование нанокompозитных материалов на основе опаловых матриц в аппаратуре уничтожения информации // *Наноинженерия*. 2014, №9. С. 20-23.

2. *Хлопов Б.В., Чучева Г.В., Митягина А.В.* Фазовые изменения мультиферроидных магнитных материалов, применяемых в системах внешней памяти // *Известия, Саратовского университета, новая серия, серия Физика*. Т. 17. Выпуск 1. С. 21-33.

3. *Хлопов Б.В., Самойлович М.И., Митягин А.Ю.* Использование метаматериалов на основе опаловых матриц в системах стирания информации на магнитных носителях // *Наноинженерия*. 4. (2013). С. 29-34.

4. Патент на изобретение №2549111 от 25.03.2015г. (приоритет от 23.08.2013г). Бюл. №11.

5. *Кравченко И.С., Хлопов Б.В., Фесенко М.В., Кузминых А.С.* // *Перспективные материалы*, ISSN 1028-978X. М., 2008, Спец. Вып. С. 299-302.

6. *Хлопов Б.В., Чучева Г.В., Самойлович М.И.* Исследование восприимчивости к магнитным полям образцов нанокompозитных материалов на основе опаловых матриц для аппаратуры стирания информации // *T-Comm: телекоммуникация и транспорт*. 2014. Т.8. № 10. С. 82-87.

7. *Хлопов Б.В., Самойлович М.И., Митягин А.Ю.* Исследование пространственного мультиплицирования импульсного магнитного поля образцами метаматериалов // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2013. № 1. С. 48-51.

8. *Хлопов Б.В., Самойлович М.И., Бовтун В.* Исследование эффекта мультипликации электромагнитных полей в устройствах бесконтактного стирания информации с электронных носителей с использованием нанокompозитов на основе опаловых матриц // *Нано и микросистемная техника*. 2013. № 7. С. 6-13.

9. *Ринкевич А.Б., Бурханов А.М., Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Клецева С.М., Кузнецов Е.А.* 3D-нанокompозитные металлдиэлектрические материалы на основе опаловых матриц // *Российский химический журнал*. 2012. Т. LVI. № 1-2. С. 26-35.

10. *Ринкевич А.Б., Устинов В.В., Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Клецева С.М., Кузнецов Е.А.* Нанокompозиты на основе опаловых матриц с 3D-структурой, образованной магнитными наночастицами // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2008. № 4. С. 55-63.

11. *Самойлович М.И., Ринкевич А.Б., Бовтун В., Белянин А.Ф., Нужный Д., Кемпа М., Клецева С.М.* СВЧ-характеристики, микроволновая проводимость и диэлектрические свойства нанокompозитов на основе опаловых матриц с заполнением межферрических нанополостей металлами // *Наноинженерия*. 2012. №3. С. 22-30.

12. *Makeeva G.S., Golovanov O.A., Rinkevich A.B., Samoylovich M.I.* Accurate Modeling of Nonreciprocal Microwave Devices Based on Magnetic Opal Nanocomposites // *Proceedings of the 44-th European Microwave Conference*. 6-9 Oct 2014, Rome, Italy: European Microwave Association, pp. 1162-1165.

13. *Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Бовтун В., Чучева Г.В., Хлопов Б.В.* Кристаллизация металлов (Ni, Fe) и соединений на их основе в межферрических нанополостях опаловых матриц // *Наноматериалы и наноструктуры*. 2016. №4. Том 7. С. 24-31.

## ELECTROMAGNETIC FIELD IMPACT ON NANOCOMPOSITE MATERIALS

**Boris V. Khlopov**, JSC TsNIRTI im. akademika A. I. Berga, Moscow, Russia, [hlopovu@yandex.ru](mailto:hlopovu@yandex.ru)

**Yuri S. Bondarev**, JSC TsNIRTI im. akademika A. I. Berga, Moscow, Russia

**Vasily D. Shashurin**, MGTU of N.E. Bauman, Moscow, Russia, [shashurin@bmstu.ru](mailto:shashurin@bmstu.ru)

**Galina V. Chucheva**, Fryazino branch of Institute of Radioengineering and electronics. Academician V. A. Kotelnikov of the Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia, [gvc@ms.ire.rssi.ru](mailto:gvc@ms.ire.rssi.ru)

**Abstract**

Properties of metamaterials samples on the basis of lattice packages of SiO<sub>2</sub> nanospheres (opal matrixes) containing clusters of metals in interspherical cavities (Ni, Fe) and their connections are probed. The valuation method of a susceptibility to magnetic fields of composite materials in case of impact on them by outside electromagnetic fields is developed. The test equipment is developed, the certified benches for an assessment of an electromagnetic susceptibility of tested samples are provided. The analysis of the received experimental characteristics of metamaterials allowed to specify their phase changes from external influences and to research magnetic properties. Researches of materials samples characteristics are conducted. The frequency dependences of magnetic conductivity, the frequency dependence of a magnetic susceptibility of composite materials, and also their dependence on technological conditions of manufacture of prototypes of opal matrixes were researched. Samples on which tests are carried out represent the nanostructured discrete environment, periodic on electromagnetic properties of the elements making it and relate to the three-dimensional lattice packages of microspheres of silicon dioxide with structure of an opal (opal matrixes), with filling of their interspherical nanocavities with clusters of different magnetic and non-magnetic materials (crystallites of metals or magnetic joints). The densest packing of nanospheres forms interspherical cavities that allows to fill them with different substances. The practical significance of similar materials is defined by the fact that they have the new functional properties inaccessible to earlier used. With their application it is possible to control the sizes of nanospheres SiO<sub>2</sub>, composition and a structure of the substances filling interspherical cavities. In opal matrixes in which nanocavities are partially filled with metals (Ni, Fe) microwave conductivity takes place, so that, in case of influence of outside electromagnetic fields, the considerable electrical "response", in turn, resulting, in particular, in effect of replicating for integral magnetic fields. In materials the experimental results of a research of the received samples of nanoaggregates are given in a variation electric field. In the researched range of frequencies samples nanoaggregates have low dielectric losses and depend on frequency, except for some rise in the field of low frequencies a little. The dielectric dispersion of frequencies is expressed poorly in microwave region, and all main changes, proceed on lower frequencies. Experimentally it is confirmed that in the specified range of frequencies the electromagnetic susceptibility of tested samples changes, changing value of strength of an electromagnetic field in field-generating system of a technology equipment. The received experimental results and use at a development stage of the latest technologies and materials become a premise for the decision of tasks in management systems a radio-electronic equipment with improving of their technical characteristics. Appearance on opal matrixes and nanoaggregates on their basis of monitors by phase velocities in optical, a very high frequency – and the TGts-ranges is predicted.

**Keywords:** nanoparticles, metamaterials, nanoaggregate, electromagnetic field, field-generating system.

**References**

1. Khlopov B.V., Samoylovich M.I., Belyanin A.F., Kleshcheva S.M. (2014). Use of nanocomposite materials on the basis of opal matrixes in the equipment of destruction of information. *Nanoengineering*, no. 9, pp. 20-23. (in Russian)
2. Khlopov B.V., Chucheva G.V., Mityagina A.B. Phase changes of the multiferrod magnetic materials used in external memory systems. *Proceedings of the Saratov University. Series Physics*, vol. 17, no. 1, pp. 21-33. (in Russian)
3. Khlopov B.V., Samoylovich M.I., Mityagin A.Yu. (2013). Use of metamaterials on the basis of opal matrixes in systems of deleting of information on magnetic carriers. *Nanoengineering*, no. 4, pp. 29-34. (in Russian)
4. The patent for the invention No. 2549111 from 25.03.2015g. (a priority from 23.08.2013g). Bulletin No. 11. (in Russian)
5. Khlopov B.V., Kravchenko I.S., Fesenko M.V., Kuzminykh A.S. (2008). *Advanced materials*. ISSN 1028-978X. Pp. 299-302. (in Russian)
6. Khlopov B.V., Chucheva G.V., Samoylovich M.I. (2014). Research of a susceptibility to magnetic fields of samples of nanocomposite materials on the basis of opal matrixes for the equipment of deleting of information. *T-Comm*, vol. 8, No. 10, pp. 82-87. (in Russian)
7. Khlopov B.V., Samoylovich M.I., Mityagin A.Yu. (2013). Research of a spatial multiplication of a pulse magnetic field samples of metamaterials. *T-Comm*, no. 1, pp. 48-51. (in Russian)
8. Khlopov B.V., Samoylovich M.I., Bovtun V. (2013). Research of effect of animation of electromagnetic fields in devices of contactless deleting of information from electronic media with use of nanocomposites on the basis of opal matrixes. *Nano and microsystem equipment*, no. 7, pp 6-13. (in Russian)
9. Rinkevich A.B., Burkhanov A.M., Samoylovich M. I., Belyanin A.F., Kleshcheva S.M., Kuznetsov E.A. (2012). 3D-nanocomposite metaldielectric materials on the basis of opal matrixes. *The Russian chemical magazine*, vol. LVI, no. 1-2, pp. 26-35. (in Russian)
10. Rinkevich A.B., Ustinov V.V., Samoylovich M.I., Belyanin A.F., Kleshcheva S.M., Kuznetsov E.A. (2008). Nanocomposites on the basis of opal matrixes with 3D – the structure formed by magnetic nanoparticles. *Technology and designing in the electronic equipment*, no. 4, pp. 55-63. (in Russian)
11. Samoylovich M.I., Rinkevich A.B., Bovtun V., Belyanin A.F., Nuzhny D., Kemp M., Kleshchev S.M. (2012). Microwave characteristics, microwave conductivity and dielectric properties of nanocomposites on the basis of opal matrixes with filling of interspherical nanocavities with metals. *Nanoengineering*, no. 3, pp. 22-30. (in Russian)
12. Makeeva G.S., Golovanov O.A., Rinkevich A.B., Samoylovich M.I. (2014). Accurate Modeling of Nonreciprocal Microwave Devices Based on Magnetic Opal Nanocomposites. *Proceedings of the 44-th European Microwave Conference. 6-9 Oct 2014*. Rome, Italy: European Microwave Association, pp. 1162-1165.
13. Samoylovich M.I., Belyanin A.F., Bovtun V., Chucheva G.V., Khlopov B.V. (2016). Crystallization of metals (Ni, Fe) and connections on their basis in interspherical nanocavities of opal matrices. *Nanomaterials and nanostructures*, no.4, vol. 7, pp. 24-31. (in Russian)

**Information about authors:**

**Boris V. Khlopov**, JSC TsNIRTI im. akademika A. I. Berga, Russian Federation, Moscow, Russia

**Yuri S. Bondarev**, JSC TsNIRTI im. akademika A. I. Berga, Russian Federation, Moscow, Russia

**Vasily D. Shashurin**, MGTU of N.E. Bauman, Moscow, Russia

**Galina V. Chucheva**, Fryazino branch of Institute of Radioengineering and electronics. Academician V. A. Kotelnikov of the Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia