

УДК 537.86:538.95

## ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНКАХ МЕТАЛЛ–ДИЭЛЕКТРИК И МЕТАЛЛ–УГЛЕРОД

© 2020 г. Л. Н. Котов<sup>1</sup>, М. П. Ласёк<sup>1</sup>, \* В. К. Турков<sup>1</sup>, Д. М. Холопов<sup>1</sup>,  
В. С. Власов<sup>1</sup>, Ю. Е. Калинин<sup>2</sup>, А. В. Ситников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина”, Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Воронежский государственный технический университет”, Воронеж, Россия

\*E-mail: mplasek@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.04.2020 г.

После доработки 29.04.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Приведены результаты исследований магнитно-резонансных свойств композитных пленок составов металл–диэлектрик (CoFeV + SiO<sub>2</sub>) и металл–углерод (CoFeV + C). Проанализировано влияние концентраций магнитной металлической, диэлектрической и углеродной фаз композитных пленок на характеристики ферромагнитного резонанса.

DOI: 10.31857/S0367676520090215

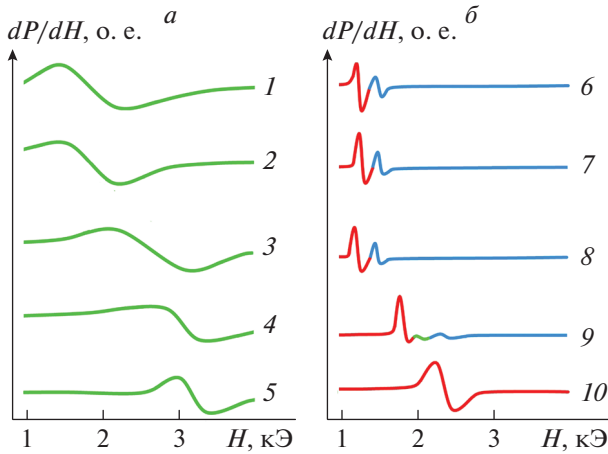
Исследования магнитных нанокompозитных материалов ведутся уже несколько десятилетий [1–4], но до сих пор многие их свойства еще недостаточно изучены. Это обстоятельство связано со сложной структурой таких материалов и большим разнообразием их неоднородных структур, в зависимости от состава [5–7]. Наноструктурированные композитные пленки также обладают такими необычными свойствами, как гигантское магнетосопротивление, аномальный эффект Холла и др. [3–9]. Особое место занимает углерод в качестве одной из фаз пленок, который может значительно изменять как проводящие, так и релаксационные свойства композитов. Это обстоятельство хотя и усложняет, но в тоже время и обогащает исследование СВЧ магнитных характеристик пленок.

Работа посвящена выявлению особенностей магнитных свойств композитных пленок (металл–диэлектрик) с составами:  $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}V_{0.2})_x + (SiO_2)_{(1-x)/3}\}$ ,  $0.22 < x < 0.62$ ; и (металл–углерод)  $\{(Co_{0.2}Fe_{0.2}V_{0.6})_x + (C)_{(1-x)}\}$ ,  $0.28 < x < 0.57$ . Проводится сравнение СВЧ магнитных свойств пленок и выяснение влияния углерода как дополнительной фазы пленок на эти свойства.

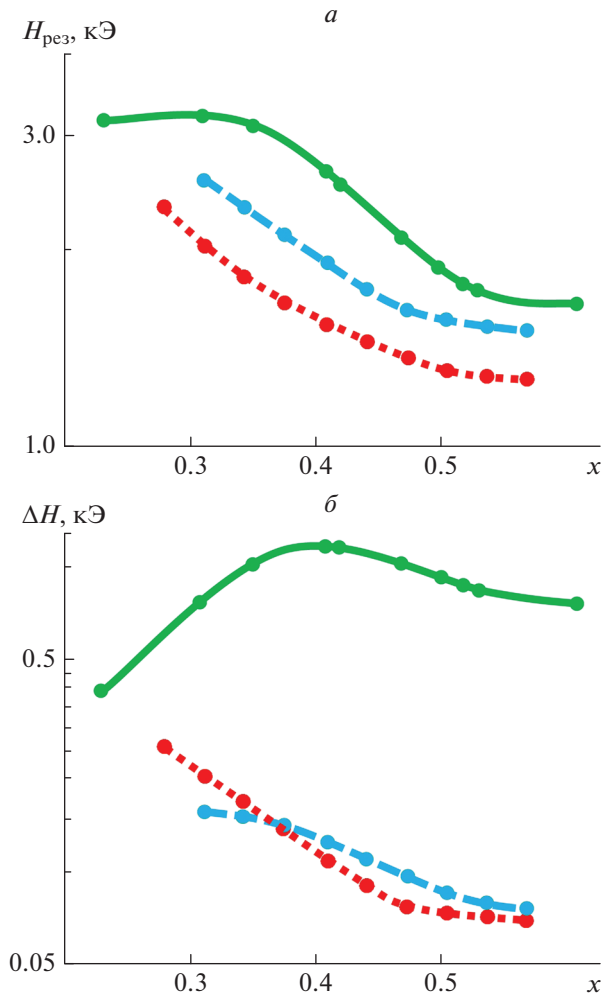
Нанпыление пленок осуществлялось на стеклянные подложки методом ионной бомбардировки мишеней металлических сплавов Co<sub>41</sub>Fe<sub>39</sub>V<sub>20</sub> и навесок из диэлектрика SiO<sub>2</sub> для металл–диэлектрических пленок, и из пластин углерода для металл–углеродных пленок. Толщина и состав пленок

определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3. Толщины композитных пленок составляли: металл–диэлектрик – 0.20–0.40 мкм и металл–углерод – 0.05–0.20 мкм. Характеристики (полуширина линии и резонансные поля) ферромагнитного резонанса (ФМР) пленок определялись с помощью радиоспектрометра РЭ-1306 на частоте поля  $f = 9.36$  ГГц при комнатной температуре. Внешнее магнитное поле было направлено касательно плоскости пленки. Переменное магнитное поле было направлено параллельно плоскости пленки и перпендикулярно постоянному полю.

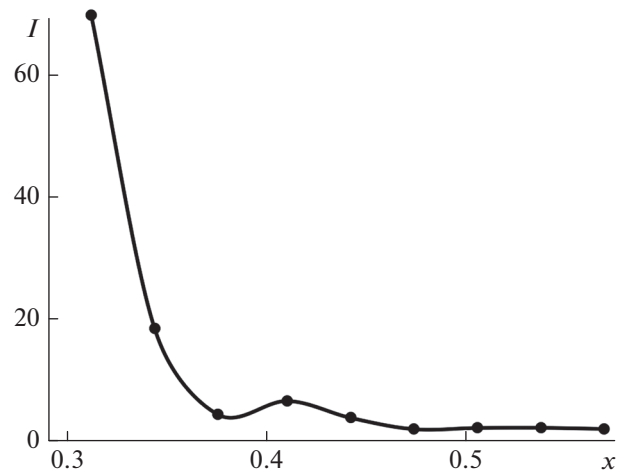
На рис. 1 показаны спектры производной поглощаемой мощности  $P$  композитных пленок двух серий. Как известно, спектры производных  $dP/dH$  одного пика поглощения (линии ФМР гауссовой формы) состоят из максимума и минимума. Для пленок металл–диэлектрик  $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}V_{0.2})_x + (SiO_2)_{(1-x)/3}\}$  наблюдается один пик поглощения сигнала в области ФМР. Для пленок металл–углерод  $\{(Co_{0.2}Fe_{0.2}V_{0.6})_x + (C)_{(1-x)}\}$  наблюдаются два пика поглощения сигнала в области ФМР при средних концентрациях металла ( $0.34 < x < 0.54$ ). Такое поведение сигнала ФМР для пленок с углеродом может быть связано с наличием более одной магнитной фазы разной намагниченности насыщения из-за разных составов, например, CoFe, CoFeV, CoFeC. Значительное уменьшение ширины линии ФМР пленок с углеродом также может быть обусловлено формированием более круп-



**Рис. 1.** Спектры производной поглощаемой мощности  $P$  композитных пленок двух серий:  $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x + (SiO_2)_{(1-x)/3}\}$  (а) и  $\{(Fe_{0.2}Co_{0.2}B_{0.6})_x + (C)_{(1-x)}\}$  (б), где  $x$  равно: 1 – 0.53, 2 – 0.50, 3 – 0.42, 4 – 0.35, 5 – 0.23, 6 – 0.54, 7 – 0.47, 8 – 0.41, 9 – 0.34, 10 – 0.28.



**Рис. 2.** Зависимости резонансного поля  $H_{рез}$  (а) и ширины линии ФМР  $\Delta H$  (б) от  $x$ : сплошная линия –  $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x + (SiO_2)_{(1-x)/3}\}$ ; пунктир и точки – первый и второй пик поглощения сигнала ФМР пленок  $\{(Fe_{0.2}Co_{0.2}B_{0.6})_x + (C)_{(1-x)}\}$ .



**Рис. 3.** Зависимость отношения интенсивностей  $I$  двух мод поглощения от  $x$  для пленок  $\{(Fe_{0.2}Co_{0.2}B_{0.6})_x + (C)_{(1-x)}\}$ .

ных магнитных областей по сравнению с металл-диэлектрическими пленками.

На рис. 2а показаны зависимости резонансных полей  $H_{рез}$  от  $x$  для пленок с диэлектриком и для двух сигналов ФМР пленок с углеродом. Для композитных пленок с диэлектриком наблюдается максимальное значение резонансного поля. Для пленок с углеродом для двух зависимостей  $H_{рез}(x)$ , резонансное поле монотонно убывает с ростом  $x$ , что соответствует увеличению его однородности внутри каждой магнитной области и дальнейшему увеличению их размеров.

На рис. 2б показаны зависимости ширины линии ФМР  $\Delta H$  от  $x$  для композитных пленок с диэлектриком и с углеродом. Для металл-диэлектрических пленок магнитный момент наногранул (при малой концентрации металлического сплава  $x < 0.4$ ) увеличивается с ростом  $x$  из-за увеличения их объемов, а расстояние между гранулами уменьшается, что приводит к начальному росту и максимуму на зависимости  $\Delta H(x)$ . При больших  $x$  ( $x > 0.5$  для металл-диэлектрических пленок и  $x > 0.4$  для металл-углеродных пленок)  $H_{рез}$  и  $\Delta H$  монотонно убывают с ростом  $x$ , что соответствует увеличению однородности поля внутри каждой гранулы и возникновению отдельных областей с близко расположенными гранулами и их слиянию. Малые величины  $\Delta H$  и  $H_{рез}$  для композитных пленок с углеродом по сравнению с металл-диэлектрическими пленками связаны, скорее всего, с малой намагниченностью насыщения магнитных областей и их большими размерами.

На рис. 3 показана зависимость отношения интенсивностей двух мод поглощения  $I$  от  $x$  для пленок с углеродом. Отношение интенсивностей сигналов поглощения в области ФМР может быть

связано с объемным соотношением двух магнитных фаз в композитных пленках с углеродом. Одна из фаз в пленках с углеродом может совпадать с магнитной фазой, наблюдаемой в пленках с диэлектриком при стремлении  $x \rightarrow 1$ . Вторая фаза может быть связана с образованным углеродом химическим соединением, и должна уменьшаться при стремлении  $x \rightarrow 1$ . Зависимость коррелирует с отношением объемов двух магнитных фаз за счет уменьшения углерода с ростом  $x$ .

В работе обнаружено принципиальное отличие магнитных спектров ФМР двух серий композитных пленок: магнитный сплав–диэлектрик  $\{(Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x + (SiO_2)_{(1-x)/3}\}$  и металл–углерод  $\{(Co_{0.2}Fe_{0.2}B_{0.6})_x + (C)_{(1-x)}\}$ . У пленок с добавлением углерода обнаружены две магнитные фазы разного состава и структуры методом ФМР. Получены магниторезонансные характеристики исследованных композитных пленок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-57-150001).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dormann J.L., Fiorani D.* Magnetic properties of fine particles. Amsterdam: Elsevier, 1992. 445 p.
2. *Bedanta S., Barman A., Kleemann W. et al.* // *J. Nanomat.* 2013. V. 2013. Art. № 952540.
3. *Kotov L.N., Turkov V.K., Vlasov V.S. et al.* // *Mater. Sci. Engin.* 2006. V. 442. № 1. P. 352.
4. *Kotov L.N., Vlasov V.S., Turkov V.K. et al.* // *J. Nanosci. Nanotechn.* 2012. V. 12. № 2. P. 1696.
5. *Рыльков В.В., Николаев С.Н., Демин В.А. и др.* // *ЖЭТФ.* 2018. Т. 153. № 3. С. 424; *Rylkov V.V., Nikolaev S.N., Demin V.A. et al.* // *JETP.* 2018. V. 126. № 3. P. 353.
6. *Timopheev A.A., Bdikin I., Lozenko A.F. et al.* // *J. Appl. Phys.* 2012. V. 111. № 12. Art. № 123915.
7. *Beloborodov I.S., Lopatin A.V., Vinokur V.M. et al.* // *Rev. Mod. Phys.* 2007. V. 79. № 2. P. 469.
8. *Drovosekov A.B., Kreines N.M., Barkalova A.S. et al.* // *JMMM.* 2020. V. 495. Art. № 165875.
9. *Denisova E.A., Komogortsev S.V., Iskhakov R.S. et al.* // *JMMM.* 2017. V. 440. P. 221.