

05;12

## **Магнитооптические и магнитные свойства нанокompозитов гранулированный кобальт — пористый кремний**

© А.Н. Виноградов, Е.А. Ганьшина, В.С. Гуцин,  
В.М. Демидович, Г.Б. Демидович, С.Н. Козлов, Н.С. Перов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва  
E-mail: kozlov@vega.phys.msu.su.

*Поступило в Редакцию 30 ноября 2000 г.*

Исследованы магнитооптические и магнитные свойства пористого кремния с внедренными электрохимически микрогранулами кобальта. Обнаружено, что нанокompозиты пористый кремний–кобальт проявляют ферромагнитные свойства. Для нанокompозитов с 10%-ным содержанием кобальта достигалась аномально большая величина экваториального эффекта Керра.

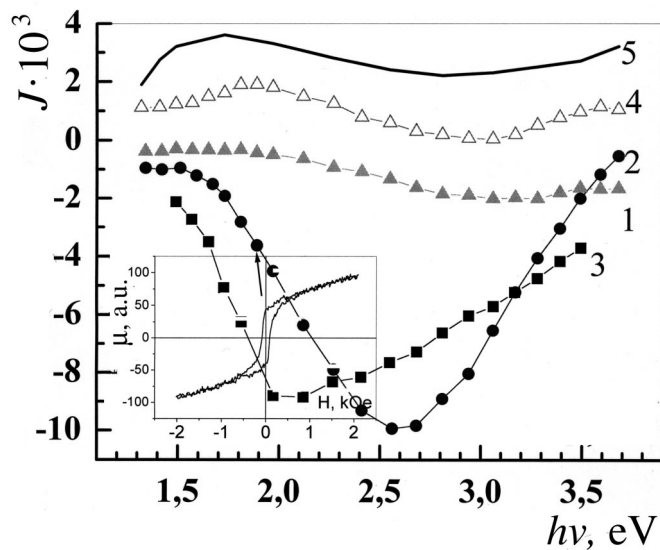
На современном этапе развития кремниевой микроэлектроники особенно актуальной становится проблема поиска путей расширения ее функциональных возможностей. В частности, новые перспективы разработки элементов оптоэлектроники и сенсорных устройств на базе кремниевой технологии появились после обнаружения интенсивностей люминесценции пористого кремния [1]. Менее изучены и пока совершенно не освоены магнитные и магнитооптические свойства материалов, совместимых с кремниевой технологией. В единичных работах предпринимались попытки исследовать магнитные свойства пористого кремния [2–4]. Авторы этих работ пришли к противоречивым выводам как об отсутствии особых магнитных свойств этого материала [2], так и об определенных признаках ферромагнетизма пористого кремния [3,4]. С другой стороны, известно, что низкоразмерные композиты ферромагнитный металл — диэлектрик характеризуются чрезвычайно интересными с точки зрения возможных практических приложений свойствами — гигантским магнитосопротивлением, спин-зависящей проводимостью, нелинейными магнитооптическими эффектами. В настоящей работе представлены результаты исследований магнитных и магнитооптических

свойств пленок нового композитного материала — пористого кремния с внедренными микрогранулами ферромагнитного кобальта.

Слой пористого кремния толщина  $5 \div 20 \mu\text{m}$  и пористостью 75–80% со средним размером пор в несколько нанометров создавались на поверхности (100) монокристаллического *p*-кремния методом анодирования в растворе HF-этанол (1:1) при плотности тока  $20 \text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Микрогранулы металла вносились в пористый слой электрохимически из спиртового раствора  $\text{CoCl}_2$ . Количество внесенного металла определялось по величине протекшего через границу Si-электролит заряда. Содержание кобальта в пористом кремнии вычислялось как отношение массы металла к массе оставшегося в пористом слое кремния. Магнитооптические (МО) свойства сформированных нанокompозитов исследовались с помощью экваториального эффекта Керра (ЭЭК), состоящего в изменении интенсивности отраженного от образца света при его намагничивании. МО спектры были измерены в области энергий световых квантов  $1.3 \div 3.8 \text{eV}$ , при угле падения  $70^\circ$ , в магнитном поле до  $2.5 \text{kOe}$ . Петли гистерезиса намагниченности измерялись с помощью вибрационного магнитометра-анизометра в полях до  $8 \text{kOe}$ . Все измерения проведены при комнатной температуре.

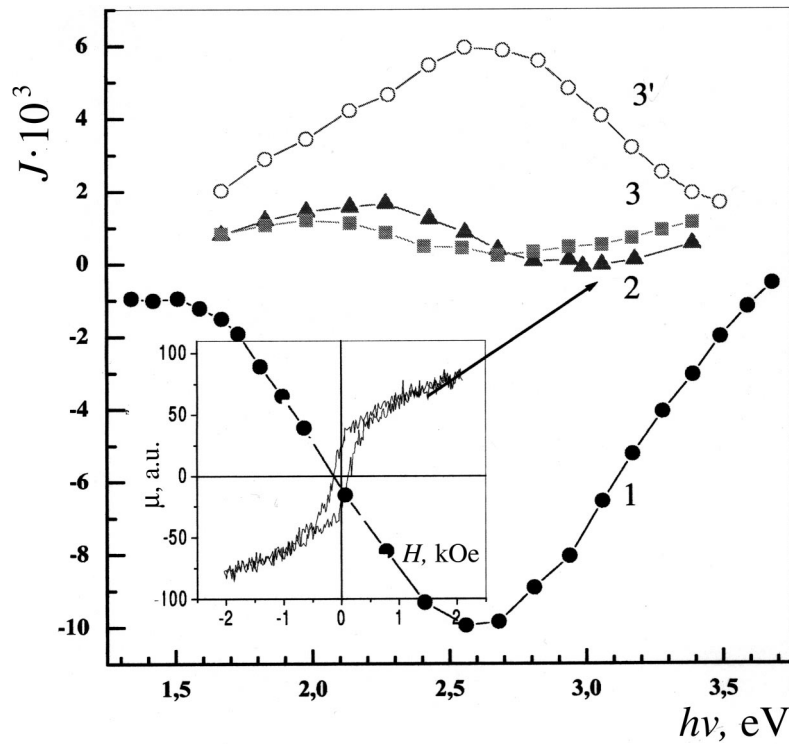
Обнаружено, что характер спектральных зависимостей ЭЭК  $\delta(h\nu)$  и величина эффекта сильно зависят от параметров нанокompозита (толщины пористого слоя и относительного содержания ферромагнитной компоненты). Из приведенных на рис. 1 (кривые 1–4) спектральных зависимостей ЭЭК для нанокompозитов, содержащих от 5 до 30% Co видно, что они существенно отличаются от спектра ЭЭК для чистого кобальта (кривая 5). Эти различия проявляются и в форме спектров, и в знаке эффекта для образцов с малым содержанием кобальта. Величина ЭЭК немонотонно зависит от концентрации металла. Для нанокompозитов определенных составов, в частности для ряда образцов с 10%-ным содержанием кобальта, достигалась аномально большая величина ЭЭК  $\delta \cong -10^{-2}$  при энергии квантов  $2.6 \text{eV}$  (для чистого кобальта абсолютные значения  $\delta$  в аналогичных условиях примерно в 5 раз меньше).

Величина МО эффекта сильно зависит от технологических условий получения пористого слоя и внедрения микрогранул металла. Незначительные изменения таких параметров, как плотность анодного тока, температура или концентрация электролита приводили к существенным вариациям МО свойств композита. В качестве примера на рис. 2 пред-



**Рис. 1.** Спектры ЭЖК нанокompозитов пористый кремний — кобальт с различным содержанием кобальта (1 — 5%; 2, 3 — 10%; 4 — 20%), а также массивного кобальта (5). На вставке — зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля для образца 2.

ставлены спектры ЭЖК для нескольких образцов 10% Co–Si, полученных в разных технологических циклах. Видно, что величина ЭЖК в области 2.5 eV изменяется для разных образцов от  $+6 \cdot 10^{-3}$  до  $-1 \cdot 10^{-2}$ , причем характер спектра может отличаться даже для разных участков одного и того же нанокompозита (кривые 3 и 3' на рис. 2). Для участков, близких к краю образца, спектр ЭЖК становится похожим на спектр чистого кобальта (рис. 1, кривая 3'). Это соответствует характерной для электрохимической методики тенденции к преимущественному осаждению металла вблизи края поверхности подложки. В то же время измерения объемных магнитных свойств, проведенные для различных образцов с одинаковым содержанием кобальта, но характеризующихся разными величинами ЭЖК, дали практически идентичные результаты. Представленные на рис. 1 и 2 (см. вставки) петли гистерезиса намагниченности показывают, что пленки Co–Si являются магнито жесткими с



**Рис. 2.** Спектры ЭЭК нанокompозитов пористый кремний — кобальт (10% Co), полученных в различных технологических циклах (1–3, 3'). Кривые 3 и 3' получены на одном и том же образце в центре пластины и на краю соответственно. На вставке — зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля для образца 2.

коэрцитивной силой  $\sim 100$  кОе и не намагничиваются до насыщения в полях до 2 кОе. Эти данные подтверждают, что при различных значениях МО эффекта средняя концентрация магнитной компоненты в объеме одинакова для всех образцов. Кажущееся противоречие между данными магнитного и МО методов, очевидно, связано с тем, что магнитные свойства композита определяются суммарным содержанием кобальта в

пористой матрице, тогда как магнитооптические — количеством и структурой микрогранул кобальта только в верхнем слое пористого кремния. Учитывая, что коэффициент поглощения света в нанокompозите на основе пористого кремния в исследованном спектральном диапазоне не менее  $10^3 \text{ cm}^{-1}$  [5], МО методы в этой спектральной области отражают характеристики верхнего слоя нанокompозита толщиной порядка или менее  $1 \mu\text{m}$ . Отсюда можно заключить, что распределение кобальта по толщине пористого слоя весьма неравномерное, — по-видимому, его концентрация растёт по мере приближения к внутренней границе пористого слоя.

Ранее похожие трансформации МО спектров при изменении технологических условий наблюдались для ультрадисперсного кобальта [6] и плёнок сплавов  $\text{Co}_x\text{Pd}_{1-x}$  с малым содержанием кобальта [7]. Наблюдавшиеся нами вариации зависимостей  $\delta(h\nu)$  типичны для микронеднородных магнитных сред при изменении таких параметров, как фактор объёмного заполнения композита ферромагнитной фазой, размеры и форма микрогранул ферромагнетика [6,8,9]. Отметим, что МО свойства композитов ферромагнетик–диэлектрик определяются оптическими параметрами как пористой матрицы, так и ферромагнитной компоненты [6], магнитооптическими параметрами ферромагнетика, а также микроструктурой образца, т.е. размерами и формой ферромагнитных частиц, а также их ближайшим окружением [7].

В целом проведенные исследования показали, что предложенным методом могут быть синтезированы нанокompозиты пористый кремний — ферромагнитный металл с необычными, интересными с точки зрения возможных практических приложений свойствами. Магнитные и магнитооптические методы исследования могут быть эффективным инструментом получения информации о микроструктуре и составе этих новых композитных материалов.

## Список литературы

- [1] *Canham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 10. P. 1046–1048.
- [2] *Perry C.Y., Lu F., Namavar F., Kalthoran N., Soret R.* // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. N 25. P. 3117–3119.
- [3] *Laiho R., Lahderanta E., Vlasenko L., Afanasiev M.* // J. Lumin. 1993. V. 57. N 1–6. P. 197–200.
- [4] *Компан М.Е., Шибанов И.Ю., Салонен Я.* // ФТТ. 1999. Т. 41. № 1. С. 54–56.

- [5] Тимошенко В.Ю., Константинова Е.А., Дмитрих Т. // ФТП. 1998. Т. 32. № 5. С. 613–619.
- [6] Никитин Л.В., Миронова Л.С., Литвинцев В.В., Каткевич В.В. // ФММ. 1991. № 2. С. 92–99.
- [7] Gan'shina E., Guschin V., Romanov I., Tselev A. // JMMM. 1998. V. 185. N 3. P. 258–265.
- [8] Gan'shina E., Kumaritova R., Bogoroditsky A., Kuzmichov M., Ohnuma S. // J. Magn. Soc. Japan. 1999. V. 23. P. 379–381.
- [9] Gan'shina E., Granovsky A., Guschin V., Kuzmichov M., Podrugin P., Kravetz A. // Physica A. 1997. V. 241. N 1. P. 45–51.