

## ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ГЕКСАГОНАЛЬНОМ МАССИВЕ НАНОПРОВОЛОК ИЗ ПЕРМАЛЛОЯ В НАНОПОРАХ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ С ПОДЛОЖКОЙ ИЗ АЛЮМИНИЯ

### Введение

В последнее время ведется поиск композитных материалов, которые могли бы использоваться как элементы памяти с большой плотностью хранения и большим быстродействием. Таким перспективным материалом является магнитные нанопроволоки. Исследование их магнитных свойств является важной задачей для дальнейшей разработки устройств магнитной памяти. Определенная заинтересованность есть в нанопроволоках, которые изготовлены методом осаждения в нанопорах оксида алюминия, так как с помощью этого метода обеспечивается наилучшая упорядоченность нанопроволок в массиве [1].

Ранее уже были проведены исследования магнитных свойств массивов нанопроволок [1 – 5], осажденных в нанопорах оксида алюминия. Например, в [1 – 4] авторы исследовали проволоки из никеля, где большой вклад в суммарное поле магнитной анизотропии вносит поле кристаллографической анизотропии. Однако мало изучены [5] материалы, где поле кристаллографической анизотропии пренебрежимо мало (например, пермаллой), и вклад других полей магнитной анизотропии в суммарное поле магнитной анизотропии становится значительным.

Цель работы – исследование полей анизотропии в таких нанопроволочных структурах.

### Теоретические сведения

В данной работе исследованы магнитные свойства  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (пермаллой) нанопроволок методом ферромагнитного резонанса (ФМР). Образец представляет собой двумерный массив нанопроволок с гексагональной симметричной упорядоченной структурой. Такая структура изготовлена способом электроосаждения в нанопорах оксида алюминия на предварительно анодированной алюминиевой подложке (рис. 1). Расстояние между центрами нанопроволок  $D = 105 \text{ нм}$ , диаметр  $d = 40 \text{ нм}$ .

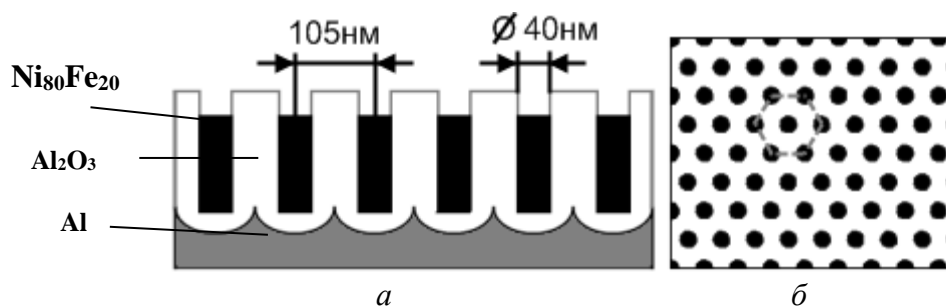


Рис. 1. Массив нанопроволок: *a* – поперечный разрез; *б* – вид сверху

Условие ФМР в нанопроволочных структурах описывается выражением Смита – Бельерса [3, 6]:

$$\frac{\omega_{res}}{\gamma} = \sqrt{H_{res} \cos(\theta - \theta_H) + H_a \cos^2(\theta)} \cdot \sqrt{H_{res} \cos(\theta - \theta_H) + H_a \cos(2\theta)} \quad (1)$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение,  $\theta$  – угол между осью нанопроволок и вектором магнитного момента,  $\theta_H$  – угол между осью нанопроволок и вектором внешнего магнитного поля,  $\omega_{res}$  – резонансная частота,  $H_{res}$  – резонансное магнитное поле. Суммарное поле магнитной анизотропии  $H_a$  для нанопроволок из пермаллоя можно записать, учитывая лишь значимые по величине магнитные поля анизотропии:

$$H_a = H_{dem} + H_{dip} + H_i \quad (2)$$

Для наноразмерных структур значительным является вклад поля поверхностной анизотропии  $H_{sur}$ . Также при изучении магнитных структур, содержащих материалы с разными коэффициентами уширения, следует обратить внимание на поле внешних напряжений. Учитывая, что в структуре исследуемых нанопроволок содержится несколько материалов (рис. 1), поле внешних напряжений  $H_{st}$  вместе с полем  $H_{sur}$  включено в выражение (2) в виде

$$H_i = H_{sur} + H_{st} \quad (3)$$

В выражении (2) сумму размагничивающего поля  $H_{dem}$  и дипольного взаимодействия  $H_{dip}$  можно записать в виде

$$H_{dem} + H_{dip} = 2\pi M_s (1 - 3P), \quad (4)$$

где фактор заполнения  $P = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{d}{D}\right)^2$  определяется из геометрии массива нанопроволок;

$M_s$  – намагниченность насыщения (для пермаллоя  $M_s=807$  Гс при  $T=300$  К).

Таким образом, проведение эксперимента дало возможность определить  $H_a$ , и  $\gamma$ . Затем с помощью формул (1) – (4) вычислены значения полей анизотропии  $H_{dem}+H_{dip}$  и  $H_{sur}+H_{st}$ .

### Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования ФМР образца были проведены в диапазоне частот 8 – 12 ГГц и 30 – 40 ГГц при комнатных температурах. В эксперименте использовались СВЧ-модули на соответствующие рабочие диапазоны. Каждый модуль состоит из отрезка волновода с крепежным фланцем, согласующего трансформатора и резонатора. Элементом связи между трансформатором и резонатором является диафрагма с отверстием связи. Она также является одной из стенок резонатора. В качестве генератора и детектора СВЧ-сигнала использовался векторный анализатор цепей Agilent N5230A, который позволяет определить резонансную частоту во всем рабочем диапазоне резонатора.

Образец был помещен в СВЧ резонатор таким образом, чтобы было возможным провести измерения в двух ориентациях: нанопроволоки направлены вдоль внешнего магнитного поля  $H_{res}$ , затем перпендикулярно  $H_{res}$ . Эксперимент осуществлялся следующим образом: при фиксированной частоте электромагнитного излучения  $\omega_{res}$  постепенно увеличивалось внешнее магнитное поле до наступления резонанса при поле  $H_{res}$  (рис. 2).

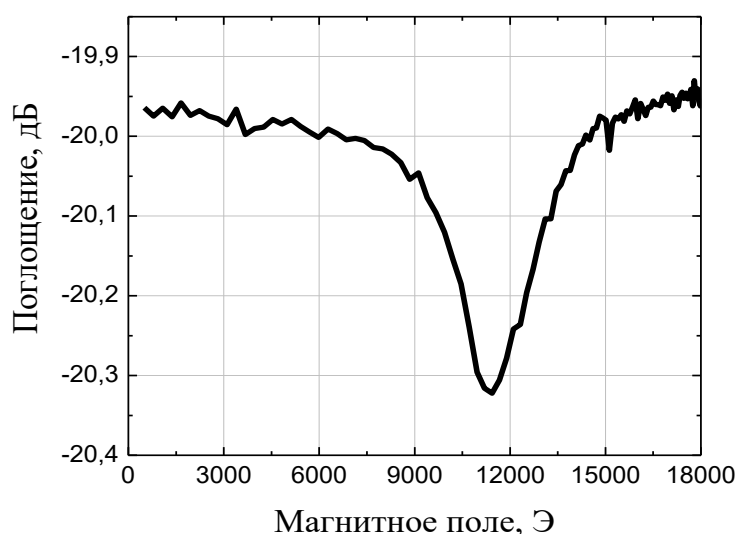


Рис. 2. Ферромагнитный резонанс в  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  нанопроволоках на частоте  $\omega_{res} = 36 \text{ ГГц}$

С увеличением резонансной частоты  $\omega_{res}$  увеличивалось резонансное поле  $H_{res}$ . В диапазоне частот  $\omega_{res} = 7 - 12 \text{ ГГц}$  точки ФМР располагались вблизи линии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Скорее всего, это свидетельствует о том, что намагниченность образца при полях менее  $6 \text{ кЭ}$  была в ненасыщенном состоянии, и получить линейную зависимость резонансной частоты от резонансного магнитного поля в ненасыщенном состоянии намагниченности не удалось. Поэтому результаты исследования ФМР в диапазоне  $\omega_{res} = 7 - 12 \text{ ГГц}$  в работе не представлены. Однако в магнитных полях более  $6 \text{ кЭ}$  (диапазон  $\omega_{res} = 30 - 40 \text{ ГГц}$ ) намагниченность переходит в состояние насыщения. В этом случае наблюдалась закономерная (линейная) зависимость резонансной частоты от магнитного поля  $H_{res}$ . Экспериментальные точки ФМР для ориентаций  $H_{res}$  перпендикулярно и параллельно нанопроволокам представлены на рис. 3.

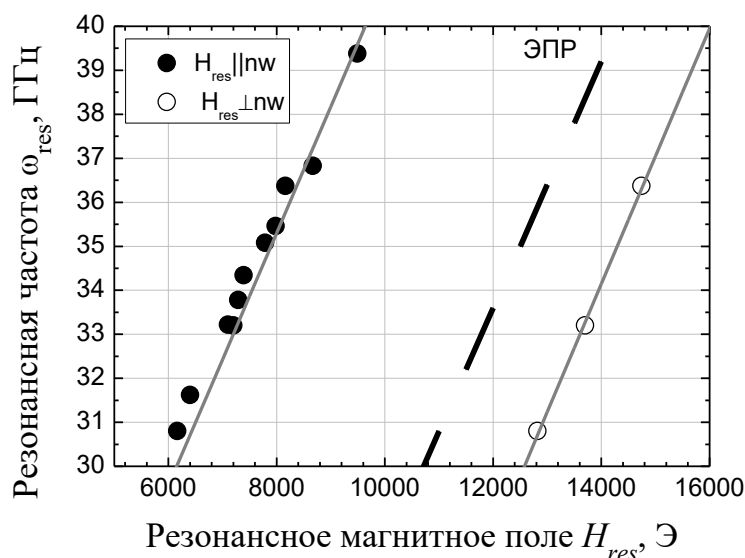


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты электромагнитного излучения  $\omega_{res}$  от резонансного магнитного поля  $H_{res}$ :  $H_{res}$  вдоль нанопроволок (nw) (●) и  $H_{res}$  перпендикулярно нанопроволокам (○)

Из рис. 3 видно, что экспериментальные точки ФМР хорошо аппроксимируются функцией (1). Из эксперимента и (1) найдено суммарное поле магнитной анизотропии для данной структуры  $H_a = 3974 \text{ Э}$ . Таким образом, сумма магнитных поля дипольного взаимодействия и размагничивающего поля  $H_{dip} + H_{dem}$  составила  $3068 \text{ Э}$ , а сумма магнитных поля внешних напряжений и поля поверхностной анизотропии  $H_i = 906 \text{ Э}$ . Также экспериментом определено (рис. 3) гиромагнитное отношение для данной структуры  $\gamma = 2,87 \cdot 10^6 \text{ Гц/Э}$ . Можно заметить, что полученное значение  $\gamma$  меньше гиромагнитного отношения объемного пермаллоя. Это, наиболее вероятно, объясняется слабым магнитным взаимодействием между атомами магнитного вещества, так как структура является наноразмерной.

В дополнение к экспериментальному исследованию ФМР проведен расчет и эксперимент зависимости ФМР (резонансного поля  $H_{res}$ ) от угла между полем  $H_{res}$  и осью нанопроволок при  $\omega_{res} = 36.37 \text{ ГГц}$ .

Рис. 4 детально показывает, каким образом изменяется ФМР при повороте  $H_{res}$  на угол  $\theta_H = 0.. \pm 90^\circ$  относительно оси нанопроволок. На рис. 4 видно хорошее согласование экспериментальных данных и данных, полученных выражением (1). Точки  $\theta_H = 0^\circ$  и  $\theta_H = \pm 90^\circ$  соответствуют случаю, когда  $H_{res}$  параллельно нанопроволокам (рис. 3) и  $H_{res}$  перпендикулярно им (рис. 3).

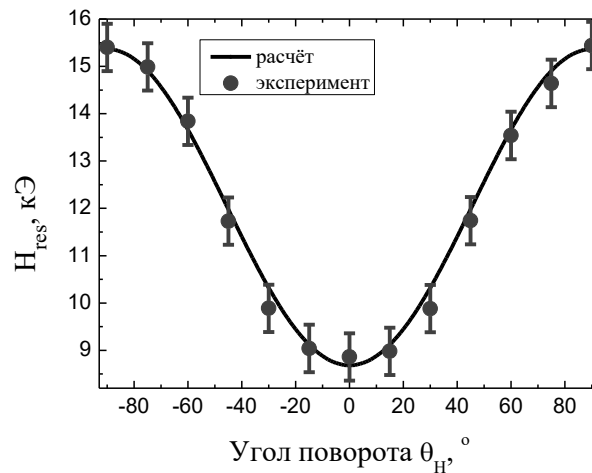


Рис.4. Зависимость ФМР (резонансного поля  $H_{res}$ ) от угла между полем  $H_{res}$  и осью нанопроволок

### Выводы

Проведены экспериментальные исследования ферромагнитного резонанса гексагонально симметричной упорядоченной структуры массива  $Ni_{80}Fe_{20}$  нанопроволок, осажденных в нанопорах оксида алюминия с расстоянием между центрами нанопроволок 105 нм и диаметром 40 нм. В результате исследований:

- определена величина суммарного поля магнитной анизотропии  $H_a=3974$  Э, из которой вычислено значение суммы поля дипольного взаимодействия и размагничивающего поля ( $H_{dip}+H_{dem}=3068$  Э), а также значение суммы полей поверхностной анизотропии и поля внешних напряжений ( $H_{sur}+H_{st}=906$  Э);

- экспериментально получено значение гиромангнитного отношения  $\gamma = 2,87 \cdot 10^6$  Гц/Э для данного материала. Такое значение оказалось меньше, чем для объемного пермаллоя  $\gamma = 3,05 \cdot 10^6$  Гц/Э, что можно объяснить малым взаимодействием между атомами магнитного материала в исследуемой наноразмерной структуре;

- экспериментальное измерение зависимости ферромагнитного резонанса от угла между приложенным внешним магнитным полем и осью нанопроволок показало правомерность применения расчетной модели для данного объекта исследований.

Автор выражает благодарность проф. Мериакри В. В. за предоставленный образец для исследований, а также Недуху С.В. и проф. Тарапову С.И. за помощь в написании данной работы.

**Список литературы:** 1. Tannous, C., Ghaddar, A., Gieraltowski J. Angular Preisach analysis of Hysteresis loops and FMR lines of ferromagnetic nanowire arrays // arXiv.org. 2013 1306.2216. 2. Hashim, A.A. Nanowires – Fundamental Research. Rijeka: InTech, 2011. 564 p. 3. Tannous, C., Ghaddar, A., Gieraltowski, J. Temperature dependent anisotropy and elastic effects in ferromagnetic nanowire arrays // arXiv.org. 1104.5348 v.2. 4. Ebels, U., Duvail, J.L., Wigen, P.E. Ferromagnetic resonance studies of Ni nanowire arrays // Phys. Rev. B, Vol. 64, 144421. 5. Ababei, G., Popa, A., Lupu, N. Ferromagnetic resonance of NiFe/Cu multilayered nanowires // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2011. – Vol. 13, №. 4. – P. 405 – 408. 6. Вонсовский, С.В. Ферромагнитный резонанс. – М. : Гос. изд-во физ-мат. лит, 1961. – 343 с.

Институт радиофизики и электроники  
имени А.Я. Усикова НАН Украины

Поступила в редколлегию 17.08.2014