

УДК 538.975, 539.216.6, 539.232, 537.635, 537.622.4

## СПИН-ВОЛНОВОЙ РЕЗОНАНС КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТАНТЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ АНИЗОТРОПИИ НА ПРИМЕРЕ ПЛЕНОК Fe–Ni-СПЛАВА

© 2017 г. И. Г. Важенина<sup>1,2</sup>, Л. А. Чеканова<sup>1</sup>, Р. С. Исхаков<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики имени Л.В. Киренского, Федеральный исследовательский центр  
 “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”, Красноярск

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
 “Сибирский федеральный университет”, Красноярск

\*E-mail: rauf@iph.krasn.ru

Рассмотрено влияние толщины ферромагнитной тонкой пленки и ее концентрационного состава на величину константы поверхностной анизотропии  $K_S$ . В качестве метода регистрации и измерения величины  $K_S$  выбран метод спин-волнового резонанса. Тонкие Fe–Ni-пленки изготавливали методом химического осаждения. Установлены зависимости  $K_S$  от концентрации Ni в сплаве и толщины пленки.

DOI: 10.7868/S0367676517030383

### ВВЕДЕНИЕ

Спектр спин-волновых мод в тонких ферромагнитных пленках существенно определяется условиями закрепления магнитного момента на поверхности пленки. Поэтому формированию граничных условий в пленках уделяется значительное внимание [1–5]. В последнее десятилетие внимание к роли поверхностной анизотропии в процессах распространения волн намагниченности, а также в формируемых физических свойствах нанобъектов вновь возросло. Традиционно исследуется анизотропия в тонких магнитных пленках, изготовленных в виде мультислоев с различной прослойкой [6–8]; появились и новые объекты: такие как магнитные полупроводники [9], наногранилированные магнитные композиты [10], а также наночастицы ферригидрида [11]. Выполненные ранее широкие исследования по влиянию граничных условий на вид спектра спин-волнового резонанса позволяют ставить обратную задачу и проводить исследование зависимости константы поверхностной анизотропии от различных параметров пленки с использованием метода спин-волнового резонанса (СВР).

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

На форму возбужденных колебаний намагниченности (стоячих спиновых волн) существенно влияют граничные условия на поверхности пленки. В модели Киттеля [1] магнитная неоднородность, благодаря которой возбуждается спектр собственных колебаний магнитного момента однородным высокочастотным полем, вынесена в

граничные условия на поверхности пленки. При симметричных относительно центра пленки граничных условиях спектр СВР представлен набором дискретных пиков, соответствующих возбуждению спин-волновых мод с нечетным числом полуволн ( $n = 1, 3, 5, \dots$ ).

В работах Р.Г. Хлебопроста и др. [3, 12] была поставлена и решена задача искусственного формирования заданных граничных условий на поверхности образца путем нанесения тонких ферромагнитных слоев с отличающейся намагниченностью. На данных структурах удалось провести формирование антисимметричных граничных условий:  $\beta^+ = -\beta^- = \beta$ . В спектре СВР возбуждались поверхностная мода с  $k = i\beta$  и объемные тригонометрические моды с  $k = n(\pi/d)$ ,  $n = 1, 3, 5, \dots$ , что совпадает с киттелевским спектром. Появление четных моды ( $n = 2, 4, 6, \dots$ ) малой интенсивности становится возможным при отклонении от симметричных (антисимметричных) граничных условий.

Волновые векторы  $\vec{k}$  стоячих спиновых волн при произвольных параметрах закрепления намагниченности на нижней и верхней поверхностях пленки  $\beta_1^S$  и  $\beta_2^S$  определяются уравнениями, полученными из обменных граничных условий [13]:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(kL) &= \frac{(\beta_1^S + \beta_2^S)k}{k^2 - \beta_1^S \beta_2^S}, \quad \text{если } k \text{ реально и} \\ \operatorname{th}(k_S L) &= \frac{-(\beta_1^S + \beta_2^S)k_S}{k_S^2 + \beta_1^S \beta_2^S}, \quad \text{если } k = ik_S \text{ мнимо.} \end{aligned} \quad (1)$$

Оценку выполнения того или иного типа граничных условий (симметричных или антисимметричных) проводят по соотношению параметра поверхностного закрепления  $\beta$  на различных

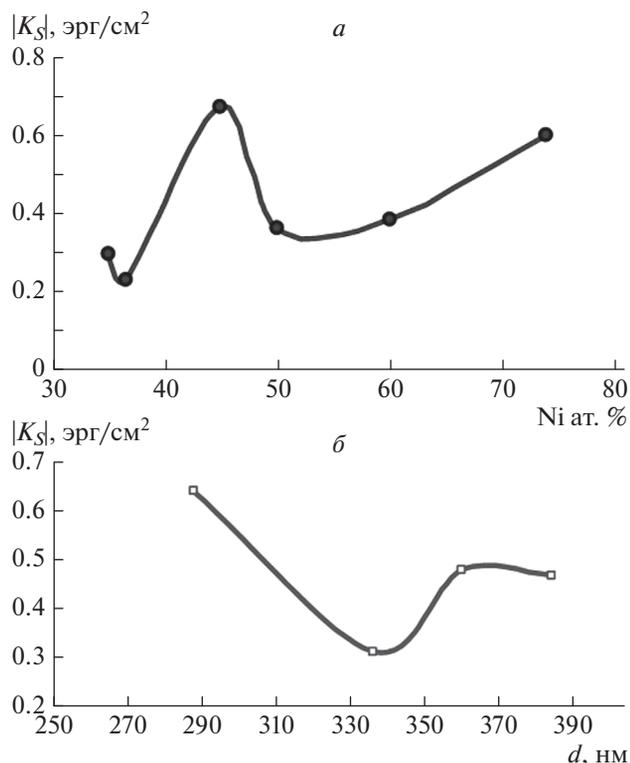


Рис. 1. Зависимость величины константы поверхностной анизотропии от содержания Ni (а) и от толщины образца (б) в ферромагнитных пленках FeNi.

поверхностях пленки ( $\beta^+$  и  $\beta^-$ ), который определяется выражением

$$\beta = \frac{K_S}{A}, \quad (2)$$

где  $A$  – константа обменного взаимодействия, связанная с  $\eta = 2A/M_S$ .

Случай  $\beta > 0$  соответствует анизотропии типа легкая ось, а  $\beta < 0$  – анизотропии типа легкая плоскость. Симметричным граничным условиям соответствует равенство  $\beta^+ = \beta^-$ .

Реализация закрепления поверхностных спинов полем анизотропии типа легкая плоскость ( $\beta < 0$ ) приводит к появлению в спектре поверхностной моды с  $k^2 < 0$ , которой соответствует колебание намагниченности, затухающее по толщине. В толстых пленках с симметричными граничными условиями, для которых  $d > 1/|\beta|$  и  $\beta < 0$ , в спектре СВР могут присутствовать две поверхностные моды.

В работе с помощью метода СВР рассмотрено влияние толщины тонкой ферромагнитной пленки и ее концентрационного состава на величину  $K_S$ . Измерения проводили на тонких FeNi-пленках, синтезированных методом химического осаждения из раствора соответствующих солей. Были синтезированы две серии образцов: с изменениями концентрационного состава и толщины образца. Для исследования второй серии был вы-

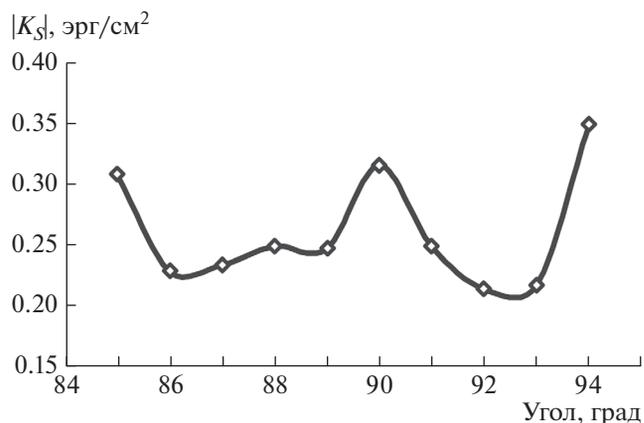


Рис. 2. Зависимость величины константы поверхностной анизотропии от угла поворота.

бран состав  $\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{75}$ . Технология синтеза образцов позволяла регистрировать спектр СВР с поверхностной модой и объемными модами.

Резонансные характеристики измеряли на стандартном ЭПР-спектрометре (частота накачки 9.2 ГГц). Пленки намагничивали как параллельно, так и перпендикулярно к поверхности образца в полях до 20 кЭ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Регистрация спектров СВР на исследуемых образцах позволила определить величину константы обменного взаимодействия, которая может быть рассчитана согласно следующему выражению:

$$A = M_{eff} \left( \frac{d}{2\pi} \right)^2 \frac{H_n - H_{n+1}}{(n+1)^2 - n^2}, \quad (3)$$

расчет этого параметра велся для длинноволновых значений волнового вектора.

Из спектров СВР также определяется параметр закрепления магнитного момента на поверхности. Константа поверхностной анизотропии описывается выражением

$$|K_S| = \sqrt{\frac{1}{2}(H_S - H_1) M_{eff} A}. \quad (4)$$

Подставляя в (4) экспериментальные величины  $H_S$ ,  $H_1$ ,  $M_{eff}$ ,  $A$  для пленок системы Fe–Ni получим следующий результат:  $K_S < 0$ , модуль  $K_S$  зависит от содержания Ni в пленке и от толщины образца. Концентрационные зависимости величины константы одноосной поверхностной анизотропии представлены на рис. 1, на этом же рисунке представлена зависимость данного параметра от толщины образца. Полученные результаты по зависимости  $K_S(d)$  хорошо согласуются с данными работы [7]. На одном из образцов серии были измерены угловые зависимости  $K_S$ , представленные на рис. 2.

## ВЫВОДЫ

Используемая технология получения пленок позволила изготовить образцы с хорошо идентифицируемыми в спектрах СВР спин-волновыми модами – поверхностной и объемной. Установлены зависимости величины константы поверхностной анизотропии  $K_s$  от толщины FeNi пленки и ее состава, а также от угла поворота.

Научное исследование выполнено при поддержке РФФИ, проекты № 15-08-06673, 16-03-00969, 16-03-00256, РФФИ – ККФН р-сибирь-а проект № 15-42-04171, а также при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края в рамках научного проекта № 16-42-243017.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kittel C. // Phys. Rev. 1958. V. 110. № 6. P. 1295.
2. Ament W.S., Rado G.T. // Phys. Rev. 1955. V. 97. № 6. P. 1558.
3. Хлебопрос Р.Г., Михайловская Л.В. // Физика тв. тела. 1970. Т. 12. Вып. 8. С. 2476.
4. Соколов В.М., Тавгер Б.А. // Физика тв. тела. 1968. Т. 10. Вып. 6. С. 1793.
5. Puzzkarski H. // Progr. Surf. Sci. 1979. V. 9. P. 191.
6. Tohg L.N. et al. // Phys. Status Solidi (a). 1998. V. 165. P. 261.
7. Biondo A. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2004. V. 277. P. 144.
8. Исхаков Р.С., Середкин В.А., Столяр С.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 13. С. 75.
9. Puzzkarski H., Tomczak P. // Sci. Rep. 2014. V. 4. P. 6135; doi 10.1038/srep06135
10. Iskhakov R.S., Kotogortsev S.V., Denisova E.A. et al. // JETP Lett. 2007. V. 86. № 7. P. 534.
11. Balaev D.A. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2016. V. 410. P. 171.
12. Корчагин Ю.А., Хлебопрос Р.Г., Чистяков Н.С. // ФММ. 1972. Т. 34. № 6. С. 1303.
13. Саланский Н.М., Ерухин М.Ш. Физические свойства и применение магнитных пленок. Н.: Наука, 1975. 222 с.