

## ПРОБЛЕМЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СОВРЕМЕННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ (ОБЗОР)

Е. Н. Подденежный

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

### *Введение*

Научный и прикладной интерес к наноматериалам\* и нанотехнологиям обусловлен возможностью значительной модификации и даже принципиального изменения свойств известных материалов при переходе в нанокристаллическое состояние, а также уникальными возможностями, которые открывают новые методы в создании материалов и изделий из структурных элементов нанометрового размера [1].

Понятие «нанотехнология» еще не устоялось. Особенность нанотехнологий заключается в том, что рассматриваемые процессы и совершаемые действия происходят в нанометровом диапазоне пространственных размеров. Условно принят диапазон структурных элементов наноматериалов от 0,5 до 100 нанометров [2,3]. Эта технология, позволяя создавать новые материалы с особыми свойствами, обещает серьезные коммерческие выгоды, что не может не привлекать значительных инвестиций, причем не только частных, но и правительственных. Так в 2000–2005 гг. на исследования в области нанотехнологий в мире выделялись средства в размере около 10 млрд долларов [1]. Начато проведение международных выставок по достижениям в наноматериалах и нанотехнологиях, в мире проводятся десятки симпозиумов, научно-технических конференций, семинаров по этому направлению, появились новые научные журналы, монографии и сборники статей. В Беларуси утверждена и принята к финансированию Государственная комплексная программа научных исследований на 2006–2010 г.г. «Наноматериалы и нанотехнологии» (научный руководитель – академик Витязь П. А.). Среди проблем развития нанотехнологий в современном материаловедении можно выделить следующие:

1. Формирование неагломерированных нанопорошков металлов, сплавов, оксидов заданного размера, морфологии, структуры и определенного химического состава частиц.

2. Компактирование керамики и композитов до заданной плотности из нанопорошков.

3. Разработка методов формирования наноразмерных пленочных структур с точным соблюдением толщины, химического состава и структурных характеристик.

4. Методы контроля и визуализации наноразмерных объектов.

Бурно развиваются также метрологические направления в нанотехнологии – созданы туннельная и атомно-силовая микроскопия, растровая микроскопия сверхвысокого разрешения и др. [4]

Нанотехнологии начинают применяться для создания функциональных материалов с новыми и улучшенными характеристиками (рис. 1).

К объектам нанотехнологий относят также полимерные нанокompозиты, тонкопленочные магнитные полупроводники, многочисленные углеродные наноструктуры (фуллерены, нанотрубки, наноленты), нанобиоматериалы, супрамолекулярные вещества [1], [3], [4].

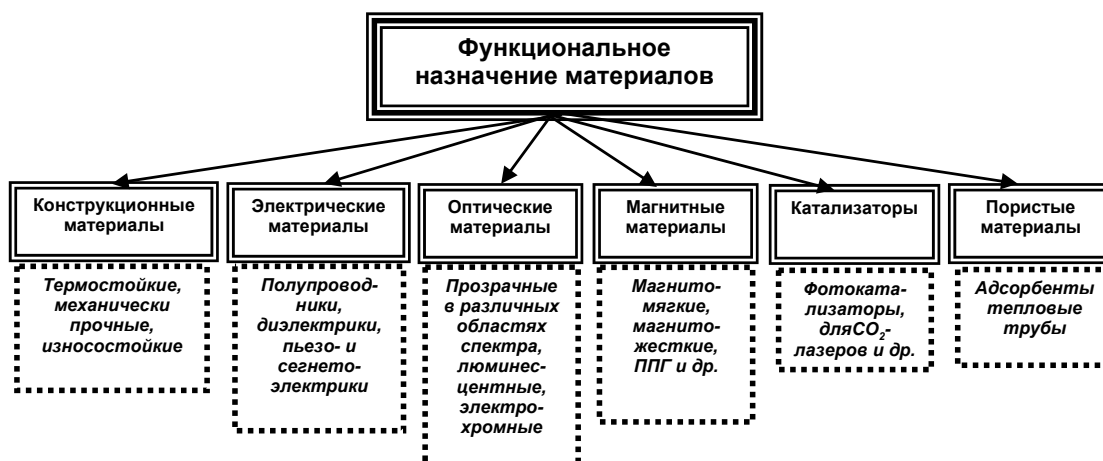


Рис. 1. Функциональное назначение наноматериалов

За относительно короткое время развития науки о наноматериалах были успешно разработаны методы получения наноразмерных порошков с использованием как физических, так и химических принципов синтеза:

- Синтез наночастиц в коллоидных растворах.
- Термическое разложение в газовой фазе.
- Лазерное испарение металлов.
- Метод взрыва проволок.
- Золь-гель технология.
- Плазмохимический синтез.

#### 1. Наноматериалы в машиностроении и металлообработке

Большой фундаментальный и прикладной интерес представляют компактные нанокристаллические материалы для машиностроения и металлообработки, имеющие большие перспективы применения. Среди них можно выделить металлические, нанокерамические, композиционные и полимерно-композиционные материалы [5].

Методы получения консолидированных наноматериалов представлены в таблице.

Основной проблемой в получении высокоплотной оксидной керамики является повышенная активность и плохая прессуемость нанопорошков. Традиционные методы холодного и изостатического прессования не приводят к достаточной плотности прессовок из-за наличия межчастичных адгезионных сил, относительная величина которых резко возрастает с уменьшением размера частиц. Кроме того, при спекании керамики при высоких температурах происходит неконтролируемый рост зерен и между ними формируются поры, что приводит к снижению плотности и уменьшению прочности материала. Для компактирования нанокристаллических порошков наиболее эффективен магнитно-импульсный метод [5], активно развиваемый в Институте электрофизики Российской академии наук (ИЭ РАН). Этот метод основан на концентрировании силового действия магнитного поля мощных импульсных токов; он позволяет относительно просто управлять параметрами волны сжатия, генерируя волны с амплитудой до 5 ГПа и длительностью в несколько микросекунд. Импульс-

\* Приставка нано- соответствует множителю  $10^{-9}$ , то есть нанотехнология изучает методы формирования систем с характерным размером в миллиардные доли метра. Размер атома составляет несколько десятых нанометра.

ные волны сжатия сопровождаются интенсивным разогревом порошка (до 300 °С) за счет быстрого выделения энергии при трении частиц в процессе упаковки.

### Методы получения наноматериалов

Группа	Основные разновидности
Порошковая технология	Метод Глейтера (газофазное осаждение и компактирование) Электроразрядное спекание Горячая обработка давлением Высокие статистические и динамические давления при обычных и высоких температурах
Интенсивная пластическая деформация	Равноканальное угловое прессование Деформация кручением Обработка давлением многослойных композитов Фазовый наклеп
Контролируемая кристаллизация из аморфного состояния	Обычные и высокие давления
Пленочная технология	Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) Физическое осаждение из газовой фазы (PVD) Электроосаждение Золь-гель технология

Высокая активность наночастиц и параметры полученных прессовок обеспечивают синтез керамик и композитов с плотностью 98–100 % от теоретической. Микротвердость таких материалов достигает 20–60 ГПа, предел прочности на изгиб составляет 700–900 МПа.

Магнитно-импульсный метод формовки успешно применяется для создания уникальных конструкционных и абразивных композиционных материалов, сочетающих пластичность алюминия и твердость карбида кремния. Импульсное прессование смеси нанопорошков Al и микронных порошков SiC при его содержании до 40 мас.%, при давлении 1,5 ГПа с последующей импульсной ковкой позволяет получать материал с плотностью до 100 %, в котором зерна матрицы имеют размер 100–300 нм, а алюминий хорошо смачивает поверхность частиц карбида кремния без образования химических соединений и переходных слоев [5].

Другим методом формования наноструктурированных керамик является метод горячего прессования (ГИП), позволяющий производить заготовки из керамических материалов точного размера в условиях различных газовых сред. Таким путем получают, в основном, прозрачные керамические материалы, пригодные для формирования активных лазерных сред, высокотемпературных оптических фильтров и окон скинтилляторов [6], [7].

## 2. Наноматериалы в электротехнике и электронике

В последнее десятилетие особый интерес вызывают ферромагнитные аморфные материалы (металлические стекла) на основе железо-кобальтовых сплавов с добавками Nb, Cu, Si, В. Путем управляемой кристаллизации таких аморфных материалов получают нанокристаллические сплавы с размером зерна 8–20 нм, обладающие уникальными магнитными свойствами. Развитие наноструктуры в аморфном сплаве предполагает сочетание высокой скорости образования центров кристаллизации и малой скорости их роста. Наличие Cu способствует увеличению числа центров кристаллизации и их равномерному распределению в объеме, Nb замедляет рост зерен, а Si способствует образованию ОЦК-фазы  $\alpha$ -Fe(Si). Эти сплавы являются мягкими магнитными материалами с очень низкой коэрцитивной силой ( $H_c = 0,5 \text{ А/м}$ ) и высокой намагниченностью насыщения (до 1,5–1,7 Тл) [2].

Спинтроника (spintronics) – это область квантовой электроники и нанотехнологии, в которой для физического представления информации наряду с зарядом используется спин частиц, связанный с наличием у них собственного механического момента [8], [9].

В этой связи можно кратко рассмотреть перспективы создания наноструктурных устройств, использующих эффект гигантского магнитосопротивления (ГМС), открытый группой А. Ферта (США) в 1988 г. и связанный с чередованием нанослоев железа и хрома [10]. Позднее были обнаружены и другие многослойные комбинации металлов, обладающие аналогичным эффектом. Физическая природа ГМС обусловлена тем, что в отсутствие внешнего поля спины в чередующихся слоях ориентируются по-разному (благодаря антиферромагнитному связыванию), вследствие чего в сечении рассеяния возникает соответствующий пик.

При наложении достаточно сильного внешнего магнитного поля (независимо от его направления) спины начинают ориентироваться вдоль поля, в результате чего рассеяние на границах раздела уменьшается. Аналогичные эффекты были обнаружены в нанокомпозитах со случайным распределением магнитных частиц в немагнитной матрице, в гибридных наноструктурах, включающих кластеры Со в слоях серебра, разделенных слоями ферромагнетика. Ярким примером быстрого внедрения новых наноструктурированных материалов являются разработки исследователей фирмы IBM, которые показали, что структуры с эффектом ГМС (называемые также спиновыми затворами) могут быть получены достаточно простыми методами и использованы для регистрации очень слабых магнитных полей. Это открыло возможности их практического применения в считывающих головках дисководов магнитных дисков. И уже в декабре 1997 г. началось коммерческое производство ГМС-головок со спиновым затвором [11].

Следующим продуктом после ГМС-головок, основанном на спинтронике, может стать магнитная память с произвольной выборкой (MRAM) (Magnetoresistance Random Access Memory). К числу достоинств «магниторезистивной памяти» на основе магнитных полупроводников относятся высокое быстродействие, малое энергопотребление и энергонезависимость [1].

### *3. Коллоидно-химические свойства нанодисперсных систем – основа золь-гель технологии*

Одним из способов получения наночастиц оксидного состава, как элементов наноструктурных материалов, является золь-гель способ, теоретической и экспериментальной базой которого является химия коллоидных систем [12].

Повышенное внимание исследователей привлекают наноструктурированные системы типа «диэлектрическая матрица-наночастицы металла или полупроводни-

ка». Благодаря своим уникальным свойствам такие нанокomпозиты будут находить широкое применение в радио- и оптоэлектронике в качестве магнитных, электропроводящих и оптических сред. Причем в зависимости от концентрации заполнения диэлектрической матрицы наночастицами в электрофизических и оптических свойствах нанокomпозитов могут наблюдаться изменения в широких пределах в связи с появлением квантово-размерных эффектов [13].

Для создания оптических нанокomпозитов, формируемых путем распределения ультрадисперсных частиц оксидов, оксифторидов и полупроводниковых медьсодержащих частиц в стеклообразных матрицах широко применяются методы коллоидной химии, в том числе золь-гель процесс [12]. Для изучения структуры наночастиц используется атомно-силовая, растровая и просвечивающая микроскопия сверхвысокого разрешения (рис. 2) [14].

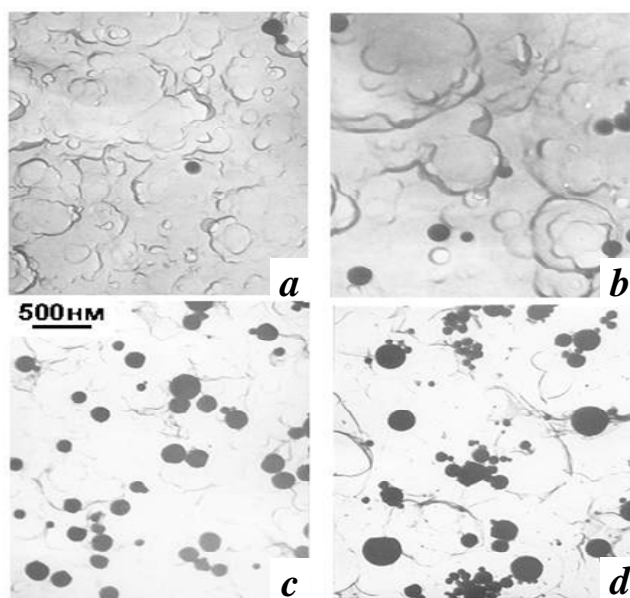


Рис. 2. Микрофотографии наночастиц  $\text{Cu}_x\text{Se}$ , диспергированных в золь-гель стекле, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ)

### Заключение

Основными причинами, сдерживающими широкое освоение нанотехнологий в народном хозяйстве, остается высокая стоимость новых разработок и оборудования для производства. Во многих областях, например, в энергетике, на транспорте условием внедрения нанотехнологий и наноматериалов может стать снижение стоимости продукции по крайней мере на порядок.

В настоящее время в НИЛ ТКС ГГТУ им. П. О. Сухого также разрабатываются перспективные направления, связанные с проблемами нанотехнологий:

- синтез оксидных нанопорошков, создание керамических и композиционных материалов функционального назначения на основе наноразмерных систем  $\text{SiO}_2 - \text{M}_x\text{O}_y$ , где  $\text{M} - \text{Cu, Cr, V, Fe, PЗЭ}$ ;

- исследование закономерностей формирования оптически активных наноразмерных фаз в бинарной системе  $\text{Y}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$  для лазерной техники и оптоэлектроники;

– разработка объемных наноструктурированных материалов для машиностроения и металлургии на основе природного и синтетического волластонита;

#### Литература

1. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / под. ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса, П. Аливисатоса ; пер. с англ. – Москва : Мир, 2002. – 292 с.
2. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства / А. И. Гусев. – Екатеринбург : УрО РАН, 1998. – 199 с.
3. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 250 с.
4. Чвалун, С. Н. Полимерные нанокомпозиты / С. Н. Чвалун // Природа. – № 7. – С. 21–27.
5. Обсуждение проблем нанотехнологии / И. И. Моисеев [и др.] // Вестн. Рос. акад. наук. – 2003. – Т. 73, № 7. – С. 429–454.
6. Ikesue, A. Microstructure and Optical Properties of Hot Isostatically Pressed Nd:YAG Ceramics / A. Ikesue, K. Kamata // J. Amer. Ceram. Soc. – 1996. – Vol. 79, № 7. – P. 1927–1933.
7. Способ получения прозрачной керамики на основе оксида иттрия и неорганический сцинтиллятор на основе этой керамики : пат. 2255071 РФ, МПК С 04 В 35/505 / В. С. Кийко, Н. С. Калинин, М. Г. Зуев, Е. Ю. Журавлева ; заявл. 12.08.03 ; опубл. 27.06.05 // Бюл. № 18.
8. Бараш, Л. Спинтроника – электроника следующего поколения / Л. Бараш // Компьютерное обозрение. – 2002. – № 39. – С. 61–63.
9. Разработки в области спинтроники – еще один шаг к чипам будущего / А.Гвозденко. – Режим доступа: <http://www.itc.ua/print.phtml?ID=17303>. – Дата доступа: 20.04.2006.
10. Baibich, M. N. Giant magnetoresistance of (001)Fe / (001)Cr magnetic superlattice / M.N.Baibich, J. M. Broto, A. Fert // Phys.Rev.Lett. – 1988. – Vol. 61. – P. 2472–2478.
11. IBM и Стэнфордский университет вплотную займутся спинтроникой / М. Канеллос // ZDNet News. – Режим доступа: <http://zdnet.ru/?ID=447681>. – Дата доступа: 20.04.2006.
12. Подденежный, Е. Н. Золь-гель синтез оптического кварцевого стекла / Е. Н. Подденежный, А. А. Бойко. – Гомель : УО «ГГТУ им. П. О. Сухого», 2002. – 210 с.
13. Медьсодержащие нанокомпозиты. Синтез и исследование состава / К. В. Записс [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, вып. 11. – С. 89–93.
14. Gurin, V.S. Sol-Gel Glasses with Copper and Copper Selenide Nanoparticles / V. S. Gurin, A. A. Alexeenko // Proc. Int. Conf. Nanomaterials NANO 2005, July 13–15; 2005. – Мерсо Schlenk Eng. Coll., Savakasi, India. – P. 115–122.