



- методом, их физико-химические свойства и взаимодействие с доксорубицином и плазмой крови // Перспективные материалы. 2010. № 4. С. 49–55.
9. Глушкова А. В., Радлов А. С., Рембовский В. Р. Нанотехнологии и нанотоксикология – взгляд на проблему // Токсикологический вестник. 2007. № 6. С. 4–6.
 10. Морохов И. Д., Петрунин В. И., Трусов Л. И., Петрунин В. Ф. Структура и свойства малых металлических частиц // УФН. 1981. Т. 133, вып. 4. С. 653–692.
 11. Нагаев Э. Л. Малые металлические частицы // УФН. 1992. Т. 162, вып. 9. С. 49–124.
 12. Губин С. П., Кокшаров Ю. А., Хомутов Г. Б., Юрков Г. Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства // Успехи химии. 2004. Т. 74, № 6. С. 539–574.
 13. Martin J. E., Herzing A. A., Yan W., Li X., Koel B. E., Kieley C. J., Zhang W. Determination of the oxide layer thickness in core-shell zerovalent iron nanoparticles. *Langmuir*, 2008. Vol. 24, iss. 8. P. 4329–4334.
 14. Buchelnikov V. D., Louzguine-Luzgin D. V., Xie G., Li S., Yoshikawa N., Sato M., Anzulevich A. P., Bychkov I. V., Inoue A. Heating of metallic powders by microwaves: experiment and theory // *J. App. Phys.* 2008. Vol. 104. P. 113505-1–113505-10.
 15. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 624 с.

УДК 537.635; 537.622

СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ И РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ СТРУКТУРЫ «МАГНИТНОЕ НАНОКОМПЗИТНОЕ ПОКРЫТИЕ – МИКРОПОЛОСКОВАЯ ЛИНИЯ»

Д. В. Воронин, Е. Н. Бегинин

Саратовский государственный университет
E-mail: denis.voronin@gmail.com

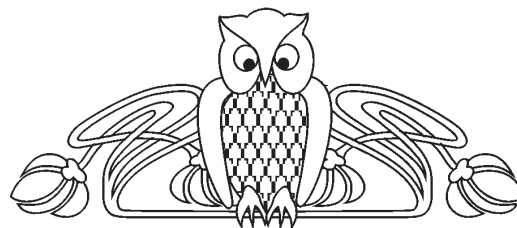
В работе проведены результаты исследования спектров поглощения СВЧ-мощности в структуре «магнитное нанокompозитное покрытие – микрополосковая линия», содержащей наночастицы магнетита Fe_3O_4 . По полученным спектрам поглощения определены характерные для структуры резонансные частоты, соответствующие максимуму поглощения СВЧ-мощности, и рассчитаны материальные параметры нанокompозитного покрытия: эффективная намагниченность, объемная фракция и поле магнитной кристаллографической анизотропии магнитных наночастиц в покрытии. Полученные в работе результаты могут быть использованы при создании магнитных материалов, содержащих наноразмерные (порядка нескольких десятков нанометров) частицы магнетита, для приборов и устройств, работающих в СВЧ-диапазоне радиоволн.

Ключевые слова: наночастицы магнетита, магнитные нанокompозитные покрытия, поглощение СВЧ, микрополосковая линия передачи.

Microwave Absorption Spectra and Resonance Frequencies of a «Magnetic Nanocomposite Coating – Microstrip Line» Structure

D. V. Voronin, E. N. Beginin

This paper aims to look into microwave absorption spectra of «magnetic nanocomposite coating – microstrip line» structure, containing magnetite Fe_3O_4 nanoparticles. The resulted spectra allowed to define the specific resonance frequencies of the structure under investigation and to figure out the material parameters of the nanocomposite coating, that are, an effective magnetization, a volume fraction of



magnetic nanoparticles in the coating as well as a magnetic crystal-line anisotropy filed. The results of this work may be used to design new magnetic materials containing magnetite nanoparticles for novel microwave devices with enhanced properties.

Key words: magnetite nanoparticles, magnetic nanocomposites, microwave absorption, microstrip line.

Магнитные нанокompозитные структуры, представляющие собой дисперсные магнитные наноразмерные частицы, включенные в диэлектрические матрицы, являются перспективными средами для создания новых СВЧ-устройств [1, 2]. Высокочастотными свойствами таких материалов можно управлять в широких пределах, варьируя величину внешнего магнитного поля, геометрические размеры и материальные параметры покрытий (концентрация магнитных частиц, намагниченность, поле анизотропии) [3, 4]. Поэтому важной задачей является определение резонансных частот магнитных возбуждений и материальных параметров нанокompозитных структур в СВЧ-диапазоне радиоволн. В данной работе приведены результаты исследования спектров поглощения СВЧ-мощности в структуре «магнитное нанокompозитное покрытие – микрополосковая СВЧ-линия передачи» (МПЛ). Использование МПЛ дает преимущество по



сравнению с более распространенным методом ферромагнитного резонанса (ФМР) в СВЧ-резонаторе, поскольку позволяет проводить исследования в широком диапазоне частот и магнитных полей.

Магнитное нанокompозитное покрытие было получено на поверхности монокристаллической Si подложки (Silchem; 5×5 мм; [111]; p-тип, легирован бором; $\rho = 20$ мОм/см) методом последовательной адсорбции из раствора [5] молекул полиэлектролита полиэтиленimina PEI (водный раствор с концентрацией 2 мг/мл) и наночастиц магнетита Fe_3O_4 (Sigma-Aldrich, стабилизированных олеиновой кислотой и диспергированных в гептане; концентрация 5.6 мг/мл, $d \approx 30$ нм). Подробно методика получения покрытий описана в [6]. Для формирования нанокompозитного покрытия было проведено

20 циклов адсорбции наночастиц Fe_3O_4 . Подложка с полученным на ней образцом покрытия помещалась на МПЛ, которая располагалась между полюсами электромагнита так, чтобы внешнее поле H_0 было ориентировано касательно к плоскости покрытия и параллельно МПЛ или нормально относительно плоскости подложки (рис. 1, а). В качестве источника СВЧ-сигнала использовался СВЧ-анализатор цепей Agilent PNA E8362C с диапазоном рабочих частот 10 МГц – 20 ГГц. Измеряемой величиной является частотная зависимость $S_{21}(\omega)$ компоненты матрицы рассеяния структуры, устанавливающая связь между мощностью входного и выходного СВЧ-сигнала. Спектр поглощения определялся по амплитудно-частотной характеристике $|S_{21}(\omega)|$ (АЧХ) структуры, перестраиваемой по частотному диапазону внешним магнитным полем H_0 .

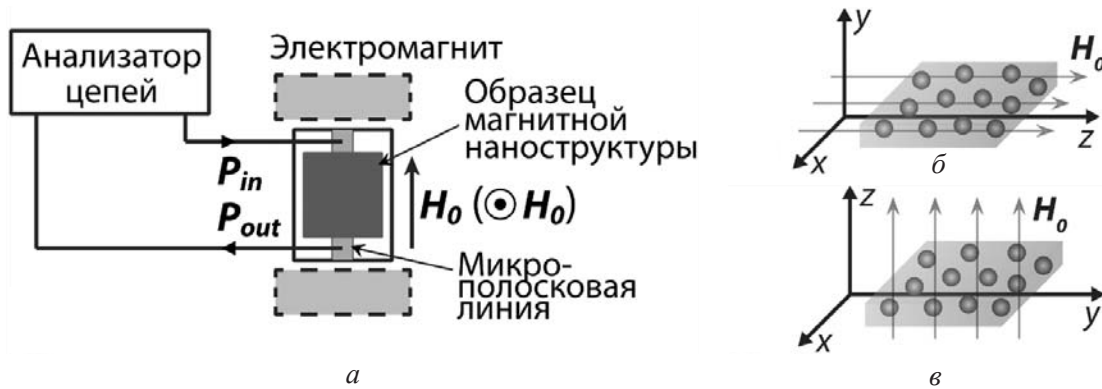


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и расположение образца при исследовании ферромагнитного резонанса в структуре «магнитное нанокompозитное покрытие – микрополосковая СВЧ-линия передачи» (а) и направление осей прямоугольной декартовой системы координат при касательном (б) и нормальном намагничивании нанокompозитного покрытия (в)

Динамика прецессии намагниченности M в безграничной однородной ферромагнитной среде описывается уравнением Ландау – Лифшица с диссипативным членом в форме Гильберта (уравнение Ландау – Лифшица – Гильберта) [7]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\gamma M \times H_{eff} + \frac{\alpha}{M} \cdot M \times \frac{\partial M}{\partial t}, \quad (1)$$

где H_{eff} – эффективное внутренне магнитное поле, представляющее собой сумму внешнего постоянного магнитного поля H_0 (для безграничного ферромагнетика внешнее постоянное поле совпадает с внутренним), переменного магнитного поля $h(t)$ и полей анизотропии магнитного кристалла; α – безразмерный параметр диссипации.

Для однородных ферромагнетиков, имеющих форму эллипсоида вращения и намагниченных до насыщения вдоль одной из осей, резонансная частота ω_0 прецессии намагниченности M определяется формулой Киттеля [7]:

$$\omega_0 = \gamma \sqrt{[H_0 + (N_x - N_z) M_s] \times [H_0 + (N_y - N_z) M_s]}, \quad (2)$$

где γ – гиромагнитное отношение, M_s – намагниченность насыщения, а N_x , N_y и N_z – компоненты тензора размагничивающих факторов \tilde{N} , задающего связь внешнего магнитного поля H_0 с внутренним H_{i0} в виде

$$H_{i0} = H_0 - \tilde{N}M.$$

Для нанокompозитных покрытий, состоящих из дискретных магнитных частиц, размагничивающие факторы определяются макроскопиче-



скими геометрическими параметрами покрытия в целом, геометрическими параметрами и объемной фракцией наночастиц, входящих в покрытие [8]. Для дискретных ферромагнетиков вводятся эффективные размагничивающие факторы [8]:

$$N = N_{NP}(1 - \varphi_{NP}) + N_G \varphi_{NP}, \quad (3)$$

где N_{NP} – размагничивающий фактор наночастицы, N_G – общий размагничивающий фактор, определяемый формой образца покрытия, φ_{NP} – объемная фракция наночастиц в покрытии.

В случае нанокompозитного покрытия в виде тонкого слоя, намагниченного касательно (рис. 1, б), входящие в выражение (3) величины N_{NP} и N_G принимают следующие значения: вдоль оси x и оси z – $N_{NP} = \frac{4}{3}\pi$ (размагничивающий фактор сферической наночастицы) и $N_G = 0$ (размагничивающий фактор тонкой пластины, намагниченной касательно, в плоскости приложения \mathbf{H}_0); вдоль оси y – $N_{NP} = \frac{4}{3}\pi$ и $N_G = 4\pi$ (размагничивающий фактор тонкой пластины, намагниченной касательно, в плоскости, перпендикулярной плоскости приложения \mathbf{H}_0). Тогда соответствующие компоненты тензора размагничивающих факторов \vec{N} согласно (3) можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}), \\ N_y &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}) + 4\pi\varphi_{NP}, \\ N_z &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}). \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя полученные значения компонентов \vec{N} в формулу Киттеля (2), получаем выражение для резонансной частоты ФМР исследуемых нанокompозитных покрытий, намагниченных касательно:

$$\omega_0 = \gamma \sqrt{H_{рез}(H_{рез} + 4\pi M_s \varphi_{NP})}. \quad (5)$$

В случае, когда внешнее магнитное поле \mathbf{H}_0 направлено нормально к плоскости исследуемого образца (рис. 1, в), компоненты тензора размагничивающих факторов \vec{N} можно определить аналогично (4) согласно выражению (3) как

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}), \\ N_y &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}), \\ N_z &= \frac{4}{3}\pi(1 - \varphi_{NP}) + 4\pi\varphi_{NP}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя полученные компоненты \vec{N} (6) в формулу Киттеля (2), получаем выражение для резонансной частоты ФМР исследуемых нанокompозитных покрытий, намагниченных нормально:

$$\omega_0 = \gamma (H_{рез} - 4\pi M_s \varphi_{NP}). \quad (7)$$

Выражения (5) и (7) устанавливают связь между резонансной частотой ω_0 , величиной резонансного магнитного поля $H_{рез}$ и материальными параметрами покрытий (M_s и φ_{NP}). Величина поля $H_{рез}$ может отличаться от величины внешнего магнитного поля, в частности, из-за влияния полей магнитной кристаллографической анизотропии наночастиц. Магнетит характеризуется кубической магнитной кристаллографической анизотропией [9, 10]. В общем случае для неструктурированных композитных покрытий, каждая наночастица имеет различную ориентацию кристаллической решетки относительно направления внешнего магнитного поля и, как следствие, различную величину поля кристаллографической анизотропии. Однако, как было показано в [7, 11], различную ориентацию частиц можно учесть путем введения поправки к резонансному внешнему полю H_0 :

$$(\delta H)_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_1}{M_s}, \quad (8)$$

где K_1 – константа кристаллографической анизотропии (для магнетита $K_1 = -1.3 \cdot 10^5$ эрг/см³ [9, 12]). Учет анизотропии приводит к смещению резонансных частот в область более низких магнитных полей на величину (8), т.е. в выражениях (5) и (7) резонансное магнитное поле определяется величиной $H_{рез} = H_0 + (\delta H)_a$, а сами выражения окончательно принимают вид:

$$\omega_0 = \gamma \sqrt{[H_0 + (\delta H)_a][H_0 + (\delta H)_a + 4\pi M_s \varphi_{NP}]}, \quad (9)$$

$$\omega_0 = \gamma (H_0 + (\delta H)_a - 4\pi M_s \varphi_{NP}). \quad (10)$$

Входящая в выражения (9) и (10) величина $M_s \varphi_{NP} = M_{eff}$ представляет собой эффективную намагниченность нанокompозитного покрытия, определяемую объемной фракцией магнитных наночастиц в покрытии φ_{NP} .

На рис. 2 приведен характерный вид АЧХ структуры «нанокompозитное покрытие – МПЛ» при касательном (рис. 2, а) и нормальном (рис. 2, б) намагничивании, полученном при различных значениях внешнего поля H_0 . Из приведенных данных видно, что провал на АЧХ, соответствующий поглощению структурой



СВЧ-мощности, перестраивается в зависимости от величины внешнего магнитного поля. Полученные спектры позволяют оценить величину поглощения нанокompозитного покрытия на единицу длины микрополосковой линии исходя из геометрических размеров исследуемых образцов. При касательном намагничивании величина поглощения составляет 2 дБ/см, в то

время как при нормальном намагничивании – порядка 1 дБ/см. Такой характер поглощения нанокompозитным покрытием СВЧ-мощности обусловлен тем, что при касательном намагничивании компоненты переменного магнитного СВЧ-поля более эффективно связываются с компонентами переменной намагниченности покрытия.

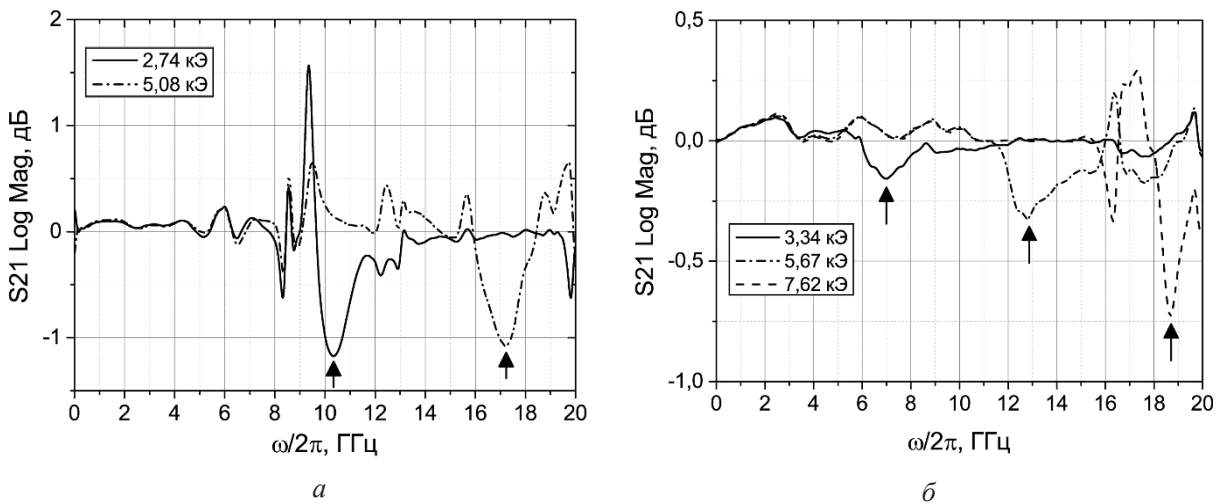


Рис. 2. Характерный вид АЧХ структуры «нанокompозитное покрытие – МПЛ» при касательном (параллельно МПЛ) (а) и нормальном (б) намагничивании образца, полученном при различных величинах внешнего магнитного поля H_0 . Стрелками указано положение максимума спектра поглощения при данной величине поля H_0

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости положения частотного максимума спектра поглощения от внешнего магнитного поля H_0 для исследуемого образца нанокompозитного покрытия, которые с хорошей точностью аппроксимируются теоретическими кривыми, полученными согласно выражениям для резонансной частоты ФМР (9) и (10) с учетом эффективных размагничивающих факторов композитной среды (4) и (6).

Подставляя в выражения (9) и (10) полученные экспериментально значения ω_0 и H_0 и решая полученную систему из двух уравнений, можно оценить эффективную намагниченность композитного покрытия M_{eff} и вклад $(\delta H)_a$, который дает внутреннее поле магнитной кристаллографической анизотропии. Расчет проводился только с учетом результатов, полученных при величинах $H_0 > 3$ кЭ в случае касательного намагничивания и $H_0 > 5$ кЭ в случае нормального намагничивания, так как при данных величинах магнитных полей образец намагничен до насыщения.

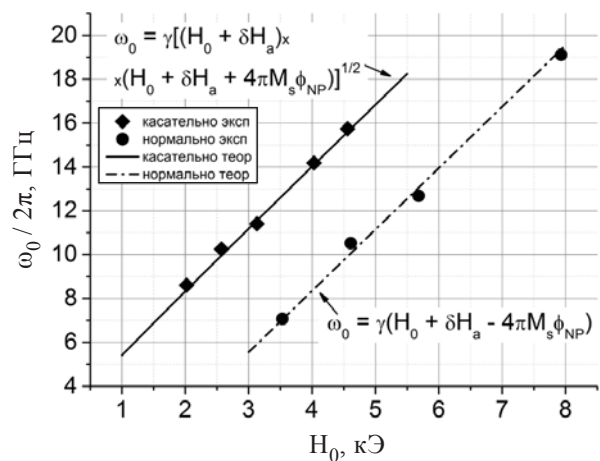


Рис. 3. Зависимость положения частотного максимума ω_0 спектра поглощения структуры «нанокompозитное покрытие – МПЛ» от внешнего магнитного поля H_0 . Символы (◆) и (●) обозначают экспериментальные точки, полученные при касательном и нормальном намагничивании образца соответственно. Линии (—) и (— · —) показывают ход соответствующих теоретических зависимостей $\omega_0(H_0)$

Для исследуемого нанокompозитного покрытия рассчитанные значения эффективной



намагниченности и добавки, учитывающей влияние поля кристаллографической анизотропии, составили $M_{eff} \approx 100$ Гс и $(\delta H)_a \approx 0,32$ кЭ соответственно. Экспериментально полученное значение добавки к внешнему магнитному полю превышает величину $(\delta H)_a \approx 0,135$ кЭ, определенную согласно выражению (8) с использованием константы кубической анизотропии для объемного магнетита $K_1 = -1.3 \cdot 10^5$ эрг/см³. Данный факт объясняется возрастанием вклада поверхностных типов магнитной анизотропии в общую энергию наноразмерных частиц в магнитном поле. Известно, что магнитные поля, обусловленные поверхностными типами анизотропии, могут иметь величину, сравнимую с полем объемной кубической анизотропии [13–15], что оказывает существенное влияние на вид спектра поглощения СВЧ-мощности (сдвигает максимум в сторону более высоких частот).

По полученному значению эффективной намагниченности была рассчитана объемная фракция наночастиц Fe₃O₄ в нанокompозитном покрытии $\varphi_{NP} \approx 0.25$. Полученные значения φ_{NP} соответствуют величине объемной фракции наночастиц, рассчитанной для аналогичных нанокompозитных покрытий на основе наночастиц Fe₃O₄, сформированных методом последовательной адсорбции из раствора [16].

В работе показано, что зависимость положения частотного максимума спектра поглощения СВЧ-мощности структуры «нанокompозитное покрытие – МПЛ» от внешнего магнитного поля в широком диапазоне частот (7–19 ГГц) и магнитных полей (2–8 кЭ) с хорошей точностью определяется формулой Киттеля с учетом эффективных размагничивающих факторов композитной среды. По полученным спектрам поглощения определены материальные параметры нанокompозитных покрытий: эффективная намагниченность $M_{eff} \approx 100$ Гс, объемная фракция магнитных наночастиц в покрытии $\varphi_{NP} \approx 0.25$ и вклад поля магнитной кристаллографической анизотропии $(\delta H)_a = 0.32$ кЭ. Полученное значение добавки, обуславливающей влияние поля магнитной анизотропии используемых в работе наночастиц размером 30 нм, больше, чем для объемного магнетита, что обусловлено вкладом поверхностных типов анизотропии. По АЧХ структуры «нанокompозитное покрытие – МПЛ» определена величина поглощения композитного покрытия на единицу длины МПЛ, которая со-

ставляла 2 дБ/см при касательном намагничивании и 1 дБ/см при нормальном. Полученные в работе результаты могут быть использованы при создании магнитных материалов, содержащих наноразмерные (порядка нескольких десятков нанометров) частицы магнетита, для приборов и устройств, работающих в СВЧ-диапазоне радиоволн.

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН» Ю. В. Хивинцеву за предоставленный макет микрополосковой СВЧ-линии передачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации в рамках гранта для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования, научных учреждениях государственных академий наук и государственных научных центрах Российской Федерации (грант № 14.Z50.31.0004).

Список литературы

1. Valenzuela R., Alvarez G., Mata-Zamora M. E. Microwave Properties of Ferromagnetic Nanostructures // J. of Nanosci. Nanotechnol. 2008. Vol. 8, № 6. P. 2827–2835.
2. Mathúna C. Ó., Ningning W., Kulkarni S., Roy S. Review of Integrated Magnetics for Power Supply on Chip (PwrSoC) // Power Electronics, IEEE Trans. on. 2012. Vol. 27, № 11. P. 4799–4816.
3. Ramprasad R., Zurcher P., Petras M., Miller M., Renaud P. Magnetic properties of metallic ferromagnetic nanoparticle composites // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 96, № 1. P. 519–529.
4. Apesteguy J. C., Damiani A., Digiovanni D., Jacobo S. E. Microwave absorption behavior of a polyaniline magnetic composite in the X-band // Physica B : Condensed Matter. 2012. Vol. 407, № 16. P. 3168–3171.
5. Decher G. Fuzzy Nanoassemblies : Toward Layered Polymeric Multicomposites // Science. 1997. Vol. 277, № 5330. P. 1232–1237.
6. Voronin D. V., Borisova D., Belova V., Gorin D. A., Shchukin D. G. Effect of Surface Functionalization of Metal Wire on Electrophysical Properties of Inductive Elements // Langmuir. 2012. Vol. 28, № 33. P. 12275–12281.
7. Гуревич А. Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М. : Наука, 1973. 592 с.



8. Skomski R., Hadjipanayis G. C., Sellmyer D. J. Effective Demagnetizing Factors of Complicated Particle Mixtures // IEEE Trans. Magn. 2007. Vol. 43, № 6. P. 2956–2958.
9. Sakuma H., Sato S., Gomimoto R., Hiyama S., Ishii K. Growth of magnetite epitaxial thin films by gas flow sputtering and characterization by FMR // IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. 2007. Vol. 2, № 4. P. 431–435.
10. Charilaou M., Winklhofer M., Gehring A. U. Simulation of ferromagnetic resonance spectra of linear chains of magnetite nanocrystals // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109, № 9. P. 093903-6.
11. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
12. Guskos N., Anagnostakis E. A., Likodimos V., Bodziony T., Typek J., Maryniak M., Narkiewicz U., Kucharewicz I., Waplak S. Ferromagnetic resonance and AC conductivity of a polymer composite of Fe₃O₄ and Fe₃C nanoparticles dispersed in a graphite matrix // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97, № 2. P. 024304-6.
13. Найден Е. П., Итин В. И., Магаева А. А., Терехова О. Г. Влияние старения на фазовый состав, структуру и магнитные свойства наноразмерных порошков оксидных ферритмагнетиков // ФТТ. 2009. Vol. 51, № 8. С. 1576–1579.
14. Shilov V. P., Bacri J.-C., Gazeau F., Gendron F., Perzynski R., Raikher Y. L. Ferromagnetic resonance in ferrite nanoparticles with uniaxial surface anisotropy // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 85, № 9. P. 6642–6647.
15. Shilov V. P., Raikher Y. L., Bacri J. C., Gazeau F., Perzynski R. Effect of unidirectional anisotropy on the ferromagnetic resonance in ferrite nanoparticles // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60, № 17. P. 11902–11905.
16. Grigoriev D., Gorin D., Sukhorukov G. B., Yashchenok A., Maltseva E., Möhwald H. Polyelectrolyte/magnetite Nanoparticle Multilayers: Preparation and Structure Characterization // Langmuir. 2007. Vol. 23, № 24. P. 12388–12396.

УДК 544.7

ИЗМЕНЕНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В ПРОЦЕССЕ СИЛАНИЗАЦИИ

В. В. Гофтман, А. М. Вострикова, И. Ю. Горячева

Саратовский государственный университет
E-mail: goftman@bk.ru

Квантовые точки (КТ) – наночастицы полупроводников – обладают уникальными оптическими свойствами, которые позволяют их применять в самых разнообразных областях науки и техники. В том числе для биоприменения необходимо, чтобы КТ были устойчивы в водных средах. Один из подходов у гидрофиллизации – замена исходных лигандов на молекулы органосиланов – рассмотрен в данной статье. Изучено влияние скорости замены лигандов на флуоресцентные свойства КТ.

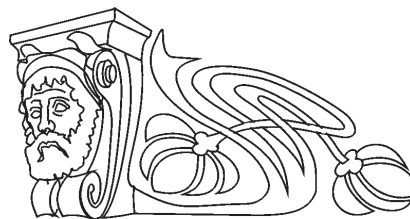
Ключевые слова: квантовые точки, замена лигандов, органосиланы, силанизация.

Fluorescent Properties of Quantum Dots During Silanization Process

V. V. Gofman, A. M. Vostrikova, I. Yu. Goryachva

Quantum dots (QDs) are fluorescent semiconductor nanoparticles with unique optical properties. For bioapplication QDs have to be water-soluble. Here we describe one of common hydrophilization approaches – ligand exchange on silica precursors molecules and investigate fluorescent properties during this process.

Key words: quantum dots, ligand exchange, organosilanes, silanization.



Квантовые точки (КТ) – полупроводниковые нанокристаллы, обладающие уникальными оптическими свойствами, которые позволяют использовать их в различных областях промышленности. Например, уже существуют дисплеи (QD LED), работающие на квантовых точках, а также лазеры, солнечные батареи и светодиодные лампы, в которых уникальность свойств КТ находит свое применение.

Классическим методом получения качественных флуоресцентных КТ с узким распределением по размерам является высокотемпературный коллоидный синтез в высококипящем органическом растворителе в инертной атмосфере. Полученные таким методом частицы гидрофобны, и в таком виде их можно использовать непосредственно в вышеуказанных областях.

Одной из наиболее развивающихся областей применения нанотехнологий в целом является диагностика всевозможных заболеваний, а также контроль и доставка лекарственных средств.