

УДК 539.2

## РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ И РАДИОПРОЗРАЧНЫЕ ОПАЛОВЫЕ МАТРИЦЫ С ЗАПОЛНЕНИЕМ МЕЖСФЕРИЧЕСКИХ НАНОПОЛОСТЕЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Д. ф.-м. н. М. И. Самойлович<sup>1</sup>, Dr. Sc. В. Бовтун<sup>2</sup>, д. т. н. А. Ф. Белянин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский технологический институт «Техномаш», г. Москва, Россия; <sup>2</sup> Институт физики АН ЧР, г. Прага, Чешская республика  
samoylovich@technomash.ru

*Изучены свойства и строение композитов на основе решетчатых упаковок наносфер SiO<sub>2</sub> (опаловых матриц), содержащих в межсферических нанополостях кластеры кристаллических фаз радиопоглощающих и радиопрозрачных материалов (металлов и эвлитина).*

*Ключевые слова: нанокompозиты, метаматериалы, диэлектрические свойства.*

Опаловые матрицы представляют собой решетчатые упаковки близких по диаметру ( $\Delta d < 5\%$ ) наносфер рентгеноаморфного кремнезема (SiO<sub>2</sub>). Целью работы является исследование строения и диэлектрических свойств опаловых матриц, в межсферические полости которых введены радиопоглощающие и радиопрозрачные кристаллические фазы металлов и эвлитина.

Образцы для исследований – опаловые матрицы из наносфер SiO<sub>2</sub> с диаметрами от 200 до 350 нм – получали гидролизом тетраэфира ортокремниевой кислоты (Si(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>) с раствором этанола (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) в присутствии гидроксида аммония (NH<sub>4</sub>OH) [1, 2]. Методами пропитки и термообработки [1–4] межсферические тетраэдрические и октаэдрические полости (размером 45–140 нм) упаковки наносфер SiO<sub>2</sub> были заполнены металлами (Fe; Ni; Ni+Fe; Ni+Fe+Co и др.) и эвлитином (Bi<sub>4</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) (степень заполнения до 50%, размер кристаллитов 12–48 нм). Состав и строение нанокompозитов были изучены методами рентгеновской дифрактометрии (прибор XRD-6000), просвечивающей электронной микроскопии (JEM-200С), спектроскопии комбинационного рассеяния света (LabRam HR800).

Для определения диэлектрических характеристик полученных материалов были изучены частотные спектры реальной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) компонент диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 1 МГц до 2 ТГц с использованием микроволновых и терагерцевого методов. Измерения компонент  $\epsilon$  в диапазоне частот  $1 \cdot 10^6$ – $1,8 \cdot 10^9$  Гц были проведены с применением диэлектрического спектрометра с коаксиальной измерительной ячейкой Novoscontrol BDS 2100 и импедансным анализатором Agilent 4291В. В микроволновой области ( $2 \cdot 10^8$ – $2 \cdot 10^{10}$  Гц) измерения проводили методом коаксиального зонда с открытым концом (Agilent 8507Е), для чего использовали сетевой анализатор Agilent E8364В. Частотные зависимости S-параметров для полученных образцов измеряли с применением рупорных антенн и системы параметрического анализа N5260С (Agilent Technologies) [1–4].

Поскольку в настоящее время не существует материалов, которые сохраняют поглощающие свойства в широких диапазонах частоты (1–20 ТГц) и температуры (–60—+100°С), для произвольных поляризации и углов падения используются не поглощающие материалы, а “фазовращающие”: падающая волна проходит сквозь слой “поглотителя”, доходит до экрана, отражается и снова проходит слой “поглотителя”, на выходе из которого происходит интерференция падающих и отраженных волн. Для радиопоглощающего материала (даже при больших значениях диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и магнитной восприимчивости  $\mu$ ) необходимо применять слой поглотителя, соизмеримый с диаметром антенны. Подбирая толщину и электрические параметры ( $\epsilon$  и  $\mu$ ) слоя “поглотителя”, можно на некоторых частотах добиться взаимного подавления падающей и отраженной волн в результате противофазного сложения. Данное явление имеет узкополосный характер для однородного “поглотителя”. Поэтому для расширения диапазона частот противофазного сложения можно использовать многослойные “поглотители”, каждый слой которых имеет отличные от других толщину и значения  $\epsilon$  и  $\mu$ . Как правило, подобный подход не реализуется из-за ограничений по габаритам и по соображениям конструктивной прочности.

Очевидно, необходима технология изготовления не “фазовращающих”, а “настоящих” поглотителей, которые бы за счет наличия фотонных зон в радиодиапазоне рассеивали мощность падающей в сторону экрана волны при небольшой толщине. Соответственно, исследовались характеристики новых видов материалов радиопоглощающих (рис. 1, а) и радиопрозрачных (рис. 1, б и рис. 2) – нанокompозитов на основе решетчатых упаковок наносфер  $\text{SiO}_2$ , перспективных для элементов антенн.

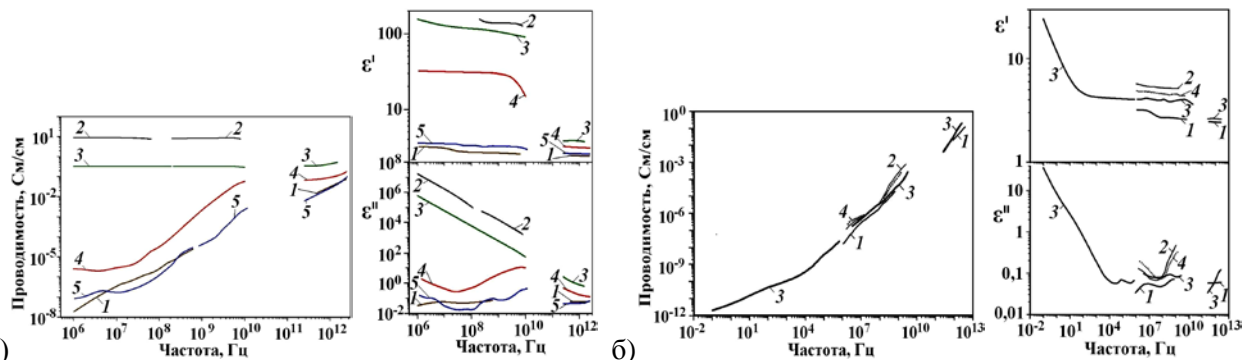


Рис. 1. Частотные зависимости микроволновой проводимости и диэлектрической проницаемости опаловой матрицы без заполнения (1) и опаловых матриц, межсферические нанополости которых заполнены различными кластерами:

а) Ni+Fe (2); Fe (3); Ni+Fe+Co (4); Ni (5); б)  $\text{Bi}_4(\text{SiO}_4)_3$ .

Температура отжига образцов: 2 – 700°C; 3 – 800°C; 4 – 900°C

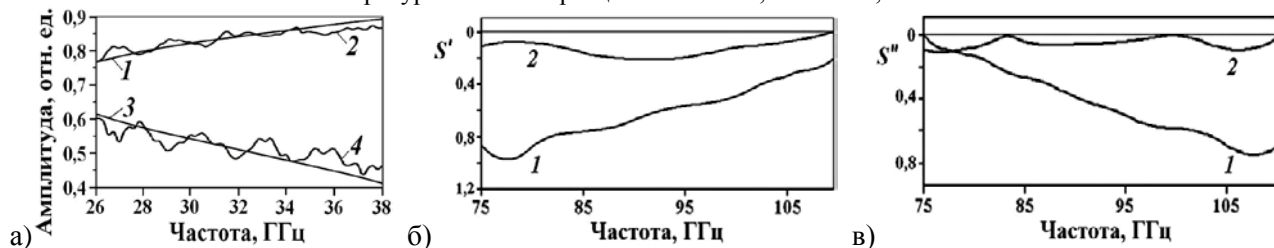


Рис. 2. Частотные зависимости характеристик образцов опаловых матриц, межсферические нанополости которых содержат кластеры  $\text{Bi}_4(\text{SiO}_4)_3$ :

а – амплитуд коэффициентов прохождения (1, 2) и отражения (3, 4) (1, 3 – расчет, 2, 4 – эксперимент);

б, в – реальной  $S'$  и мнимой  $S''$  компонент параметра  $|S|$  в пересчете на прямые потери (1) и на отражение (2)

Предполагается, что подход, связанный с применением разрабатываемых метаматериалов, будет наиболее эффективен при разработке радиопоглощающих и радиопрозрачных покрытий для антенн и других устройств СВЧ-диапазона.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Самойлович М. И., Бовтун В., Ринкевич А. Б. и др. Пространственно-неоднородные материалы на основе решетчатых упаковок наносфер  $\text{SiO}_2$  // Инженерная физика. — 2010. — № 6. — С. 29–38.
2. Самойлович М. И., Бовтун В., Белянин А. Ф. и др. Фазовые превращения и кристаллизация в нанополостях решетчатых упаковок наносфер кремнезема // Наноинженерия. — 2011. — № 2. — С. 32–38.
3. Ринкевич А. Б., Бурханов А. М., Самойлович М. И. и др. 3D-нанокompозитные металлодиэлектрические материалы на основе опаловых матриц // Российский химический журнал. — 2012. — Т. LVI, № 1–2. — С. 26–35.
4. Самойлович М. И., Ринкевич А. Б., Бовтун В. и др. Оптические и диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей эвлитином ( $\text{Bi}_4(\text{SiO}_4)_3$ ) // Нано- и микросистемная техника. — 2013. — № 11. — С. 19–26.

M. I. Samoylovich, V. Bovtun, A. F. Belyanin

#### Microwave transparent and absorbing opal matrices with the filling of crystal materials in interspherical nanopacings

The properties and structure of composites on the basis of lattice packings of nanospheres  $\text{SiO}_2$  (opal matrices) containing in interspherical nanopacings clusters of crystalline phases of microwave transparent and absorbing materials (metals and eulytine).

Keywords: nanocomposites, meta-materials, dielectric properties.