

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ПОРИСТОМ КРЕМНИИ С НИКЕЛЕВЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

М. С. Русецкий¹, Н. М. Казючиц¹, В. Г. Баев²
В. П. Бондаренко³, А. Л. Долгий³

¹Белорусский государственный университет,

²НЦ ФЧВЭ БГУ,

³Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,

ВВЕДЕНИЕ

Пористый кремний представляет уникальные возможности для создания и структурирования гетероматериалов на его основе. Это связано, прежде всего, с огромным разнообразием морфологий этого материала и широким диапазоном характерных размеров пор. Так, использование низкоомных подложек *n*-типа позволяет получать цилиндрические поры большой глубины с диаметром в несколько десятков нанометров, ориентированные перпендикулярно поверхности подложки. Наполнение таких пор ферромагнитным материалом, например никелем, позволяет получить упорядоченный массив ферромагнитных нанопроволок.

Массивы ориентированных нанопроволок в настоящее время представляют большой интерес как с точки зрения изучения магнитного упорядочения в гетерогенных системах, так и с прикладной точки зрения, как возможные материалы для создания сенсоров и элементов магнитных запоминающих устройств [1]. Большинство работ по этой тематике посвящено изучению пористых мембран анодированного оксида алюминия, заполненного различными магнитными материалами [2, 3]. Магнитным же наполнителям в пористом кремнии посвящено значительно меньшее число статей [4]. Целью настоящей работы было исследование особенностей ферромагнитного резонанса в пористом кремнии, заполненном никелем.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

В работе использовались образцы пористого кремния, полученные методом электрохимического травления в растворе $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$ при плотности тока 10 мА/см^2 . В качестве подложки использовался монокристаллический кремний *n*-типа с удельной проводимостью $0,01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Глубина пористого слоя составляла $\sim 10 \text{ мкм}$. Пористость образца определялась гравиметрическим способом на контрольных образцах. В экспериментах использовались образцы с пористостью 50 и 80 %. Наполнение образцов никелем осуществлялось электрохимическим методом из раствора $\text{NiSO}_4:\text{NiCl}_2:\text{H}_3\text{BO}_3$ при плотности тока $3,5 \text{ мА/см}^2$. Одновременно с заполнением пор происходило осаждение никелевой пленки на поверхности образца, которая в дальнейшем удалялась химическим травлением.

Спектры ферромагнитного резонанса (ФМР) регистрировались на спектрометре электронного парамагнитного резонанса на частоте $9,32 \text{ ГГц}$. Исследуемые образцы помещались в центр резонатора в пучность магнитной компоненты СВЧ поля. Ориентация образца во внешнем магнитном поле определялась полярным углом θ , отсчитанным от нормали к плоскости образца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 приведено РЭМ изображение поверхности образца после химического травления с целью удаления поверхностной пленки никеля. Как показывает энергодисперсионный рентгеновский микроанализ, светлые участки на поверхности соответствуют металлическому никелю, в то время как на темных участках содержание никеля близко к порогу чувствительности метода. Это свидетельствует о том, что на исследованных образцах не все поры оказываются заполненными никелем.

В спектрах ФМР всех исследованных образцов наблюдалась одна широкая линия. Характерные спектры образца с пористостью 50 % показаны символами на рисунке 2 для двух различных ориентаций образца относительно направления магнитного поля. На этом же рисунке сплошными линиями показаны результаты аппроксимации спектров линией гауссовой формы. Из рисунка видно, что величина резонансного поля существенно зависит от угла θ между нормалью к образцу и направлением магнитного поля, т. е. образцы обладают существенной магнитной анизотропией. Для определения типа анизотропии были проведены исследования зависимости величины резонансного поля от угла θ , показанные на рисунке 3.

Максимумы на ориентационных зависимостях, соответствующие направлениям легкого намагничивания, указывают на наличие одноосной магнитной анизотропии типа «легкая ось» вдоль оси нанопроволок для образцов с малой пористостью. В образцах с пористостью 80 % наблюдается анизотропии типа «легкая плоскость».

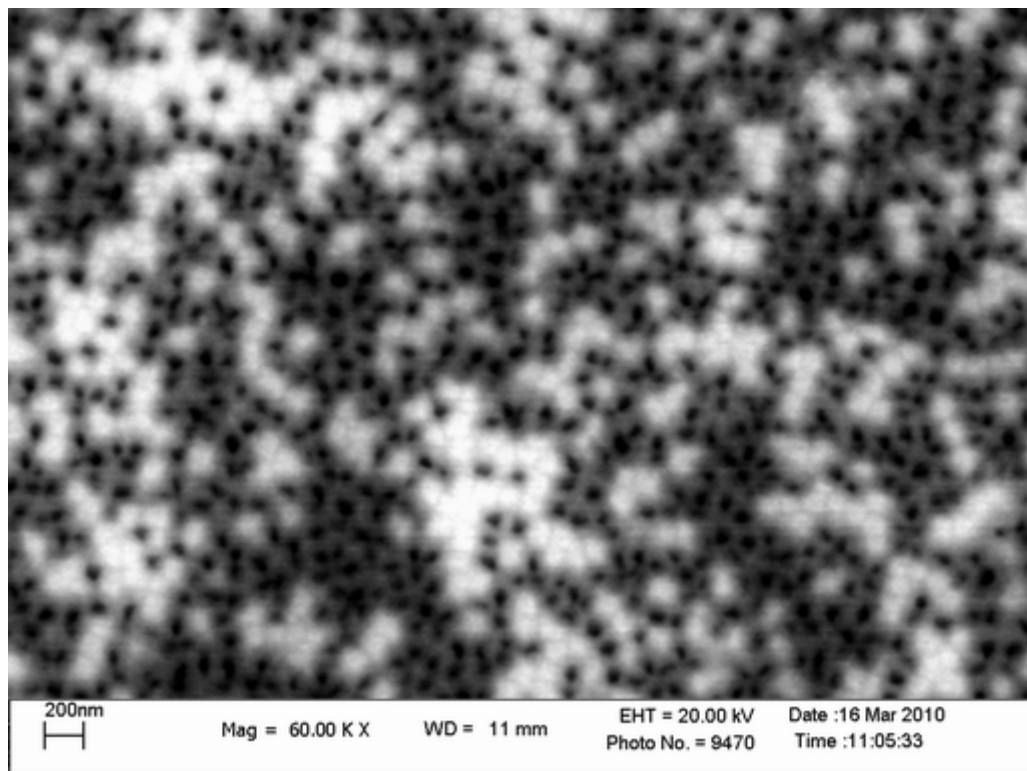


Рис. 1. РЭМ изображение поверхности образца после удаления никелевой пленки с поверхности

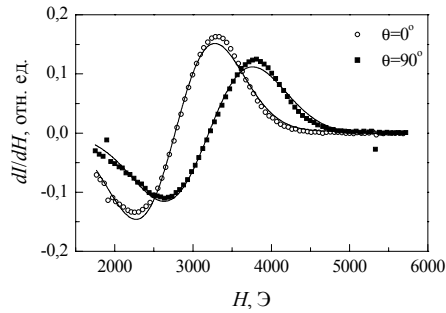


Рис. 2. Типичные спектры ФМР образца с пористостью 50 % при различной ориентации относительно направления магнитного поля

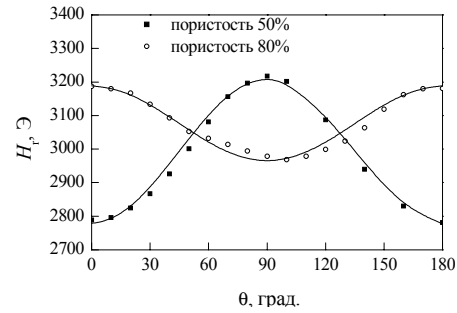


Рис. 3. Зависимость величины резонансного поля от угла θ для двух значений пористости. Сплошные линии – аппроксимация выражением (1)

Наблюдаемая в подобных системах анизотропия является в основном геометрической [5, 6] и существенно зависит от дипольного взаимодействия между нанопроволоками. Для оценки величины поля анизотропии и g -фактора экспериментальные зависимости аппроксимировались приближенным выражением из [7] для зависимости резонансного поля от угла θ :

$$H_r \approx \frac{2\pi f}{\gamma} + H_a \frac{(1 - 3 \cos^2 \theta)}{2} \quad (1)$$

где f – частота микроволнового поля, γ – гиромагнитное отношение, H_a – поле анизотропии.

Полученные значения составили $H_a = 290$ Э, $g = 2,19$ и $H_a = 150$ Э, $g = 2,21$ для образцов с пористостью 50 % и 80 %, соответственно. В обоих случаях величины g -фактора близки к значению, характерному для объемного никеля. В тоже время величина поля анизотропии значительно меньше поля анизотропии изолированной никелевой нанопроволоки, составляющей ~ 3 кЭ, что связано со значительной величиной взаимодействия между нанопроволоками.

Необходимо отметить, что согласно существующим моделям, основанным на приближении среднего поля [8], переход от анизотропии типа «легкая ось» к типу «легкая плоскость» должен происходить при пористости 33 %. В нашем случае такой переход происходит при существенно большей пористости исходных образцов. Наиболее вероятно что это связано с тем, что, как отмечалось выше, в процессе осаждения никеля происходит заполнение лишь части пор.

ВЫВОДЫ

Проведенные методом ФМР исследования показали, что образцы мезапористого кремния с никелевым наполнителем обладают одноосной магнитной анизотропией. Направление легкого намагничивания может быть ориентировано как перпендикулярно, так и параллельно к поверхности образца в зависимости от его пористости. Определены величины поля анизотропии и g -фактора, также зависящие от пористости образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rivasa J., Kazadi Mukenga Bantua A., Zaragozab G., Blancob M. C. and Lopez-Quintelab M. A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2002. V. 249. P. 220.
2. *Моргунов Р. Б., Дмиутриев А. И., Tanimoto Y., Kulkarni J. S., Holmes J. D., Kazakova O. L.* // ФТТ. 2008. V. 200. № 50. P. 1058.
3. *Lavín R., Denardin J. C., Escrig J., Altbir D., Cortés A., Gómez H.* // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. P. 103903.
4. *Rumpf K., Granitzer P., Polt P., Reichmann A., Krenn H.* // Thin Solid Films. 2006. V. 515. P. 716.
5. *Ramos C., Vazquez M.* // Physica B: Cond. Matter. 2004. V. 354. P. 195.
6. *Encinas-Oropesa A., Demand M., and Piraux L., Ebels U., Huynen I.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 6704.
7. *Carignan Louis-Philippe, Lacroix Christian, Ouimet Alexandre, Ciureanu Mariana, Yelon Arthur, and Ménard David* // J. Appl. Phys. 2007. V. 102. P. 023905.
8. *Encinas-Oropesa A., et al.* // Phys. Rev. B. 2001. V. 63. P. 104415.