

05

## Магнитная анизотропия массива Ni-нанопроволок в пористом кремнии

© М.С. Русецкий, Н.М. Казючиц, В.Г. Баев, А.Л. Долгий,  
В.П. Бондаренко

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

E-mail: rusetzky@bsu.by

Национальный центр физики частиц высоких энергий БГУ, Минск,

Беларусь

Белорусский государственный университет информатики

и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

E-mail: vitaly@bsuir.edu.by

Поступило в Редакцию 9 декабря 2010 г.

Методом ферромагнитного резонанса исследованы упорядоченные массивы никелевых нанопроволок, сформированные в матрице мезопористого кремния методом электрохимического осаждения. Показано, что образцы обладают одноосной магнитной анизотропией типа „легкая ось“ или „легкая плоскость“ в зависимости от пористости матрицы. Определены величины поля анизотропии и  $g$ -фактора.

Массивы ориентированных металлических нанопроволок 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]. В большинстве случаев такие массивы создаются путем заполнения диэлектрических пористых мембран анодного оксида алюминия различными магнитными материалами [2,3]. Магнитным же наполнителям в пористом кремнии

(ПК) посвящено меньшее число публикаций [4]. Пористый кремний является полупроводниковым материалом и представляет уникальные возможности для структурирования гетероматериалов на его основе. Так, использование сильнолегированных монокристаллических пластин кремния электронного типа проводимости позволяет получать поры большой глубины (100–300  $\mu\text{m}$ ) с диаметрами каналов пор в несколько десятков нанометров. Каналы пор при этом ориентированы строго перпендикулярно поверхности пластин. Наполнение таких пор ферромагнитным материалом, например никелем, делает возможным получение упорядоченного массива ферромагнитных нанопроволок с диаметрами, соответствующими диаметру каналов пор пористого кремния. Целью данной работы было исследование особенностей ферромагнитного резонанса в мезопористом кремнии, заполненном никелем.

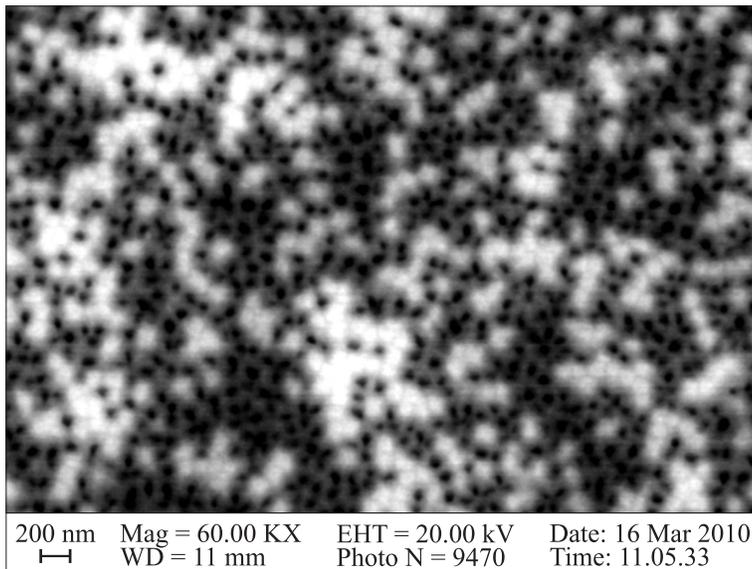
В работе использовались образцы пористого кремния, полученные методом электрохимического анодирования кремниевых пластин в растворе  $\text{HF} : \text{H}_2\text{O} : (\text{CH}_3)_2\text{СНОН} = 1 : 3 : 1$ . Кремниевые пластины имели электронный тип проводимости, легирующей примесью являлась сурьма и удельное сопротивление пластин составляло  $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$ . Заполнение образцов никелем осуществлялось электрохимическим методом из раствора  $\text{NiSO}_4 : \text{NiCl}_2 : \text{H}_3\text{BO}_3$  при плотности тока  $3.5 \text{ mA/cm}^2$ . Одновременно с заполнением пор происходило осаждение никелевой пленки на поверхности образца, которая в дальнейшем удалялась методом ионного распыления.

Спектры ферромагнитного резонанса (ФМР) регистрировались на спектрометре электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) „RadioPAN Se/X-2543“ в X-диапазоне на частоте 9.32 GHz. Исследуемые образцы помещались в центр резонатора в пучность магнитной компоненты СВЧ-поля. Ориентация образца во внешнем магнитном поле определялась полярным углом  $\theta$ , отсчитанным от нормали к плоскости образца.

Структура поверхности и сколов образцов изучалась с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455VP.

На рис. 1 приведено РЭМ-изображение скола исследованного образца ПК. Как видно из приведенного изображения, наполненные никелем поры имеют нитевидную структуру и ориентированы перпендикулярно плоскости образца. Глубина пористого слоя составляет  $\sim 10 \mu\text{m}$ . На этом же рисунке видна никелевая пленка, образующаяся на поверхности

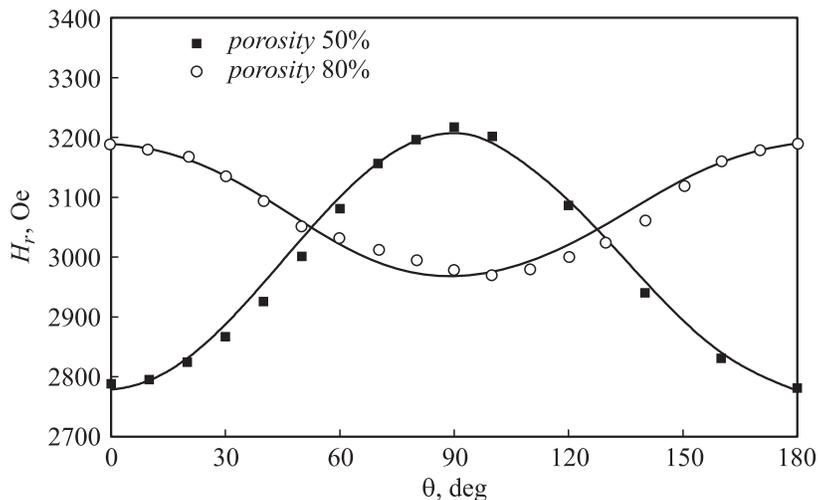




**Рис. 2.** РЭМ-изображение поверхности образца ПК после удаления никелевой пленки с поверхности.

Для определения типа анизотропии были проведены исследования зависимости величины резонансного поля от угла  $\theta$  для двух образцов ПК с пористостью 50% и 80%. Результаты исследований приведены на рис. 3. Максимумы на ориентационных зависимостях, соответствующие направлениям легкого намагничения, указывают на наличие одноосной магнитной анизотропии типа „легкая ось“ вдоль оси нанопроволок для образцов с пористостью 50%. В образцах с пористостью 80% наблюдается анизотропия типа „легкая плоскость“.

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



**Рис. 3.** Зависимость величины резонансного поля от угла между направлением постоянного магнитного поля и нормалью к поверхности образцов ПК с различной пористостью. Сплошные линии — аппроксимация выражением (1).

зависимости резонансного поля от угла  $\theta$ :

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

где  $f$  — частота микроволнового поля,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение,  $H_a$  — поле анизотропии. В результате аппроксимации были получены значения  $H_a = 290$  Oe,  $g = 2.19$  и  $H_a = 150$  Oe,  $g = 2.21$  для образцов с пористостью 50 и 80% соответственно. В обоих случаях величины  $g$ -фактора близки к значению, характерному для объемного никеля. В то же время величина поля анизотропии значительно меньше поля анизотропии изолированной никелевой нанопроволоки, составляющей  $\sim 3$  кОе, 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. Вероятно, это связано с тем, что, как отмечалось выше, в процессе осаждения никеля происходит частичное заполнение каналов пор мезопористой матрицы.

Проведенные измерения ФМР образцов пористого кремния, содержащих массивы ориентированных никелевых нанопроволок, показали, что при пористости образцов 50% наблюдается магнитная анизотропия типа „легкая ось“ вдоль оси нанопроволок. Для образцов с пористостью 80% характерна анизотропия типа „легкая плоскость“. Определены величины поля анизотропии и  $g$ -фактора для обоих типов образцов.

Настоящая работа выполнялась в рамках проекта Нанотех 4.15 ГКПНИ „Наноматериалы и нанотехнологии“.

## Список литературы

- [1] *Rivasa J., Kazadi Mukenga Bantua A., Zaragozab G., Blancob M.C., Lopez-Quintelab M.A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2002. V. 249. P. 220.
- [2] *Морзунов Р.Б., Дмугреев А.И., Tanimoto Y., Kulkarni J.S., Holmes J.D., Kazakova O.L.* // ФТТ. 2008. Т. 50. С. 1058.
- [3] *Lavin R., Denardin J.C., Escrig J., Altbir D., Cortés A., Gómez H.* // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. P. 103903.
- [4] *Granitzer P., Rumpf K.* // Materials. 2010. V. 3. P. 943.
- [5] *Ramos C., Vazquez M.* // Physica B: Cond. Matter. 2004. V. 354. P. 195.
- [6] *Encinas-Oropesa A., Demand M., Piraux L., Ebels U., Huynen I.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 6704.
- [7] *Louis-Philippe Carignan, Christian Lactoux, Alexandre Quimet, Mariana Ciureanu, Arthur Yelon, David Ménard* // J. Appl. Phys. 2007. V. 102. P. 023905.
- [8] *Encinas-Oropesa A., Demand M., Piraux L., Huynen I., Ebels U.* // Phys. Rev. B. 2001. V. 63. P. 104415.