

# СВЧ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В НАНОЧАСТИЦАХ $\text{NiFe}_2\text{O}_4$

Кравчук О. А., Вакула А. С.

Научный руководитель – д.ф.-м.н. проф. Тарапов С. И.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
(61166, Харьков, пр. Науки, 14, каф МЭПУ, тел.(057)702-14-84)

e-mail. flouer.filia@gmail.com

The comparison of high-frequency properties of  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles synthesized by different methods is performed. It is shown, that the heat treatment in argon at  $500^\circ\text{C}$  leads to increasing the value of the total magnetic anisotropy field.

Среди наиболее перспективных методов лечения онкологических заболеваний, разрабатываемых сегодня, известен такой щадящий метод как адресная доставка медицинских препаратов [1]. Этот метод позволяет доставлять препарат к тканям с раковыми клетками за счет биосовместимых магнитных наночастиц (в частности Fe-комплексов, например  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ) с высоким значением намагниченности насыщения  $M_s$  и малым значением эффективного поля анизотропии  $H_{eff}^a$ . Отметим, что  $M_s$  сильно зависит от метода синтеза [2,3].

Поэтому, цель данной работы – исследование влияния методов синтеза на магнитные свойства наночастиц  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ,

В работе исследованы наночастицы  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ , изготовленные двумя методами. Образец №1: осаждение из диэтиленгликоля при  $200^\circ\text{C}$  с диаметром  $\sim 5$  нм. Образец №2: осаждение из диэтиленгликоля при  $200^\circ\text{C}$  с термообработкой в аргоне при  $500^\circ\text{C}$  с диаметром  $\sim 25$  нм.

Для изучения магнитных свойств частиц использован метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Для получения спектров ЭПР/ФМР использовали VNA-спектрометр и СВЧ-модуль [4] в диапазоне частот 8 - 12 ГГц при температуре  $T=300\text{K}$  [4]. В результате эксперимента были получены: набор ФМР-пиков – рис. 1а (образец №1) и зависимость  $f_{res} = f_{res}(H_0)$  – рис. 1б (образец №1 и №2).

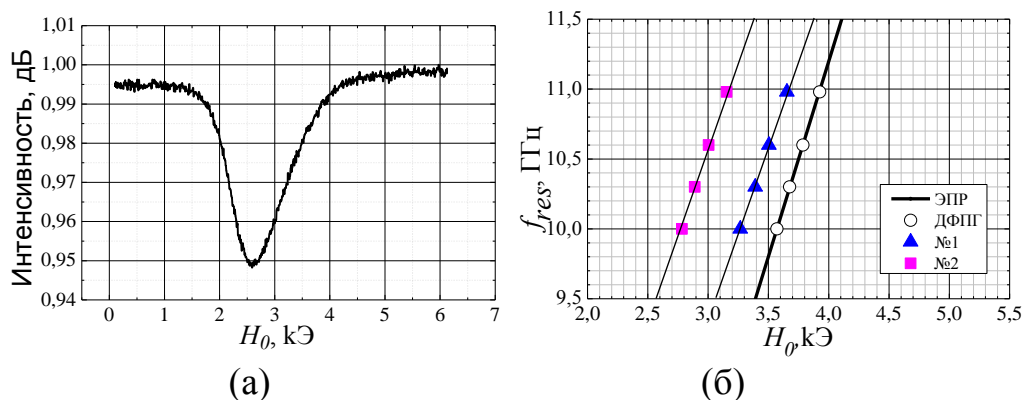


Рис.1- Спектр ФМР (а) и зависимость  $f_{res} = f_{res}(H_0)$  (б).

На рис. 1а представлена типичный ФМР-пик исследуемых наночастиц  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  для образца №1 при  $f_{\text{res}}=10,16$  ГГц и  $T=300$  К.

На рис. 1б представлена зависимость резонансной частоты ФМР от внешнего магнитного поля  $f_{\text{res}} = f_{\text{res}}(H_0)$  для образцов №1 и №2. Как видно из рис 1б, значение  $f_{\text{res}}$  для образцов №1 и №2 отличаются. Это значит, что используя известные алгоритмы [4] можно оценить эффективное поле магнитной анизотропии  $H_{\text{eff}}^a$  образца №1  $H_{\text{eff}}^a \approx 0,34$  кЭ и образца №2 -  $H_{\text{eff}}^a \approx 0,84$  кЭ. Наблюдаемое различие в значениях  $H_{\text{eff}}^a$  возникает, наиболее вероятно, из-за разного размера наночастиц, который задаётся методом синтеза [2-4].

Для нашего случая решение уравнения движения имеет вид:

$$f_{\text{res}} = \gamma \sqrt{(H_0 + \sum H_a)(H_0 + 4\pi M_s + \sum H_a)}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  - гиромагнитное соотношение;  $\sum H_a$  - сумма всех полей анизотропии. Связь между  $H_{\text{eff}}^a$  и  $H_a$  выражается в виде:  $H_{\text{eff}}^a = 4\pi M_s + H_a$ .

Из уравнения (1) видно, что причиной изменения проанализированных зависимостей  $f_{\text{res}} = f_{\text{res}}(H_0)$  могут быть разные значения как величины  $M_s$  в образце, так и величины  $\sum H_a$ .

В результате проведённых исследований показано, метод синтеза наночастиц  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  одного состава влияет на его магнитные свойства: а именно термообработка в аргоне при  $500^\circ\text{C}$  увеличивает значение суммарного поля магнитной анизотропии.

*Авторы работы выражают благодарность д.х.н. Белоусу А.Г за предоставленные образцы для исследований.*

### **Литература**

1. A.S. Narang, R.I. Mahato Targeted delivery of small and macromolecular drugs //Taylor & Francis Groupe, USA, 2010, 614 p., ISBN-13:978-1-4200-8773-4.
2. Е.П. Найден, В.А. Журавлев, М.В. Политов Магнитные свойства и параметры структуры наноразмерных порошков оксидных ферромагнетиков, полученных методом механохимического синтеза из солевых систем, Вестник Томского государственного университета, –№ 278. – 2003. –70-72 с.
3. С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю. Юрков Магнитные наночастицы: методы получения, строения и свойства // Успехи химии 74(6). – 2005.- С.539-574с.
4. Вакула А. С., Недух С. В., Тарапов С. И., Полевой С. Ю. Комплекс для исследования наноразмерных магнетиков Методом сверхвысокочастотного электронного Парамагнитного резонанса //Радиотехника. №176. – 2014. С.187-190. ISSN 0485-8972