

## ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКОЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ В НАНОСТРУКТУРАХ Si-Ni

А. С. Сигов<sup>1</sup>, Е. В. Богатиков<sup>2</sup>, Г. А. Велигура<sup>3</sup>, М. В. Гречкина<sup>2</sup>,  
Б. М. Даринский<sup>1</sup>, А. П. Лазарев<sup>1</sup>, О. В. Овчинников<sup>1</sup>, М. С. Смирнов<sup>1</sup>,  
А. В. Тучин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> — ООО «Росбиоquant»

<sup>2</sup> — Воронежский государственный университет

<sup>3</sup> — ОАО «Научно-исследовательский институт электронной техники»

Поступила в редакцию 12.11.2012 г.

**Аннотация:** разработана технология формирования наноструктурированных магнитных материалов на кремниевой подложке со средним размером наноструктур  $\sim 25$  нм и узким распределением наноструктур по размерам. Установлен однодоменный характер намагничивания отдельных наноструктур. Осуществлено полностью оптическое намагничивание наноструктур циркулярно-поляризованным светом при комнатной температуре.

**Ключевые слова:** оптическое перемагничивание, магнитные наноструктуры, метод теории функционала плотности, магнитно-силовая микроскопия.

**Abstract:** technology of formation for nanostructured magnetic materials on silicon substrate with a mean nanostructures size of  $\sim 25$  nm and a narrow size distribution of these nanostructures was elaborated in the work. Single-domain magnetization character for some of the nanostructures was obtained. Completely optical magnetization of nanostructures was performed by circularly-polarized light at room temperature.

**Keywords:** optical magnetization, magnetic nanostructures, density functional theory, magnetic force microscopy.

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение скорости записи информации в последнее время связывают с полностью оптическим перемагничиванием циркулярно-поляризованным светом [1,2]. Эксперименты показывают, что время перемагничивания при этом составляет порядка нескольких десятков фемтосекунд, что существенно превышает быстродействие других способов записи информации. Для повышения плотности записи рассматриваются способы применения ближнепольных оптических зондов, позволяющие достигнуть разрешения порядка нескольких десятков нанометров [3-5]. Активно ведутся работы в области интегральной оптики по объединению на одном кристалле лазерных излучателей, ближнепольных зондов и быстродействующих оптических переключателей. Важной задачей является также поиск материалов для сверхбыстрой и сверхплотной записи информации.

---

© А. С. Сигов, Е. В. Богатиков, Г. А. Велигура, М. В. Гречкина, Б. М. Даринский, А. П. Лазарев, О. В. Овчинников, М. С. Смирнов, А. В. Тучин, 2013

В этой области можно выделить несколько направлений: создание упорядоченного массива магнитных наноструктур в диэлектрической матрице методами литографии и создание наноструктурированных материалов, обеспечивающих высокую плотность записи за счет малого размера наноструктур и однодоменного характера их намагничивания.

Целью работы являлось получение магнитных наноструктурированных пленок на кремниевой подложке, пригодных для сверхплотной записи информации методом полностью оптического переманчивания.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения на кремнии наноструктурированных магнитных слоев разработан метод, включающий три основные стадии: формирование базового гетерогенного слоя кремний+ферромагнитный металл (железо, никель, кобальт) на кремниевой подложке методом магнетронного распыления составной мишени; плазмохимическая обработка, сопровождающаяся плазмохимическими и топохимическими реакциями, в результате которых формируется наноструктурированная пленка, обладающая магнитным откликом; термическая обработка, обеспечивающая стабилизацию магнитных и структурных свойств пленки. Метод не содержит литографических процессов и полностью совместим с традиционными кремниевыми технологиями.

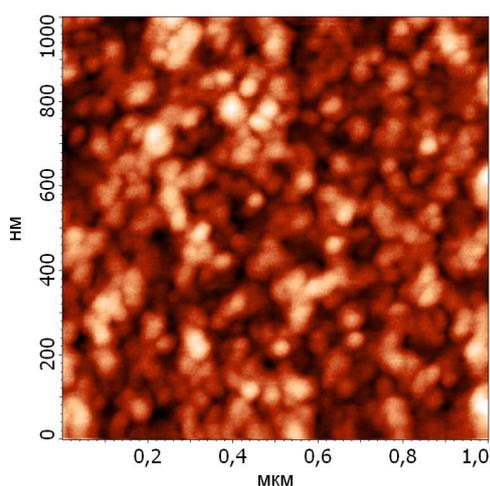


Рис. 1. АСМ-топограмма поверхности наноструктурированных пленок силицида никеля

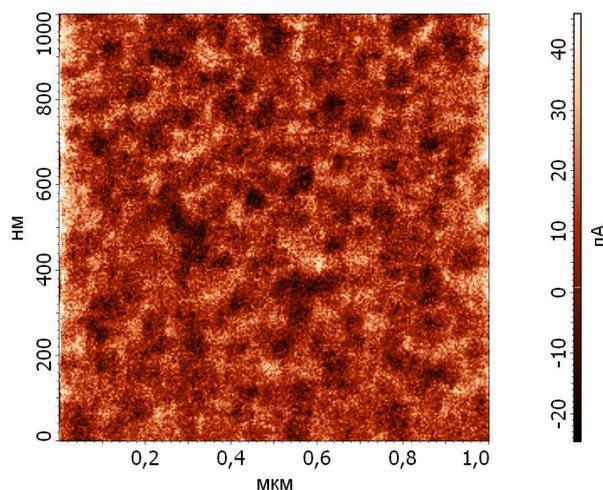


Рис. 2. МФМ-топограмма наноструктурированных пленок силицида никеля

АСМ-исследование полученных пленок показывает формирование наноструктур со средним размером порядка 25-30 нм и рельефом поверхности не более 2 нм при толщине пленки порядка 20 нм. Для полученных наноструктур характерно узкое распределение по размерам, что важно для повышения плотности записи информации (рис.1). Магнитно-силовые исследования обнаруживают магнитный отклик наноструктур, находящихся в однодоменном состоянии (рис.2). Характер намагничивания полученных наноструктур существенно отличается от доменной структуры исходных пленок, полученных магнетронным распылением и не подвергнутых плазмохимической обработке (рис.3).

Для проведения операции записи информации циркулярно-поляризованным светом образец предварительно маркировался, после чего производилось атомно-силовое и магнитно-силовое исследование образца вблизи маркера для области 5x5 мкм. Образец до записи представлял

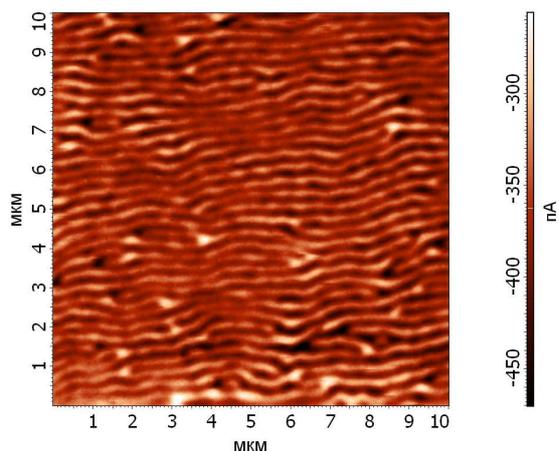


Рис. 3. MFM-топограмма поликристаллических пленок никеля

собой однородную пленку (рис. 4а), на картине магнитного отклика отсутствовали упорядоченные структуры на масштабах более 25 нм (рис. 4б).

Для подведения оптического излучения к образцу использовалось одномодовое оптоволокно, заостренное методом химического травления до апертуры  $\sim 500$  нм. Расстояние между оптоволоконным зондом и образцом устанавливалось  $\sim 3$  мкм при помощи механического позиционера. В качестве источника света использовался полупроводниковый лазер, излучение которого преобразовывалось в циркулярно-поляризованное при помощи ромба Френеля. Мощность излучения, вводимого в оптоволокно после фокусировки, составляло  $\sim 10$  мВт. Перемещение зонда над поверхностью осу-

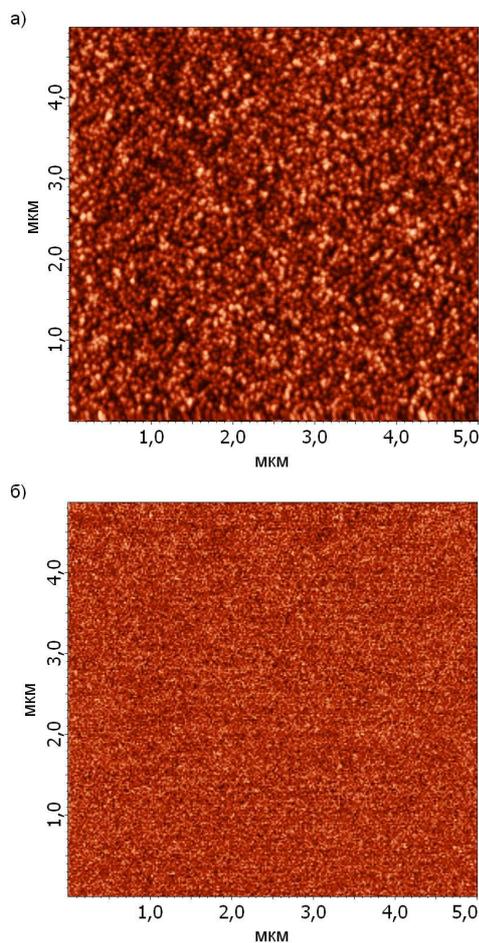


Рис. 4. АСМ-Топограмма поверхности (а) и MFM-топограмма (б) до оптического воздействия

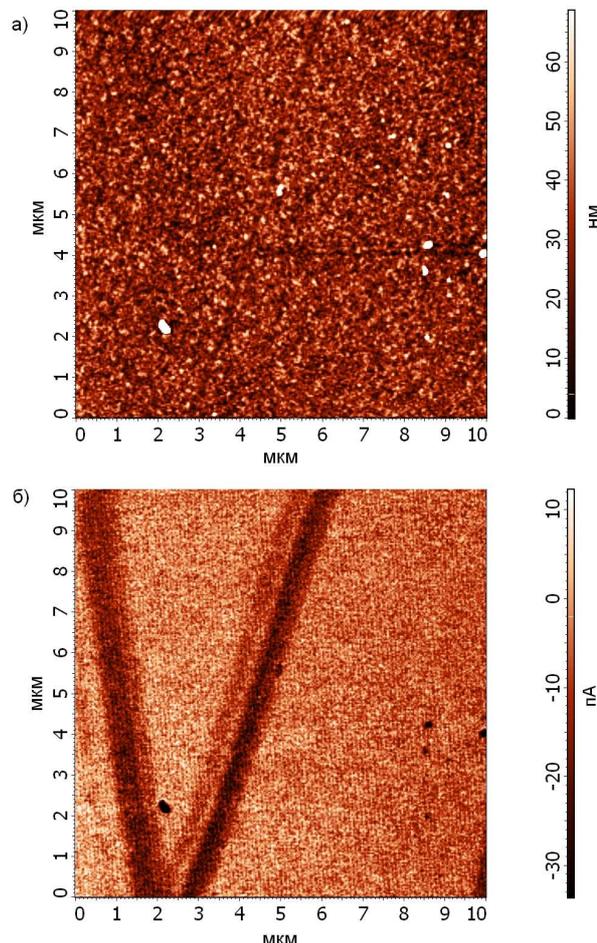


Рис. 5. АСМ-Топограмма поверхности (а) и MFM-топограмма после оптического воздействия

ществлялось механическим позиционером со скоростью  $\sim 10$  мкм/с.

После процесса записи образец подвергался повторному АСМ и МСМ исследованию. Топология поверхности в процессе записи информации не претерпевала изменений (рис.5а), тогда как в области, подвергнутой воздействию циркулярно-поляризованного света, магнитный отклик усилился примерно в три раза (рис.5б).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для разработанной технологии условия формирования наноструктурированных пленок соответствуют условиям формирования силицидов ферромагнитных металлов. Объемные фазы и нанометровые пленки силицидов со структурами  $\text{CaF}_2$  и  $\text{P2}_13$  диамагнитны. Для проявления магнитных свойств силицидов ферромагнитных металлов необходимы особые условия их формирования. Känel [6,7] показал возможность эпитаксиальной стабилизации метастабильной  $\text{CsCl}$  фазы, что позволило ему впервые получить эпитаксиальные пленки моносилицидов железа и кобальта на Si (111) с рассогласованием параметров решетки менее 2%. Позже Wu с соавторами [8,9] методом DFT показал, что ультратонкие пленки моносилицидов  $\text{MnSi}$  и  $\text{CoSi}$  со структурой  $\text{CsCl}$  имеют эффективный магнитный момент  $1.07\text{-}1.90 \mu_B/\text{Mn}$  и  $0.38\text{-}0.63 \mu_B/\text{Co}$  при толщине пленок от одного до трех монослоев. Seo, Lee методом CVD получили нанонити моносилицида  $\text{CoSi}$  диаметром менее 30 нм, обладающие ферромагнитными свойствами  $\mu_{\text{эфф}} = 1.37 \pm 0.53 \mu_B/\text{Co}$  [10, 11].

Как показали квантово-химические расчеты, выполненные неограниченным методом теории функционала плотности с использованием обменного функционала  $\text{B3LYP}$  в пакете Gaussian, наличие магнитных свойств характерно для кластеров  $\text{Me}_n\text{Si}_m$ [12]. Обнаружено, что рост числа атомов в кластере (начиная с  $n \sim 4$ ,  $m \sim 10$ ) не сопровождается ростом полного электронного спина кластера. Установлено, что геометрия кластера существенно изменяет электронный спин кластера. Тетраэдрические конфигурации кластеров находятся в низкоспиновых состояниях. Высокоспиновые состояния кластеров соответствуют конфигурации близкой к двумерной. То есть, возникновение магнитных свойств у силицидов переходных металлов обусловлено, прежде всего, кластерами  $\text{Me}_n\text{Si}_m$ , находящимися на поверхности наноструктур с определенной кривизной поверхности. Решающее влияние на проявление магнитных свойств у полученных наноструктурированных пленок оказывает стадия плазмохимической обработки. По-видимому, при выбранных технологических режимах создаются условия для формирования нанокластеров  $\text{Me}_n\text{Si}_m$  и перехода их в высокоспиновое состояние.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества разработанного метода формирования наноструктурированного материала с магнитными свойствами - полная совместимость с кремниевыми технологиями, отсутствие литографических операций, однодоменный характер намагниченности наноструктур при комнатной температуре - позволяют рассматривать полученные пленки как перспективный материал для реализации сверхбыстрой и сверхплотной памяти на основе полностью оптического переманчивания.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП по ГК №16.513.11.3014 от 08.04.2011г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Stanciu C.D. All-Optical Magnetic Recording with Circularly Polarized Light / C. D. Stanciu, F. Hansteen, A. V. Kimel [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2007. – V. 99. – P. 047601.
- [2] Kimel A.V. Femtosecond opto-magnetism: ultrafast laser manipulation of magnetic materials /

A.V. Kimel, A. Kirilyuk, T. Rasing // *Laser & Photon. Rev.* – 2007. – V.1, №3. – P. 275–287.

[3] Ikkawi R. Near-Field Optical Transducer for Heat-Assisted Magnetic Recording for Beyond-10-Tbit/in<sup>2</sup> Densities / R.Ikkawi, N.Amos, A.Lavrenov [et.al] // *J. Nanoelectron. Optoelectron.* – 2008. – V. 3. – P. 44–54.

[4] Challener W.A. Heat-assisted magnetic recording by a near-field transducer with efficient optical energy transfer / W.A. Challener, C. Peng, A.V. Itagi [et.al] // *Nature Photon.* – 2009. – V.3. – P. 220–224.

[5] All-optical magnetic recording system using circularly polarized light and bit-patterned media: pat. US 8164988 B2, Apr.24, 2012.

[6] Känel H. Structural and electronic properties of metastable epitaxial FeSi<sub>1+x</sub> films on Si(111) / H. Känel, K.A. Mäder, E. Muller et al. // *Phys. Rev. B.* — 1992. — V. 45, N 13. — P. 13807–13810.

[7] Känel H. New Epitaxially Stabilized CoSi Phase with the CsCl Structure / Känel H., C. Schwarz, S. Goncalves-Conto, et al // *Phys. Rev. Lett.* — 1995. — V. 74, N 11. — P. 1163–1166.

[8] Wu H., Kratzer P. and M. Scheffler First-principles study of thin magnetic transition-metal silicide films on Si(001) // *Phys. Rev. B.* — 2005. — V. 72, N 14. — P. 144425–144437.

[9] Wu H. First-principles study of ferromagnetism in epitaxial Si-Mn thin films on Si(001) / H. Wu, M. Hortamani et al. // *Phys.Rev. Lett.* — 2004. — V. 92, N 23. — Pp. 237202(4).

[10] Seo K. Composition-Tuned Co<sub>n</sub>Si Nanowires: Location-Selective Simultaneous Growth along Temperature Gradient / K. Seo, S. Lee, H. Yoon, et al. // *NanoLetters.* — 2009. — V. 3, N 5. — P. 1145–1150.

[11] Seo K. Magnetic Properties of Single-Crystalline CoSi Nanowires / K. Seo, K.S.K. Varadwaj, P. Mohanty, et al. // *NanoLetters.* — 2007. — V. 7, N 5. — Pp. 1240–1245.

[12] Сигов А.С. Спиновые состояния нанокластеров силицидов переходных металлов / А.С. Сигов, А.П. Лазарев, Л.А. Битюцкая Л.А. и др. // *Нано- и микросистемная техника.* — 2011. — № 12. — С. 25–27.

*Сигов А.С., академик РАН, д.ф.-м.н., ректор Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики, директор НОЦ ООО “Росбио-квант”*

*E-mail: rector@mirea.ru*

*Тел.: (495) 433-00-44*

*Sigov A.S., Academician of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Rector of Moscow State Technical University of Radioengineering, Electronics and Automation, Director of REC Rosbiokvant Ltd.*

*E-mail: rector@mirea.ru*

*Тел.: (495) 433-00-44*

*Даринский Б.М., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ООО “Росбио-квант”*

*E-mail: main@rosbiokvant.ru*

*Тел.: (473) 277-27-27*

*Darinskii B.M., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Rosbiokvant Ltd.*

*E-mail: main@rosbiokvant.ru*

*Тел.: (473) 277-27-27*

*Овчинников О. В., д.ф.-м.н., заведующий кафедрой оптики и спектроскопии Воронежского госуниверситета, ведущий научный сотрудник ООО “Росбио-квант”*

*E-mail: opt@phys.vsu.ru*

*Тел.: (473)220-87-80*

*Ovchinnikov O. V., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department of Optics and Spectroscopy, Voronezh State University, Leading Researcher, Rosbiokvant Ltd*

*E-mail: opt@phys.vsu.ru*

*Тел.: (473)220-87-80*

*Полностью оптическое перематричивание в наноструктурах Si-Ni*

*Смирнов М. С., к.ф.-м.н., доцент кафедры оптики и спектроскопии Воронежского государственного университета, ведущий научный сотрудник ООО "Росбиоквант"*

*E-mail: opt@phys.vsu.ru*

*Тел.: (473) 220-87-80*

*Smirnov M. S., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Optics and Spectroscopy, Voronezh State University, Leading Researcher, Rosbiokvant Ltd*

*E-mail: opt@phys.vsu.ru*

*Tel.: (473) 220-87-80*

*Гречкина М.В., ведущий инженер центра коллективного пользования научным оборудованием Воронежского государственного университета*

*E-mail: me144@phys.vsu.ru*

*Тел.: (473) 220-84-81*

*Grechkina M.V., Lead Engineer of Center of Collective Use of Scientific Equipment, Voronezh State University*

*E-mail: me144@phys.vsu.ru*

*Tel.: (473) 220-84-81*

*Лазарев А.П., к.ф.-м.н., генеральный директор ООО "Росбиоквант"*

*E-mail: main@rosbiokvant.ru*

*Тел.: (473) 220-86-25*

*Lazarev A.P., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, General Director, Rosbiokvant Ltd*

*E-mail: main@rosbiokvant.ru*

*Tel.: (473) 220-86-25*

*Велигура Г.А., ведущий инженер, ОАО "Научно-исследовательский институт электронной техники"*

*E-mail: vga@niiet.ru*

*Тел.: 8-961-181-95-98*

*Veligura G.A., Lead engineer, Scientific Research Institute of Electronic Engineering*

*E-mail: vga@niiet.ru*

*Tel.: 8-961-181-95-98*

*Тучин А.В., аспирант кафедры физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета*

*E-mail: me144@phys.vsu.ru*

*Тел.: (473) 220-84-81*

*Tuchin A.V., Post Graduate Student, Department of Physics of Semiconductors and Microelectronics, Voronezh State University*

*E-mail: me144@phys.vsu.ru*

*Tel.: (473) 220-84-81*

*Богатиков Е.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета*

*E-mail: evbogatikov@yandex.ru*

*Тел.: (473) 220-84-81*

*Bogatikov E.V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Physics of Semiconductors and Microelectronics, Voronezh State University*

*E-mail: evbogatikov@yandex.ru*

*Tel.: (473) 220-84-81*