

УДК 537.622.4:537.86

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СВЧ ИМПЕДАНС КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК FeCoB + SiO<sub>2</sub>

© 2022 г. Л. Н. Котов<sup>1</sup>, \*, М. П. Ласёк<sup>1</sup>, В. С. Власов<sup>1</sup>, А. А. Уткин<sup>1</sup>,  
Ю. Е. Калинин<sup>2</sup>, А. В. Ситников<sup>2</sup>, В. В. Темнов<sup>3</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

<sup>3</sup>Высшая политехническая школа, Парижский Политехнический институт,  
Французская Академия Наук, Палезо, Франция

\*E-mail: kotovln@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 24.12.2021 г.

Принята к публикации 21.01.2022 г.

Получены СВЧ спектры магнитного импеданса пленок  $[(\text{Co}_{0.52}\text{Fe}_{0.45}\text{B}_{0.2})_x + (\text{SiO}_2)_y]$ ,  $x = 0.48-0.88$ , в постоянном магнитном поле от 0 до 0.7 Тл. Обнаружено уменьшение СВЧ модуля импеданса при намагничивании пленок, достигающее 6% для пленок с  $x = 0.76$ . Выявлены максимум отрицательного магнитного СВЧ импеданса пленок и его смещение от 2.2 до 0.4 ГГц с ростом  $x$ . Обнаружена полосовая магнитная структура с противоположным направлением намагниченности соседних полос.

DOI: 10.31857/S0367676522050131

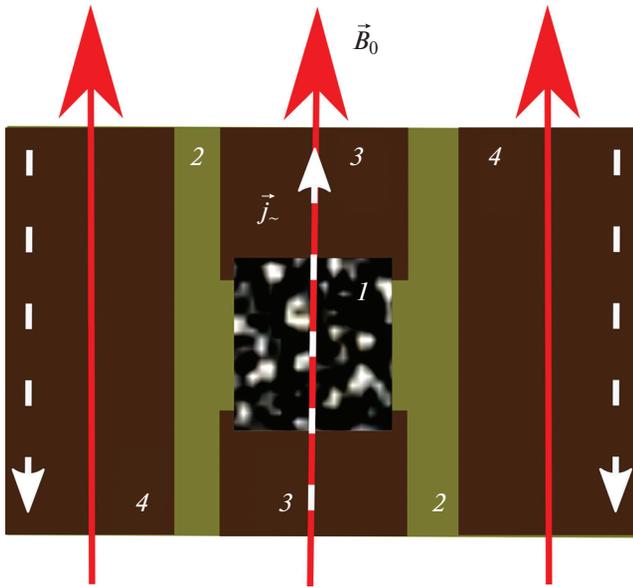
### ВВЕДЕНИЕ

Исследования магнитных наноструктурированных композитных материалов активно ведутся уже несколько десятилетий [1–4], но до сих пор, многие их свойства еще недостаточно изучены. Это обстоятельство связано с их сложной структурой и большим разнообразием неоднородных структур в них, в зависимости от состава и толщины пленок [5–11]. Изменение СВЧ удельного модуля импеданса (полного сопротивления) в зависимости от концентрации магнито-металлической фазы и с учетом разной микро- и наноструктуры пленок может составлять 3 порядка и более [8–11]. Однако значительное изменение удельного импеданса для композитной пленки с заданной концентрацией металла и диэлектрика, соответственно, микро- и наноструктурой, может быть достигнуто только при наложении внешних полей, например, магнитного поля. Внешнее магнитное поле может быть использовано для управления СВЧ устройствами, выполненных на основе композитных пленок, в которых может меняться импеданс композитных пленок. Исследование спектров удельного модуля импеданса, при прохождении сигналов тока в композитных пленках, в зависимости от постоянного магнитного поля, позволяет выявить особенности поведения электродинамических свойств особенно в СВЧ-диапазоне, которые

широко используется в современной радиотехнике и связи [5, 8–11]. Выявление пленок с ярко выраженными СВЧ магнитопроводящими свойствами будет способствовать реализации практических приложений и установлению механизмов СВЧ проводимости. При анализе результатов исследований необходимо установить наличие корреляции наблюдаемых характеристик СВЧ импеданса с микро- и наноструктурой композитных пленок [10, 11]. Поэтому данная работа посвящена нахождению условий максимального изменения модуля импеданса (полного сопротивления) композитных пленок ( $\text{CoFeB} + \text{SiO}_2$ ) при их намагничивании постоянным магнитным полем и пропускании СВЧ тока через пленки.

### МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Напыление композитных пленок осуществлялось методом ионной бомбардировки мишеней, состоящих из металлического сплава  $\text{Co}_{0.44}\text{Fe}_{0.36}\text{B}_{0.2}$  и диэлектрика  $\text{SiO}_2$  на лавсановый лист, площадью  $297 \times 210 \text{ мм}^2$  [10, 11]. Были получены пленки с составами  $[(\text{Co}_{0.46}\text{Fe}_{0.4}\text{B}_{0.14})_x + (\text{SiO}_2)_y]$ ,  $0.48 < x < 0.88$ ,  $y = (1 - x)/3$ . Концентрация металлической фазы  $x$  изменялась от 0.48 до 0.88 вдоль



**Рис. 1.** Геометрия эксперимента: 1 – композитная пленка, 2 – диэлектрический слой, 3, 4 – токоведущие полосы (4 центральная полоса с разрывом),  $\vec{j}_c$  – вектор СВЧ тока,  $\vec{B}_0$  – вектор индукции постоянного магнитного поля.

длинной стороны лавсанового листа. Композитные пленки с такими составами металлического сплава имеют после перколяционную структуру, в которых при напылении идет процесс слияния малых металлических областей. Композитные пленки с такими характеризуются металлическими областями больших размеров, свыше 0.1 мкм. Для проведения исследований из лавсанового листа с напыленным композитным слоем, нарезались пленки с размерами  $2.5 \times 2.5$  мм<sup>2</sup>. Элементный состав и толщина пленок определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3. Погрешность определения атомных долей составляла для атомов Co, Fe – 0.02, B – 0.03. Если сравнить содержание ионов бора в мишени металлического сплава и в пленках, то очевидно, что часть (до 20%) ионов бора отдельно вылетает из мишени металлического сплава состава  $\text{Co}_{0.44}\text{Fe}_{0.36}\text{B}_{0.2}$  и оседает на стенках вакуумной камеры. Толщины композитных пленок определялись на микроскопе Tescan Mira 3 по электронным фотографиям торца пленок с подложкой и составляли 0.9 мкм.

Определение модуля импеданса на фиксированной частоте вычислялось из полученных логарифмических спектров относительной мощности СВЧ сигналов, прошедших через композитные пленки. При исследовании магнитного импеданса пленки помещались в постоянное магнитное поле, при этом направления СВЧ тока и постоян-

ного магнитного поля были параллельны друг другу и плоскости пленки (рис. 1). Индукция магнитного поля изменялась от 0.005 до 0.7 Тл. Рабочий диапазон частот установки составлял от 0.1 до 3.0 ГГц. Пленки накладывались на разрыв центральной проводящей полоски компланарной линии передач, который состоял из трех параллельных полосок (рис. 1). Снятие спектров входной мощности прошедших сигналов тока через пленки проводилось при комнатной температуре. Источником подаваемого тока являлся генератор качающейся частоты, встроенный в анализатор спектра GSP-7830. Анализатор спектра позволял записывать спектры входной относительной мощности или коэффициента передачи

$K_{dBm} = 10 \lg \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right) = 10 \lg K$ , где  $P_{in}$  and  $P_{out}$  – мощности на входе анализатора и на выходе генератора.

Учитывая, что модуль импеданса  $|Z| = (1 - K) K^{-1}$ , получим формулу для удельного импеданса  $\rho = |Z| S l^{-1}$  где  $l$ ,  $S$  – длина и площадь поперечного сечения пленки. Модуль импеданса композитной пленки на частоте тока  $f = \omega(2\pi)^{-1}$  равен

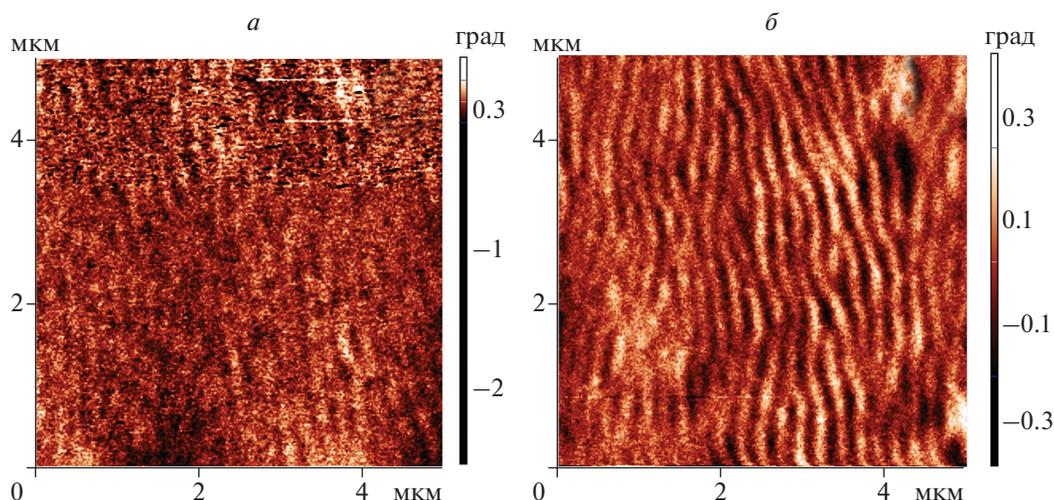
$$|Z| = \left[ R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $R$ ,  $\omega L$ ,  $(\omega C)^{-1}$  – активное, индуктивное, емкостное сопротивления пленки. Расчет СВЧ модуля магнитного импеданса  $M(f)$  пленок на частоте  $f$  проводился по формуле

$$M(f) = \frac{|Z_B(f)| - |Z_0(f)|}{|Z_0(f)|}, \quad (2)$$

где  $|Z_B(f)|$ ,  $|Z_0(f)|$  – модули импедансов пленки на частоте  $f$  в магнитном поле и без поля.

Изображения магнитного фазового контраста поверхности образцов проводилось с помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA PRIMA (NT-MDT, Россия) с кантилевером MFM10 [10, 11]. Силиконовый зонд был покрыт магнитным сплавом CoCr, толщиной 40 нм. Радиус закругления кончика зонда составлял 20 нм. Частота колебаний внешней силы, действующей на кантилевер с зондом, подбиралась в диапазоне частот 47–90 кГц. В микроскопе регистрировалась разность фаз  $\Delta\phi$ , которая изменялась в зависимости от силы магнитного взаимодействия зонда с поверхностью пленок. Притяжение и отталкивание зонда к участку поверхности магнитной пленки, соответствовало разным знакам  $\Delta\phi$ . Полученная зависимость  $\Delta\phi$  от координат поверхности пленок преобразовывалась в изображение магнитного фазового контраста, отображающем размеры и форму магнитных однородных областей с постоянным сдвигом фаз (рис. 2).



**Рис. 2.** Изображения магнитного фазового контраста композитных пленок  $[(\text{Co}_{0.46}\text{Fe}_{0.4}\text{B}_{0.14})_x + (\text{SiO}_2)_y]$  при  $x = 0.62$  (а),  $0.74$  (б). Справа от изображения по вертикальной оси приведены значения сдвига фаз в градусах в цветовом контрасте.

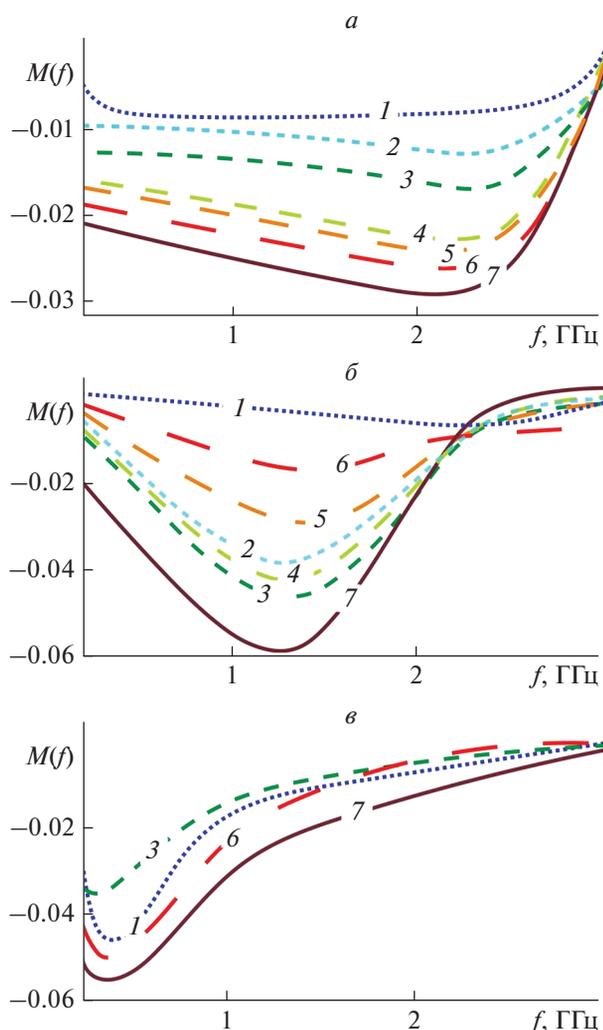
### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены изображения магнитного фазового контраста композитных пленок составов  $[(\text{Co}_{0.52}\text{Fe}_{0.45}\text{B}_{0.2})_x + (\text{SiO}_2)_y]$ ,  $x = 0.62, 0.74$ . На изображениях видна полосовая магнитная структура с противоположным направлением вектора намагниченности соседних полос. Для пленок с  $x = 0.62$  характерно не четкое изображение магнитных полос, что соответствует началу формирования этой структуры. Для пленок с  $0.64 \leq x \leq 0.81$ , длина магнитных полос может достигать более 3 мкм при средней ширине около 0.13 мкм.

На рис. 3 представлены спектры магнитного импеданса  $M(f)$  композитных пленок при разных значениях постоянных магнитных полей  $B_0$ . В диапазоне частот от 0.2 до 3.0 ГГц наблюдается уменьшение модуля импеданса с ростом постоянного магнитного поля, что соответствует отрицательному магнитному импедансу. С ростом концентрации металлического сплава  $x$  максимум отрицательного магнитного импеданса смещается в сторону низких частот от 2.2 до 1.4 ГГц. Плавное смещение экстремума в сторону низких частот, скорее всего, связано с изменением размеров магнитных полос при увеличении концентрации  $x$  (рис. 3а, 3б). Резкое смещение максимума при изменении  $x$  от 0.82 до 0.84 в сторону низких частот от 1.4 до 0.4 ГГц, возможно, связано с резким изменением геометрии структуры. Известно, что для металл-диэлектрических композитных пленок с ростом  $x$  полосовая магнито-металлическая

структура может меняться с полосовой на лабиринтную и сетчатую структуры [10, 11]. Для всех пленок с  $x = 0.64–0.74$ , для которых характерна полосовая структура, наблюдается увеличение отрицательного магнитного импеданса с ростом магнитного поля. Для пленок с  $x \geq 0.82$  сначала наблюдается уменьшение, а затем увеличение отрицательного магнитного сопротивления при росте поля, что может быть также связано с существованием другой магнитной структуры в пленках. Максимальное уменьшение модуля импеданса при увеличении магнитного поля было обнаружено на частоте тока 1.3 ГГц для пленок с  $x = 0.76$ , которые характеризуются наибольшей шириной магнитных полос.

Возникновение отрицательного магнитного импеданса, в композитных пленках с магнитной полосовой структурой, может наблюдаться вследствие того, что внешнее магнитное поле ориентирует магнитные моменты соседних полос с противоположным направлением намагниченности в одном направлении, увеличивая намагниченность слоев до насыщения, что должно приводить к увеличению длины свободного пробега электронов и уменьшению активного сопротивления пленки [12]. Наличие экстремума на спектрах магнитного импеданса, его смещение в область более низких частот с ростом  $x$ , и рост модуля его производной от частоты в окрестности экстремума, можно связать с увеличением ширины магнитных полос композитных пленок. Повышение добротности колебаний СВЧ тока с ростом  $x$  до 0.81 также может происходить за счет увеличения ширины магнитных полос, что соответствует уменьшению ак-



**Рис. 3.** Спектры магнитного СВЧ импеданса  $M(f)$  композитных пленок  $[(\text{Co}_{0.46}\text{Fe}_{0.4}\text{B}_{0.14})_x + (\text{SiO}_2)_y]$ , помещенных в постоянное магнитное поле. Номера кривых соответствуют значениям магнитного поля (в 0.1 Тл), в котором находились пленки с  $x = 0.69$  (а), 0.81 (б), 0.83 (в).

тивного сопротивления пленок и соответственно, модуля импеданса пленок.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально получены СВЧ спектры магнитного импеданса, или разности полного сопротивления пленок в магнитном поле и без поля. Исследования магнитного импеданса были проведены для металл-диэлектрических композитных пленок с составами  $[(\text{Co}_{0.46}\text{Fe}_{0.4}\text{B}_{0.14})_x + (\text{SiO}_2)_y]$ ,  $0.48 \leq x \leq 0.88$  в диапазоне частот от 0.2 до 3.0 ГГц и интервале постоянных магнитных полей от 0 до 0.7 Тл. В экспериментах вектора индукции постоянного магнитного поля и СВЧ тока

были коллинеарны между собой и направлены параллельно плоскости пленки. Максимальное значение СВЧ отрицательного магнитного импеданса композитных пленок для  $x = 0.76$ , достигнутое в этой работе, составляло 6%, в постоянном магнитном поле  $B_0 = 0.7$  Тл. На изображениях магнитного фазового контраста в композитных пленках была обнаружена полосовая магнитная структура с противоположным направлением вектора намагниченности соседних полос. Наличие эффекта гигантского отрицательного магнитного СВЧ импеданса в композитных пленках  $[(\text{Co}_{0.46}\text{Fe}_{0.4}\text{B}_{0.14})_x + (\text{SiO}_2)_y]$ , для интервала концентраций  $0.64 < x < 0.74$ , может быть использовано для создания СВЧ устройств: магнито-полевых транзисторов, переключателей, фильтров с регулируемой границей среза и других приложений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-20048).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухараев А.А., Звездин А.П., Пятаков А.П. и др. // УФН. 2018. Т. 188. № 12. С. 1288; Bukharaev A.A., Zvezdin A.P., Pyatakov A.P. et al. // Phys. Usp. 2018. V. 61. No. 12. P. 1175.
2. Баранов П.Г., Калашиникова А.М., Козуб В.И. и др. // УФН. 2019. Т. 189. № 8. С. 849; Baranov P.G., Kalashnikova A.M., Kozub V.I. et al. // Phys. Usp. 2019. V. 62. No. 8. P. 795.
3. Рьльков В.В., Емельянов А.В., Николаев С.Н. и др. // ЖЭТФ. 2020. Т. 158. № 1. С. 164; Rylkov V.V., Emelyanov A.V., Nikolaev S.N. et al. // JETP. 2020. V. 131. No. 1. P. 160.
4. Котов Л.Н., Ласёк М.П., В.К. Турков и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 85. № 9. С. 1255; Kotov L.N., Lasek M.P., Turkov V.K. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 85. No. 9. P. 1065.
5. Kotov L.N., Vlasov V.S., Turkov V.K. et al. // JNN. 2012. V. 12. No. 2. P. 1696.
6. Kotov L., Ustyugov V., Vlasov V. et al. // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Engin. 2016. V. 123. Art. No. 012009.
7. Kotov L.N., Turkov V.K., Vlasov V.S. et al. // Mater. Sci. Engin. 2006. V. 442. No. 1. P. 352.
8. Vlasov V.S., Kotov L.N., Shavrov V.G. et al. // J. Commun. Technol. Electron. 2014. V. 59. No. 9. P. 920.
9. Турков В.К., Власов В.С., Котов Л.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 10. С. 1414; Turkov V.K., Vlasov V.S., Kotov L.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 10. P.1223.
10. Антонец И.В., Голубев Е.А., Котов Л.Н. и др. // ЖТФ. 2016. Т. 86. № 3. С. 98; Antonets I.V., Golubev E.A., Kotov L.N. et al. // Tech. Phys. 2016. V. 61. No. 3. P. 416.
11. Антонец И.В., Котов Л.Н., Голубев Е.А. и др. // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 2. С. 234; Antonets I.V., Kotov L.N., Golubev E.A. et al. // Tech. Phys. 2017. V. 62. No. 2. P. 261.
12. Лукашевич М.Г. Введение в магнитоэлектронику. Минск: БГУ, 2003.

## Effect of a magnetic field on the microwave impedance of composite FeCoB + SiO<sub>2</sub> films

L. N. Kotov<sup>a,\*</sup>, M. P. Lasek<sup>a</sup>, V. S. Vlasov<sup>a</sup>, A. A. Utkin<sup>a</sup>, Yu. E. Kalinin<sup>b</sup>,  
A. V. Sitnikov<sup>b</sup>, V. V. Temnov<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Syktyvkar State University, Syktyvkar, 167001 Russia

<sup>b</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, 394026 Russia

<sup>c</sup> LSI, Ecole Polytechnique, CEA/DRF/IRAMIS, CNRS, Institut Polytechnique de Paris, Paris, F-91128 France

\*e-mail: kotovln@mail.ru

Microwave spectra of magnetic impedance of films  $[(\text{Co}_{0.52}\text{Fe}_{0.45}\text{B}_{0.2})_x + (\text{SiO}_2)_y]$ ,  $x = 0.46-0.88$ , in a constant magnetic field from 0 to 0.7 T were obtained. A decrease in the microwave impedance modulus upon magnetizing the films, reaching 6% for films with  $x = 0.76$ , was found. The maximum negative magnetic microwave impedance of the films and its shift from 2.2 to 0.4 GHz with increasing  $x$  were revealed. A stripe magnetic structure with the opposite direction of magnetization of neighboring stripes was found.