

05

Магнитно-резонансная силовая спектроскопия массива микрополосок пермаллоя

© Е.В. Скороходов, М.В. Сапожников, В.Л. Мионов[¶]

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

[¶] E-mail: mironov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 31 октября 2017 г.

Приведены результаты исследований ферромагнитного резонанса (ФМР) в массиве микрополосок пермаллоя размером $3000 \times 500 \times 30$ нм, упорядоченных на прямоугольной решетке $3.5 \times 6 \mu\text{m}$, методом магнитно-резонансной силовой микроскопии (МРСМ). Анализируются зависимости МРСМ-спектров образца от расстояния зонд—образец. Показана возможность регистрации ФМР-спектра одиночной микрополоски.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.05.45707.17101

СВЧ-свойства тонкопленочных ферромагнитных наноструктур привлекают большое внимание исследователей в связи с перспективностью их применения в приборах на основе планарных волноводов [1–6]. Характеристики ферромагнитного резонанса (ФМР) в таких системах существенно зависят как от формы и размеров отдельных элементов, так и от пространственной архитектуры всего ансамбля, а также от способов возбуждения [7–10]. Традиционным методом исследования ФМР является магнитно-резонансная спектрометрия, основанная на измерении поглощения СВЧ-излучения образцом, расположенным внутри высокодобротного резонатора, во внешнем однородном магнитном поле [11]. Однако эта методика требует изготовления достаточно больших массивов идентичных элементов, что является трудоемкой технологической задачей. В последнее время получила развитие новая методика регистрации локальных СВЧ-свойств материалов и наноструктур — магнитно-резонансная силовая микроскопия (МРСМ), которая сочетает в себе преимущества магнитно-силовой микроскопии и методов резонансной СВЧ-диагностики [12–18]. Основной идеей МРСМ является регистрация локального силового взаимодействия зонда магнитно-

силового микроскопа с магнитным образцом в условиях СВЧ-накачки. При возбуждении ФМР величина статической намагниченности образца изменяется, что приводит к изменению сил, действующих на зонд со стороны образца.

В настоящей работе проведены МРСМ-исследования ФМР в массиве микрополосок пермаллоя в продольном подмагничивающем поле. Основное внимание уделяется эффектам воздействия поля зонда на ФМР отдельных полосок.

Массив микрополосок из пермаллоя ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) был изготовлен методами взрывной (lift-off) литографии. Слой позитивного электронного резиста полиметилметакрилата осаждался на кремниевую подложку (толщиной $500\ \mu\text{m}$) с помощью центрифугирования. Начальная маска в виде массива прямоугольных полосок формировалась в резисте посредством экспонирования электронным пучком в микроскопе SUPRA 50VP с литографической приставкой ELPHY PLUS (компания „CarlZeiss“, Jena). Затем облученные области резиста, соответствующие будущим полоскам, удалялись с помощью селективного травления в растворе метилизобутилкетона в изопропиловом спирте. После этого на образец напылялся тонкий (толщиной $30\ \text{nm}$) слой пермаллоя методом магнетронного напыления. Финальный взрывной процесс проводился в ацетоне с использованием ультразвука, в результате чего оставшийся слой резиста удалялся вместе с расположенной над ним пленкой пермаллоя. Таким образом был сформирован массив ферромагнитных полосок размером $3000 \times 500 \times 30\ \text{nm}$, упорядоченный на прямоугольной решетке с периодом $6\ \mu\text{m}$ в направлении длинной оси и $3.5\ \mu\text{m}$ в направлении короткой оси полосок.

Исследования спектров ФМР проводились с помощью магнитно-резонансного силового микроскопа, изготовленного в ИФМ РАН на базе вакуумного сканирующего зондового микроскопа „Solver HV“ (компания „НТ-МДТ“, Зеленоград). В качестве зондового датчика использовался стандартный кантилевер NSG-1 (резонансная частота $9.2\ \text{kHz}$, жесткость консоли $0.03\ \text{N/m}$), на который наклеивалась частица SmCo -магнита размером $20\ \mu\text{m}$. Для СВЧ-накачки образцов использовался перестраиваемый генератор „SPS-20“ (компания „Спектран“, Саратов). Образец располагался на планарной закороченной полосковой линии в пучности магнитного СВЧ-поля. При этом магнитная составляющая СВЧ-поля накачки была направлена вдоль короткой оси полосок. Внешнее подмагничивающее поле \mathbf{H} создавалось с помощью электро-

магнита постоянного тока (с рабочим диапазоном полей до 3 кОе) и было направлено вдоль длинной оси полосок. Измерения проводились в вакууме (10^{-3} mbar), при этом добротность механических колебаний кантилевера составляла 950.

В эксперименте в качестве спектров ФМР регистрировались зависимости амплитуды колебаний кантилевера от внешнего подмагничивающего поля. Измерения проводились при различных расстояниях между зондом и образцом (L). Накачка образца производилась на частоте $f = 5.8$ GHz. Мощность накачки составляла 20 dBm. СВЧ-поле модулировалось по амплитуде (глубина модуляции 100%) на резонансной частоте кантилевера. Наличие модулированного СВЧ-поля в рабочем промежутке микроскопа приводит к появлению электростатического притяжения (сила F_c) между образцом и кантилевером [18], которое вызывает возбуждение колебаний кантилевера (колебания, вызванные немагнитной силой). Магнитная же сила F_m , возникающая между образцом и зондом в условиях ФМР, зависит от положения зонда относительно образца и может быть как сонаправлена, так и направлена противоположно F_c . Если F_c и F_m сонаправлены, то это приводит к возрастанию амплитуды колебаний кантилевера в условиях ФМР, в противоположном случае в резонансе происходит уменьшение амплитуды колебаний кантилевера. Полученные в эксперименте МРСМ-спектры приведены на рис. 1, *a*.

Из этого рисунка видно, что, когда зонд располагается высоко над образцом ($L = 5 \mu\text{m}$, кривая 1 на рис. 1, *a*), в спектре наблюдается широкий провал вблизи значения поля 600 Ое. При уменьшении расстояния L до $2 \mu\text{m}$ (кривая 2 на рис. 1, *a*) наблюдается сдвиг резонансного поля в область 625 Ое и появление пика в области 575 Ое. При дальнейшем сближении зонда и образца на расстояние $L = 0.5 \mu\text{m}$ (кривая 3 на рис. 1, *a*) положительный пик возрастает и сдвигается в область поля 550 Ое, а провал сдвигается в область поля 630 Ое.

На рис. 1, *b* приведено МРСМ-изображение участка массива микрополосок, полученное при сканировании над образцом. Частота накачки составляла 5.8 GHz, подмагничивающее поле 630 Ое, расстояние между зондом и образцом $0.5 \mu\text{m}$. При этом колебания кантилевера, вызванные немагнитной силой, компенсировались посредством подачи противофазного напряжения на пьезовибратор держателя зондового датчика. Из рис. 1, *b* видно, что области ФМР (максимумы амплитуды колеба-

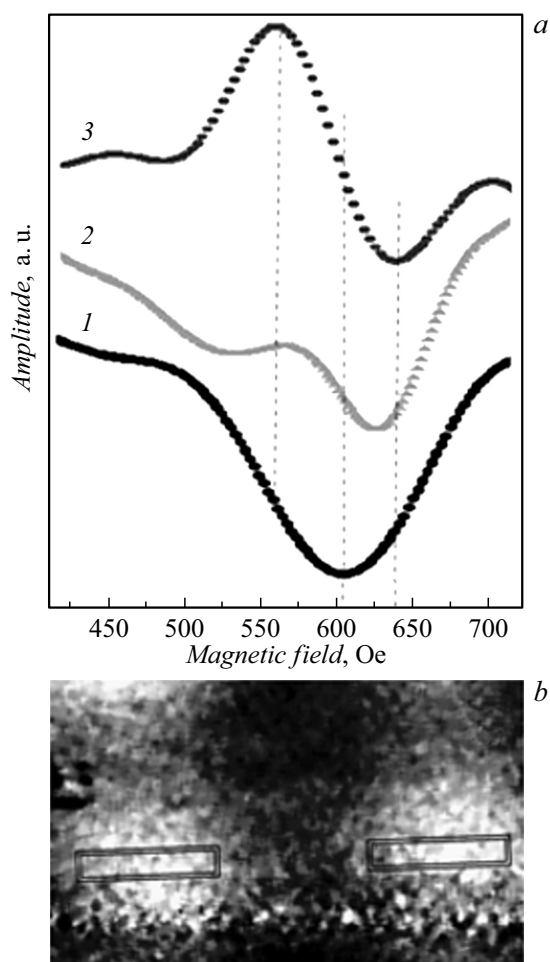


Рис. 1. *a* — МРСМ-спектры ФМР микрополосок NiFe, зарегистрированные при различных расстояниях между зондом и образцом. *1* — расстояние зонд–образец $L = 5 \mu\text{m}$, *2* — $L = 2 \mu\text{m}$, *3* — $L = 0.5 \mu\text{m}$. Спектры сдвинуты по вертикальной оси для удобства сравнения. *b* — МРСМ-изображение участка массива микрополосок на частоте 5.8 GHz в подмагничивающем поле 630 Oe. Контурными линиями показаны положения микрополосок. Размер кадра $10 \times 6 \mu\text{m}$.

ний кантилевера) расположены непосредственно над микрополосками пермаллоя.

Наблюдаемое изменение МРСМ-спектра связано с влиянием поля зонда на резонанс микрополосок. Выражение для силы взаимодействия между зондом и образцом, которая вызывает колебания зонда, можно записать следующим образом:

$$\mathbf{F} = -\nabla \int_{V_{sample}} (\mathbf{m} \cdot \mathbf{h}_p) dV, \quad (1)$$

где \mathbf{m} — квазистатическая компонента намагниченности образца, которая при СВЧ-накачке осциллирует с частотой, равной резонансной частоте кантилевера [15–18], \mathbf{h}_p — магнитное поле зонда. Раскачка кантилевера происходит за счет z -компоненты силы

$$F_z = - \int_{V_{sample}} m_x \frac{\partial h_{px}}{\partial z} dV, \quad (2)$$

знак которой определяется знаком производной

$$h'_{px} = \frac{\partial h_{px}}{\partial z}. \quad (3)$$

В простейшей модели, соответствующей эксперименту, зонд можно представить в виде шара [19], однородно намагниченного вдоль оси x (рис. 2).

При этом пространство над образцом разбивается на несколько областей (обозначены на рисунке буквами A и B), где продольные компоненты поля зонда h_{px} и градиента поля h'_{px} имеют разный знак. Смена знака x -компоненты магнитного поля происходит на границе (показана штрихпунктирной линией на рис. 2), определяемой условием

$$x = \pm \frac{z}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

При этом угол раствора области между штрихпунктирными линиями равен 71° . Смена знака градиента магнитного поля происходит на границе (показана штриховой линией на рис. 2), определяемой условием

$$x = \pm \frac{z}{2}. \quad (5)$$

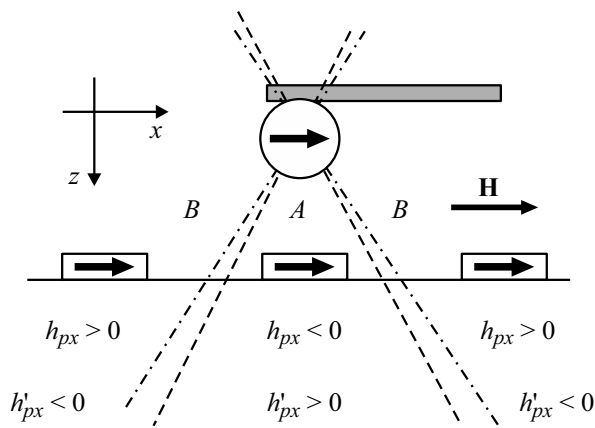


Рис. 2. Структура магнитного поля зонда над массивом микрополосок. Штрихпунктирными линиями показано сечение конических областей с различным знаком проекции поля зонда h_{px} , а штриховыми линиями — с различным знаком градиента h'_{px} .

Угол раствора области между штриховыми линиями равен 54° (рис. 2).

Магнитное поле зонда действует на образец и меняет условия ФМР. Действительно, резонансную частоту основной моды колебаний намагниченности ферромагнитной микрополоски можно оценить согласно формуле Киттеля [20,21] как

$$f = \frac{\gamma}{2\pi} \sqrt{((H_x + h_{px}) + (N_{zz} - N_{xx})M_s)((H_x + h_{px}) + (N_{yy} - N_{xx})M_s)}, \quad (6)$$

где N_{xx}, N_{yy}, N_{zz} — главные значения тензора размагничивающих факторов полоски, M_s — намагниченность насыщения пермаллоя, γ — гиромагнитное отношение. Величины H_x и h_{px} — соответственно проекции внешнего подмагничивающего поля и магнитного поля зонда на ось x (совпадает с направлением вдоль длинной стороны полосок). Из (6) видно, что поле зонда приводит к сдвигу резонансной частоты полоски, знак которого определяется знаком продольной компоненты h_{px} . Поэтому в соответствии с пространственной структурой поля зонда резонансная частота полосок, расположенных в областях B , увеличивается (и, следовательно, уменьшается резонансное поле), по-

сколькx $h_{px} > 0$, в то время как резонансная частота полосок внутри области A уменьшается (и, следовательно, увеличивается резонансное поле), поскольку $h_{px} < 0$. Кроме того, в областях A и B различный знак имеет также и градиент h'_{px} . Соответствующим образом меняется и направление магнитной силы между образцом и кантилевером. Взаимодействие зонда с полосками, расположенными в областях B , дает положительный вклад в раскачивающую силу и увеличение амплитуды колебаний кантилевера, а взаимодействие с полосками, расположенными в области A , — отрицательный и уменьшение амплитуды колебаний.

На больших расстояниях L зонд взаимодействует сразу с несколькими полосками, находящимися в разных резонансных условиях, что приводит к формированию широкого резонансного пика (кривая I на рис. 1, a). При уменьшении расстояния L количество полосок, попадающих в область A , уменьшается, и при расстоянии $L = 0.5 \mu\text{m}$ в области A оказывается лишь одна полоска, дающая пик с резонансным полем 630 Ое. Остальные близлежащие полоски оказываются расположенными в областях B и формируют положительный отклик с резонансным полем 550 Ое.

Таким образом, методом магнитно-резонансной силовой спектроскопии были проведены исследования ферромагнитного резонанса массива пермалловых микрополосок. Показано, что структура спектров ФМР существенно зависит от расстояния между зондом и образцом. При расстоянии $5 \mu\text{m}$ наблюдался один провал, вклад в который вносит несколько полосок пермаллоя. При уменьшении расстояния наблюдалось формирование двух резонансных пиков, один из которых положительный, а другой отрицательный. Данные резонансные отклики связаны с двумя группами частиц, одна из которых лежит в области, где градиент магнитного поля зонда положителен, а другая — в области, где градиент магнитного поля зонда отрицателен. При малых расстояниях между зондом и образцом удалось зарегистрировать ФМР от одиночной микрополоски.

Авторы выражают благодарность В.В. Рогову, С.Н. Вдовичеву, А.Н. Резнику за помощь при проведении экспериментов, а также А.П. Володину и А.А. Фраерману за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-12-10254).

Список литературы

- [1] *Žutić I., Fabian J., Das Sarma S.* // *Rev. Mod. Phys.* 2004. V. 76. P. 323–410.
- [2] *Demidov V.E., Demokritov S.O., Rott K., Krzysteczko P., Reiss G.* // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 232503.
- [3] *Krawczyk M., Grundler D.* // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2014. V. 26. P. 123202.
- [4] *Duerr G., Thurner K., Topp J., Huber R., Grundler D.* // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. P. 227202.
- [5] *Tacchi S., Botters B., Madami M., Kłos J.W., Sokolovsky M.L., Krawczyk M., Gubbiotti G., Carlotti G., Adeyeye A.O., Neusser S., Grundler D.* // *Phys. Rev. B.* 2012. V. 86. P. 014417.
- [6] *Zhang V.L., Lim H.S., Lin C.S., Wang Z.K., Ng S.C., Kuok M.H., Jain S., Adeyeye A.O., Cottam M.G.* // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 143118.
- [7] *Jain S., Kostylev M., Adeyeye A.O.* // *Phys. Rev. B.* 2010. V. 82. P. 214422.
- [8] *Горев Р.В., Скороходов Е.В., Миронов В.Л.* // *ФТТ.* 2016. Т. 58. В. 11. С. 2135–2139.
- [9] *Skorohodov E.V., Gorev R.V., Yakubov R.R., Demidov E.S., Khivintsev Yu.V., Filimonov Yu.A., Mironov V.L.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. V. 424. P. 118–121.
- [10] *Sapozhnikov M.V., Budarin L.I., Demidov E.S.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 2018. V. 449 P. 68–76.
- [11] *Вертиц Дж., Болтон Дж.* Теория и практические приложения метода ЭПР. М.: Мир, 1975. 552 с.
- [12] *Rugar D., Yannoni C.S., Sidles J.A.* // *Nature.* 1992. V. 360. P. 563–566.
- [13] *Züger O., Rugar D.* // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63. P. 2496–2498.
- [14] *Zhang Z., Hammel P.C., Wigen P.E.* // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 68. P. 2005–2007.
- [15] *Chia H.-J., Guo F., Belova L.M., McMichael D.* // *Phys. Rev. B.* 2012. V. 86. P. 184406.
- [16] *Guo F., Belova L.M., McMichael D.* // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110. P. 017601.
- [17] *Obukhov Yu., Pelekhov D.V., Kim J., Banerjee P., Martin I., Nazaretski E., Movshovich R., An S., Gramila T.J., Batra S., Hammel P.C.* // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. P. 197601.
- [18] *Klein O., de Loubens G., Naletov V.V., Boust F., Guillet T., Hurdequint H., Leksikov A., Slavin A.N., Tiberkevich V.S., Vukadinovic N.* // *Phys. Rev. B.* 2008. V. 78. P. 144410.
- [19] *Миронов В.Л., Фраерман А.А., Грибков Б.А., Ермолаева О.Л., Климов А.Ю., Гусев С.А., Нефедов И.М., Шерешевский И.А.* // *ФММ.* 2010. Т. 110. № 7. С. 708–734.
- [20] *Боков В.А.* Физика магнетиков. СПб.: Невский диалект, 2002. 271 с.
- [21] *Гуревич А.Г., Мелков Г.А.* Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.