

УДК 537.622.4:537.635

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$

© 2021 г. С. А. Вызулин^{1, *}, Н. Е. Сырьев², Г. В. Скоморохов³

¹Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования “Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко” Министерства обороны Российской Федерации, Красноярск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

³Институт физики имени Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”, Красноярск, Россия

*E-mail: vyzulin@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Исследованы магниторезонансные характеристики нанотолщинных пленочных систем $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$. Экспериментально показано, что в тонких однослойных пленочных структурах $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ теория Киттеля для однородного ферромагнитного резонанса может не выполняться.

DOI: 10.31857/S0367676521090325

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к пленочным структурам с тонкими магнитными слоями обусловлен возможностью изменить физические свойства структуры за счет вариации толщины слоев. На основе одних и тех же веществ, но с различными величинами размерных параметров, можно получить объекты либо с высокими значениями туннельного магнитосопротивления [1], либо со сверхмягкими характеристиками [2], либо с высокими значениями магнитооптического отклика [3]. Разнообразие свойств пленочных структур обусловлено изменением условий взаимодействия наночастиц в пленочной структуре и требует комплексных исследований с помощью различных методов.

Эффективным способом исследования магнитных свойств образцов пленочных структур, в том числе и нанометровой толщины, является метод ферромагнитного резонанса (ФМР). Чувствительность метода ФМР обеспечивает для образцов пленочных наноструктур высокую точность измерений параметров резонанса: напряженность резонансного поля, ширину и интенсивность линии поглощения [4]. Он позволяет без специальной подготовки образца установить взаимосвязи между данными наблюдения ферромагнитного резонанса и микроскопическими материальными параметрами нанопленочных систем [5].

Известна теория однородного ФМР, развитая Киттелем [6] для массивных, намагниченных до насыщения ферромагнитных тел эллипсоидальной формы. Предельными случаями образцов эллипсоидальной формы являются тонкие пластины – пленки. В рамках теории Киттеля зависимость резонансного поля от ориентации поля намагничивания по отношению к плоскости пленки непрерывна. Традиционно принято считать, что теория ФМР Киттеля применима и для тонких, в том числе нанотолщинных, пленок [7]. Цель работы состояла в изучении особенностей проявления ФМР в нанотолщинных пленках пермаллоя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованы однослойные пленочные структуры из $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$, синтезированные в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН [8]. Структуры изготавливались двумя способами: методом магнетронного распыления при постоянном токе и методом термического испарения.

Распыляемая (испаряемая) мишень была выполнена из материала $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$, где $x = 63-80$. С целью создания наведенной одноосной магнитной анизотропии в плоскости структуры напыление осуществлялось в однородном планарном магнитном поле 200 Э. Направление в плоскости структуры, совпадающее с направлением поля намагничивания, будем далее по тексту обозна-

чать вектором \vec{i} . Подложка структуры размером $12 \times 12 \text{ мм}^2$ выполнялась из ситалла с напыленным слоем SiO толщиной около 0.5 мкм . Температура подложки при напылении была равна 80°C . Базовое давление в камере перед напылением равнялось $2 \cdot 10^{-6}$ мбар. Давление во время напыления было $2 \cdot 10^{-3}$ мбар. Скорость подачи аргона при напылении составляла $100 \text{ см}^3/\text{мин}$. При магнетронном распылении ток плазменного разряда был равен 0.5 А , а напряжение плазменного разряда — 445 В . При термическом испарении ток эмиссии был равен 0.1 А , а напряжение между катодом и анодом — 5.0 кВ . Время напыления контролировалось. Исходя из скорости и времени напыления, оценивалась толщина магнитного слоя. Толщины магнитных слоев в исследованных образцах были от 25 до 150 нм , что соответствовало продолжительности напыления от 60 до 420 с . Из синтезированных структур были изготовлены образцы размером $3 \times 3 \text{ мм}^2$.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнялись с помощью спектрометра “JEOL JES FA-300”. Измерения проводились при комнатной температуре на частоте 9.15 ГГц резонаторным способом с применением обычной модуляционной техники [9]. В спектрометре используется цилиндрический объемный резонатор с модой TE_{011} . В резонатор вставляется держатель, так что его ось вращения совпадала с ориентацией переменного магнитного поля \vec{h} и была ортогональна ориентации постоянного поля намагничивания \vec{H} . На держателе закреплялся исследуемый образец.

При исследовании спектров ФМР в плоских структурах, образец обычно наклеивают на держатель так, что ось вращения держателя параллельна плоскости пленки. Возможен другой способ размещения образца на держателе и, соответственно, в резонаторе. Образец наклеивается на торец держателя так, что нормаль к поверхности образца \vec{n} параллельна оси вращения держателя. В работе исследованы спектры ФМР при размещении пленки этими двумя способами. В первом случае переменное магнитное поле \vec{h} лежит по нормали к поверхности пленки ($\vec{h} \parallel \vec{n}$), а во втором случае — в плоскости образца ($\vec{h} \perp \vec{n}$).

При размещении пленки первым способом измерения выполняются для различных ориентаций магнитного поля \vec{H} относительно оси \vec{i} . Ориентация поля \vec{H} в плоскости образца характеризуется углом φ , отсчитываемым от оси \vec{i} . Интервал изменений φ от 0° до 360° . Первый способ размещения образца используется редко, т. к. чувствительности

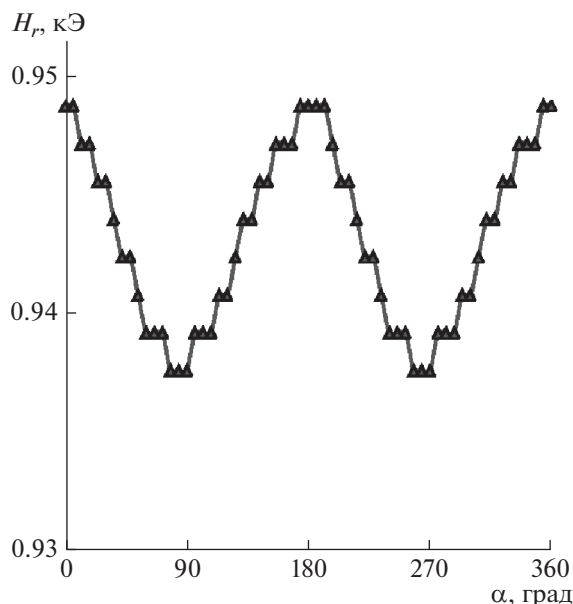


Рис. 1. Угловая зависимость резонансного поля при касательном намагничивании образца.

спектрометра обычно не хватает для уверенной регистрации магнитных спектров.

Регистрация спектров при креплении образца вторым способом осуществляется для различных значений угла α между внешним магнитным полем \vec{H} и нормалью к поверхности образца \vec{n} . Угол α можно изменять от 0° до 360° . По спектрам определяли резонансное поле H_r , ширине линии поглощения ΔH и интенсивности первой производной сигнала поглощения J .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для всех исследованных образцов в спектре при размещении образца первым способом для любых ориентаций \vec{H} наблюдается одна линия поглощения. Характерный вид зависимостей $H_r(\varphi)$ продемонстрирован на рис. 1. Здесь и ниже, кроме специально оговоренных ситуаций, экспериментальные зависимости приводятся для образца, синтезированного методом магнетронного распыления с $x = 80$ и толщиной магнитного слоя порядка 25 нм (образец 1). Из рисунка видно, что в результате синтеза структуры в магнитном поле в плоскости образца наблюдается одноосная магнитная анизотропия. Анизотропия H_r в плоскости пленки имеет величину примерно $10\text{--}15 \text{ Э}$.

Характерный вид зависимостей $H_r(\alpha)$, $\Delta H(\alpha)$ и $J(\alpha)$ продемонстрирован на рис. 2. Дискретность вариации угла α была не более 6° . Из представленных диаграмм видно, что существуют такие α_i -ориентации поля намагничивания \vec{H} относительно нормали к плоскости пленки \vec{n} , при кото-

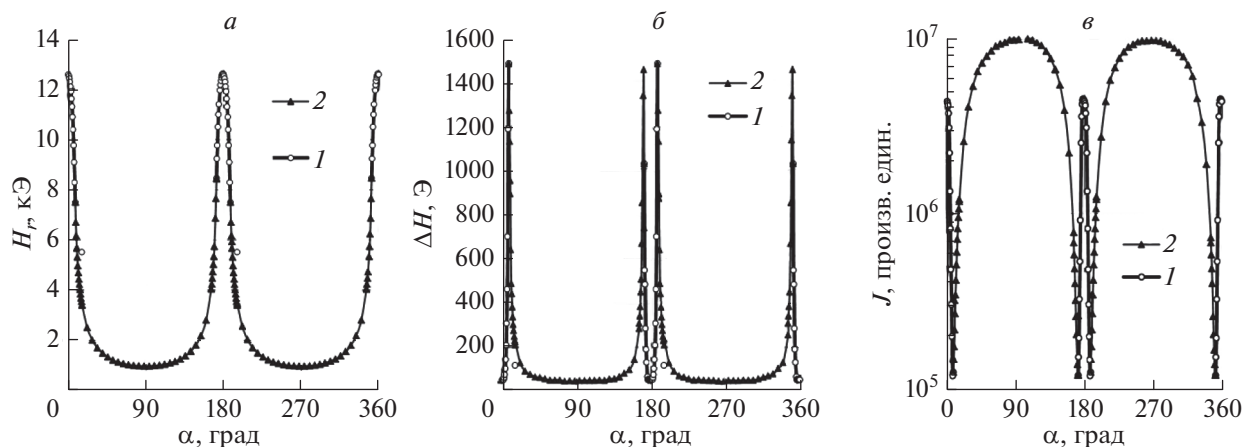


Рис. 2. Угловые зависимости $H_p(\alpha)$, $\Delta H(\alpha)$ и $J(\alpha)$.

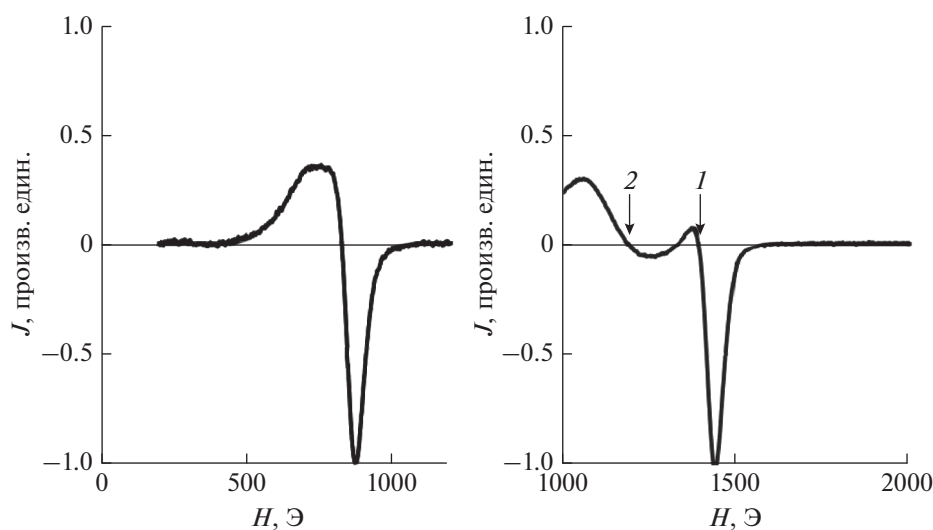


Рис. 3. Вид спектров ФМР.

рых линии поглощения более чем в 10 раз шире, чем при касательном намагничивании ($\alpha = 90^\circ$). Интенсивность первой производной сигнала поглощения J различается при α_i и $\alpha = 90^\circ$ почти на два порядка. Для ситуации, представленной на рис. 2, величина $\alpha_i \approx 8^\circ, 172^\circ, 188^\circ$ и 352° . Аналогичный характер изменений $\Delta H(\alpha)$ и $J(\alpha)$ наблюдается и для массивных образцов [5]. Однако динамический диапазон изменений ΔH и J от α для тонких пленок $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ существенно (не менее чем на порядок) больше. Это обстоятельство и послужило причиной для более тщательного исследования спектров тонких пленок $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ в окрестности α_i . Под более тщательным исследованием понимается запись спектров с шагом по углу α меньше, чем 6° .

Уникальностью используемого измерительного комплекса “JEOL JES FA-300” является наличие автоматически перестраиваемого гониометра. Минимальный шаг изменения угла α можно установить равным 0.6° . Для образца 1 в окрестности α_i наблюдается уширение линии ФМР с неоднородностями (рис. 3а), которые нельзя трактовать как резонансы. Для образца 2 с ориентировочной толщиной магнитного слоя 50 нм, полученного методом термического испарения мишени $\text{Ni}_{63}\text{Fe}_{37}$, в окрестности α_i наблюдаются два резонанса (рис. 3б). Один резонанс имеет продолжение в области близкой к нормальному намагничиванию (помечен на рис. 2 и 3б цифрой 1), а другой резонанс имеет продолжение в области близкой к касательному намагничиванию (помечен на рис. 2 и 3б цифрой 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранее считалось, что зависимость резонансного поля от ориентации поля намагничивания относительно поверхности плоской, в том числе и пленочной структуры, является непрерывной. Резонанс, наблюдаемый при касательном намагничивании, непрерывно переходит (при изменении ориентации магнитного поля) в резонанс, наблюдаемый при нормальном намагничивании.

Представленные экспериментальные результаты указывают на то, что в тонких однослойных пленочных структурах $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ угловая зависимость резонансного поля имеет разрыв, т.е. теория Киттеля для однородного ФМР в пленочных структурах с магнитными слоями $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ нанометровой толщины может не выполняться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kakazei G.N., Pogorelov Yu.G., Lopes A.M.L. et al. // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. No. 8. P. 4044.*
2. *Bedanta S., Eimüller T., Kleemann W. et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. Art. No. 176601.*
3. *Ганьшина Е.А., Перов Н.С., Пхонгхирун С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72. № 10. С. 1455; Gan'shina E.A., Perov N.S., Phonghirun S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2008. V. 72. No. 10. P. 1379.*
4. *Вызулин С.А., Каликинцева Д.А., Мирошниченко Е.Л. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 8. С. 1048; Vyzulin S.A., Kalikintseva D.A., Miroshnichenko E.L. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 8. P. 943.*
5. *Вызулин С.А., Сыр'ев Н.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 6. С. 755; Vyzulin S.A., Syr'ev N.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. No. 6. P. 685.*
6. *Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 593 с.*
7. *Вызулин С.А., Лебедева Е.В., Лысак Д.А., Сыр'ев Н.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 12. С. 1757; Vyzulin S.A., Lebeleva E.V., Lysak L.A., Syr'ev N.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2010. V. 74. No. 12. P. 1687.*
8. *Беляев Б.А., Боев Н.М., Изотов А.В. и др. // Изв. вузов. Физ. 2020. Т. 63. № 1(745). С. 17.*
9. *Вызулин С.А., Горобинский А.В., Искандаров Х.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72. № 1. С. 125; Vyzulin S.A., Gorobinskii A.V., Iskandarov Kh.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2008. V. 72. No. 1. P. 113.*

Ferromagnetic resonance in a thin $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ films

S. A. Vyzulin^{a,*}, N. E. Syr'ev^b, G. V. Skomorokhov^c

^a*Krasnodar Higher Military School, Krasnodar, 350035 Russia*

^b*Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^c*Kirensky Institute of Physics, Krasnoyarsk Federal Research Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, 660036 Russia*

*e-mail: vyzulin@mail.ru

We measured ferromagnetic resonance characteristics of nanometer $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ films. It has been shown experimentally that, in thin single $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}$ films, Kittel's theory for uniform ferromagnetic resonance may not be valid.