

Министерство образования и науки Российской Федерации  
*Амурский государственный университет*

Е.В. Стукова, С.В. Барышников, А.Ю. Милинский

ФИЗИКА МАЛЫХ ЧАСТИЦ  
И НАНОСТРУКТУРНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ  
*Учебное пособие*

Благовещенск  
Издательство АмГУ  
2010

ББК 22.37я73

С 88

*Рекомендовано  
учебно-методическим советом университета*

*Рецензенты:*

*С.В. Ланкин., зав. кафедрой общей физики БГПУ, д-р физ.-мат. наук, проф.;*

*Криштон В.В., зав. кафедрой физики ДВГУПС (г. Хабаровск),*

*д-р физ.-мат. наук*

Стукова, Е.В., Барышников, С.В., Милинский, А.Ю.

С88      Физика малых частиц и наноструктурных материалов : учебное пособие / Е.В. Стукова, С.В. Барышников, А.Ю. Милинский. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2010. – 152 с.

Учебное пособие предназначено для обучающихся в магистратуре направления 010600.68 – «Прикладная математика и физика» и аспирантов, обучающихся по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

ББК 22.37 я73

© Стукова, Е.В., Барышников, С.В., Милинский, А.Ю., 2010  
© Амурский государственный университет, 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. Теоретические причины размерных эффектов в физике .....</b>	<b>6</b>
1.1. Влияние поверхности .....	6
1.2. Изменение фононного спектра.....	9
1.3. Изменение электронного спектра .....	11
<b>Глава 2. Методы получения систем пониженной размерности.....</b>	<b>15</b>
2.1. Получение тонких пленок.....	15
2.2. Методы получения нанопорошков .....	20
2.3. Получение нанотрубок и нанопроволок.....	24
2.4. Создание наноструктур внутри нанопористых матриц.....	26
2.5. Получение упорядоченного пористого анодного оксида алюминия ....	33
<b>Глава 3. Методы исследования наноматериалов .....</b>	<b>38</b>
3.1. Электронная микроскопия.....	38
3.2. Зондовая микроскопия .....	41
3.3. Ядерный магнитный резонанс.....	46
3.4. Диэлектрическая спектроскопия.....	47
3.5. Другие методы исследования.....	49
<b>Глава 4. Влияние размерных эффектов на физические свойства твердых тел.....</b>	<b>52</b>
4.1. Механические свойства наноматериалов.....	52
4.2. Изменение тепловых свойств малых частиц и наноструктурированных материалов.....	58
4.3. Проводимость и сверхпроводимость в наноструктурах.....	60
4.4. Особенности размерных эффектов в сегнетоэлектриках .....	64
4.5. Магнитные свойства наночастиц .....	72
4.6. Оптические свойства наноструктур.....	77
4.7. Переход от микроэлектроники к наноэлектронике.....	84
<b>Список использованной литературы.....</b>	<b>94</b>
<b>Список дополнительной литературы .....</b>	<b>104</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие нанотехнологий в настоящее время является приоритетным направлением для мировой науки и техники. Первые работы по влиянию размера частиц на физические и химические свойства вещества появились еще в 30-е годы прошлого века, но интенсивное исследование структуры и свойств наноматериалов началось на рубеже XX – XXI веков.

Наноструктурированные материалы являются объектом растущего интереса для фундаментальной и прикладной науки, поскольку с уменьшением характерных размеров их структурных единиц до наноуровня они приобретают новые свойства, обусловленные возрастающей ролью поверхностных атомов и квантово-размерными эффектами. Современный интерес к этой наиболее динамично развивающейся области физики связан как с принципиально новыми фундаментальными научными проблемами и физическими явлениями, так и с перспективами создания на основе уже открытых явлений совершенно новых устройств и систем с широкими функциональными возможностями для опто- и наноэлектроники, измерительной техники, информационных технологий нового поколения.

Развитие отрасли нанотехнологий невозможно без широкой подготовки специалистов в данной области. Цель данного учебного пособия – сформировать у учащихся магистратуры направления 010600.68 – «Прикладные математика и физика» и аспирантов, обучающихся по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», общее представление о различных аспектах физики наноструктур, включая причины возникновения размерных эффектов, методы создания и исследования наноструктурных материалов, а также перспективные направления их применения.

Учебное пособие состоит из введения, четырех глав и заключения. Глава 1 посвящена теоретическим аспектам размерных эффектов в физике твердого тела. В главе 2 описаны различные методы получения систем пониженной размерности. Приведены примеры нанопористых матриц с описанием их по-

ристой структуры. В главе 3 рассмотрены методы исследования физических свойств наноматериалов, такие как электронная микроскопия, зондовая микроскопия, метод ядерного магнитного резонанса и т.д. В главе 4 достаточно подробно рассмотрены свойства различного рода наноструктур на основе металлов, полупроводников, диэлектриков и т. д., их возможное применение в различных отраслях науки и техники. Для углубленного изучения отдельных вопросов в конце пособия приведена подробная библиография.

# 1. Теоретические причины размерных эффектов в физике

Под размерными эффектами в физике понимают изменения свойств вещества при ограничении его размеров в одном, двух или трех измерениях. В настоящее время накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал по физике наноструктур и нанотехнологиям, которому посвящено большое количество монографий, обзоров и учебников. Рассмотрим кратко основные причины, приводящие к появлению размерных эффектов.

## 1.1. Влияние поверхности

Прежде всего, стоит помнить, что атомы, принадлежащие поверхности тела находятся в других условиях, чем объемные, и, следовательно, имеют другие физические свойства. При уменьшении размеров тела происходит рост доли поверхностных атомов и соответственно вклада поверхности в его свойства. Так для массивного тела количество атомов, находящихся на поверхности, примерно на 7 – 8 порядков меньше числа атомов в объеме и их влиянием можно пренебречь. Уменьшение размера приводит к тому, что для частицы при размере порядка нанометров, количество поверхностных атомов может быть сравнимо с количеством атомов в объеме, что проиллюстрировано на рис. 1.1.1.

Доля границ раздела в общем объеме сферической частицы диаметром  $d$  и толщиной границы раздела  $\delta$ , равна:

$$\frac{\Delta V}{V} = \left[ \frac{\pi}{6} d^3 - \frac{\pi}{6} (d - 2\delta)^3 \right] \left( \frac{\pi}{6} d^3 \right)^{-1} \approx \frac{6\delta}{d} . \quad (1.1.1)$$

При значении  $\delta$  от 0,5 до 1,5 нм и среднем размере частицы 10 – 20 нм на поверхностный слой приходится до 50 % вещества.



**Рис. 1.1.1.** Соотношение атомов в объеме и на поверхности для наночастиц разного размера

Таким образом, в отличие от макроскопических тел, в которых, как правило, пренебрегается влиянием поверхности, свойства наносистем будет определять совокупность объемных и поверхностных атомов. В этой связи все термодинамические потенциалы должны содержать члены, отвечающие объемному и поверхностному вкладу. В частности свободная энергия запишется в виде

$$F = F_V + F_S, \quad (1.1.2)$$

где  $F_V = -\int p dV$  и  $F_S = \oint \sigma(\mathbf{n}) ds$  – объемный и поверхностный вклады,  $\sigma(\mathbf{n})$  – поверхностное натяжение, зависящее от направления единичного вектора  $\mathbf{n}$ , нормального к поверхности. Зависимость свободной энергии от линейных размеров тела и приводит к появлению различных размерных эффектов: изменению теплоемкости, температуры плавления, температуры структурных фазовых переходов и т.д.

Учет вклада поверхностной энергии  $F_S$ , может привести к тому, что для наночастиц будут реализовываться фазы, которые не наблюдаются для массивного вещества. Пусть для массивного вещества будет устойчива фаза 1. На языке термодинамики это может быть записано как:

$$F_V^1 < F_V^2. \quad (1.1.3)$$

Уменьшение размеров приводит к необходимости учета  $F_s$  и может оказаться, что при тех же условиях для наночастицы будет устойчива фаза 2:

$$F_V^2 + F_s^2 \leq F_V^1 + F_s^1, \quad (1.1.4)$$

Это может привести к структурному фазовому переходу.

Учет поверхностной энергии приводит к отличию теплоемкости наночастиц от теплоемкости массивного тела, поскольку в данном случае:

$$C_V = \left( \frac{\partial \bar{E}_V}{\partial T} \right) + \left( \frac{\partial \bar{E}_s}{\partial T} \right). \quad (1.1.5)$$

Однако эта формула неокончательная, так как при уменьшении размеров будет меняться и фононный спектр, что приведет к изменению теплоемкости при низких температурах.

Зависимость температуры плавления  $T_m(r)$  наночастиц от их радиуса часто описывается формулой Томсона

$$\frac{T_m(r) - T_m}{T_m} = -\frac{2\sigma v_l}{r L}, \quad (1.1.6)$$

где  $T_m$  и  $L$  – температура и теплота плавления массивного тела,  $v_l$  – объем 1 г вещества. Анализ экспериментальных данных позволяет заключить, что хотя формула (1.1.6) качественно описывает снижение температуры плавления наночастиц, имеются количественные расхождения с экспериментом. Несовершенство формулы Томсона связано с тем, что при ее выводе используется предположение о постоянстве объема частицы в процессе плавления.

Позже были получены более точные формулы для  $T_m(r)$ , которые дают хорошее согласие с экспериментом, в частности [1,2]

$$T_m(r) = T_m \left\{ 1 - \frac{2}{\pi \rho_s L r} \left[ \sigma_s - \sigma_l (\rho_s / \rho_l)^{2/3} \right] \right\}, \quad (1.1.7)$$

где  $\rho_s$  и  $\rho_l$  – плотности твердой и жидкой частиц. Под температурой плавления в данном выражении понимается температура, при которой твердая и жидкая сферические частицы находятся в равновесии со своим паром. Все

выражения, полученные для  $T_m(r)$  в различных работах могут быть записаны в виде

$$T_m(r) = T_m(1 - \alpha/r), \quad (1.1.8)$$

где  $\alpha$  – постоянная, зависящая главным образом от типа вещества.

Универсальное свойство наносистем – сосуществование твердой и жидкой фаз вблизи фазового перехода. Впервые это явление было обнаружено для системы из 13 и 55 связанных атомов – кластеров [3-7]. Область сосуществования в термодинамическом равновесии твердой и жидкой фаз находится ниже температуры, при которой теряет стабильность жидкая фаза, и выше температуры, при которой теряет стабильность твердая фаза [4].

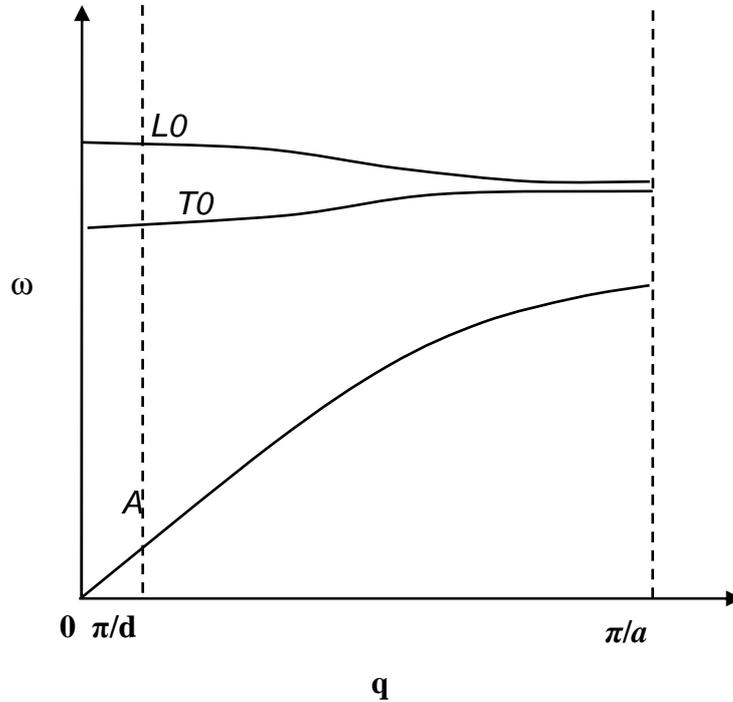
### 1.2. Изменение фононного спектра

Изменение колебательного спектра кристаллической решетки при уменьшении частицы до наноразмеров является еще одной причиной возникновения размерных эффектов в твердом теле. При сокращении размеров кристалла в одном, в двух или в трех измерениях из-за отсутствия трансляционной симметрии при анализе динамики решеточных колебаний уже нельзя использовать циклические условия Борна-Кармана. Последние должны быть заменены граничными условиями на поверхности [8]. В результате, прежде всего не реализуются длинные волны с  $\lambda/2 > d$ , где  $d$  – меньший размер. При этом из спектра решеточных колебаний выпадают некоторые частоты (рис. 1.1.2) [9]. Последнее приводит также к изменению формулы Дебая для объемной теплоемкости. Если для макрочастицы пределами интегрирования являются 0 и  $\omega_{max} = \omega_D$

$$C_V = \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{V}{3\pi^2 u^2} \int_0^{\omega_D} \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} \omega^2 d\omega \right), \quad (1.2.1)$$

то для наночастицы пределы интегрирования меняются от некоторого  $\omega_{min}$  до  $\omega_{max} = \omega_D$ :

$$C_v = \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{V}{3\pi^2 u^2} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_p} \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} \omega^2 d\omega \right). \quad (1.2.2)$$



**Рис. 1.1.2.** Выпадение некоторых решеточных колебаний в частицах малых размеров ( $\mathbf{q}$  – волновой вектор)

Еще одно следствие ограничения размеров кристалла заключается в появлении новых частот, связанных с поверхностными волнами. Эти колебания быстро затухают по направлению нормали к поверхности, в одномерном случае они имеют локальный характер. Отличием энергетического спектра подобных «поверхностных фононов» заключается в следующем: одна из его ветвей в предельном случае длинных волн переходит в известные поверхностные релеевские волны, другие колебания образуют особые поверхностные оптические ветви [10,11].

Изменение колебательного спектра при нанограничении приводит к размерной зависимости температуры Дебая  $\theta_D(r)$ . С учетом поверхностного натяжения  $\sigma$  было получено [12]

$$\frac{k_n}{k} = \frac{\theta_D(r)}{\theta_D} \approx 1 + [(2K\sigma\gamma/r) - (3\pi/8rk)], \quad (1.2.3)$$

где  $\theta_D$  – дебаевская температура массивного тела,  $\gamma$  – постоянная Грюнайна,  $K$  – изотермическая сжимаемость.

### 1.3. Изменение электронного спектра

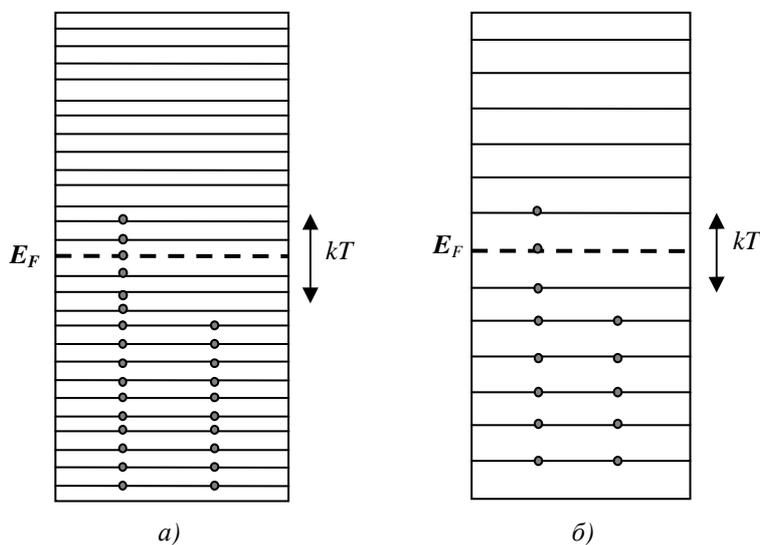
Различие физических условий для атомов, находящихся в объеме и на поверхности, приводит и к различию энергетических спектров электронов, находящихся на поверхности и в объёме кристалла. Всего через несколько лет после создания теории энергетических зон для бесконечной решётки И.Е. Тамм показал принципиальную возможность существования поверхностных электронных состояний [13].

В 1932 г., рассматривая простейшую одномерную модель полубесконечного кристалла как последовательность дельтаобразных потенциальных барьеров, ограниченную потенциальной «стенкой», И.Е. Тамм пришёл к фундаментальному выводу о возможности существования состояний, волновые функции которых локализованы на поверхности кристалла. В трёхмерном случае каждому атому поверхности должно соответствовать одно состояние. Таким образом, концентрация таммовских поверхностных состояний на идеальной поверхности должна быть равна поверхностной концентрации атомов в кристалле, то есть по величине порядка  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . При малых размерах частиц вклад в проводимость поверхностных электронов может быть соизмерим с вкладом объёмных электронов, что приведет к изменению электрических свойств вещества.

Интересным объектом в физике наночастиц являются квантовые точки [14,15]. В качестве примера квантовой точки может служить наночастица металла или полупроводника с электронами проводимости. Электроны в квантовой точке ведут себя как в трехмерной потенциальной яме, в которой имеется множество стационарных уровней с расстоянием  $\hbar^2/2md^2$ , где  $d$  – размер квантовой точки. Переход с одного уровня на другой может сопровождаться поглощением или испусканием фотона, что приводит к люминесценции.

Варьируя размеры квантовой точки можно менять частоту излучения. Это направление рассматривается как перспективное для создания перестраиваемых источников света.

Отличие энергетического спектра нанобъектов от объемных материалов, приводит и к изменению величины электронной теплоемкости. Как известно, для металла и полупроводника теплоёмкость складывается из теплоёмкостей кристаллической решётки и электронов проводимости. Электронный вклад, определяемый соотношением  $C_e = \gamma_e T$ , где  $\gamma_e$  – коэффициент электронной теплоемкости, для массивных веществ является весьма существенным. Оценка электронного вклада в теплоемкость наночастиц весьма затрудняется дискретностью энергетических уровней электронов (рис. 1.3.1б). Подобная дискретность обусловлена ограниченностью числа атомов в частице. Среднее расстояние  $\delta$  между энергетическими уровнями по порядку величины равно  $E_F / N$ , где  $E_F$  – энергия Ферми, а  $N$  – число электронов проводимости.



**Рис. 1.3.1.** Энергетический спектр объемного кристалла (а) и наночастицы (б)

Если  $\delta > kT$  (очень малые частицы, низкие температуры), электронная теплоёмкость может сильно отличаться от значений для массивных тел. Например, в ранних работах по электронной теплоёмкости малых частиц были получены оценки  $\sim 0,2$  (Фрёлих, 1937),  $\sim 0,7$  (Кубо, 1962) от значения элек-

тронной теплоёмкости массивного металла. Стоит отметить, что по этой же причине изменятся все физические свойства, которые определяются плотностью состояний.

Теоретическое описание электронной структуры наноматериалов в последние годы продвинулось от рассмотрения простой частицы в потенциальном ящике до намного более сложных подходов, включая конечные эффекты границ, Кулоновские взаимодействия, непараболичность зоны проводимости, вводимое ограничением смещение валентных подзон и др. [16]. Простейший подход основан на модели сферической квантовой потенциальной ямы с бесконечным потенциальным барьером. Энергии носителей квантованы и могут быть определены для полупроводников из выражения:

$$E_{l,n}^{e,h} = \frac{(\hbar\varphi_{l,n})^2}{2m_{e,h}a^2}, \quad (1.3.1)$$

где  $E_{l,n}^e$  – энергия электрона, отсчитываемая от дна зоны проводимости,  $E_{l,n}^h$  – энергия дырки, отсчитываемая от дна валентной зоны,  $\varphi_{l,n}$   $n$ -ый корень первого порядка сферических функций Бесселя,  $m_e$  и  $m_h$  – эффективные массы электрона и дырки,  $a$  – радиус наночастицы. Спектр поглощения для таких частиц будет определяться соотношением

$$\hbar\omega_{l,n} = E_g + \frac{(\hbar\varphi_{l,n})^2}{2m_r a^2}, \quad m_r = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}, \quad (1.3.2)$$

где  $E_g$  – запрещенная зона для объемных материалов. Край поглощения, который может быть определен через запрещенную зону, для наночастицы соответствует низшему переходу и смещен по сравнению с объемным состоянием. Вследствие квантового ограничения ширина запрещенной зоны увеличивается как  $a^{-2}$  с уменьшением размера наночастицы.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что понимают под размерными эффектами?
2. Как можно классифицировать системы пониженной размерности?
3. Перечислите классические и квантовые причины, приводящие к размерным эффектам.
4. Как изменится выражение для свободной энергии в связи с уменьшением геометрических параметров тела до наноразмеров?
5. Как и почему меняется теплоемкость наноразмерных частиц?
6. Каким образом температура плавления наночастицы зависит от ее размера?
7. Как изменится колебательный спектр кристаллической решетки вследствие ограничения размеров кристалла?
8. В чем отличие электронного спектра нанобъектов от объемных материалов?
9. Что такое таммовские состояния?
10. В каких случаях на поверхности вещества появляются квантовые точки?

## **2. Методы получения систем пониженной размерности**

К системам пониженной размерности или наноматериалам относят вещества, размеры которых ограничены в одном, двух или трех измерениях. К двумерным системам относят тонкие пленки (2D), к одномерным – нанонити (1D) и к нульмерным – наночастицы (0D). К наноматериалам также можно отнести вещества, внедренные в пористые матрицы, размер пор которых лежит в нанометровом диапазоне.

### **2.1. Получение тонких пленок**

Основными участниками процесса нанесения пленки являются кристаллическая подложка, которая должна удовлетворять ряду требований (например, возможности эпитаксиального роста продукта на ней), и источник паров целевого продукта или исходных компонентов (тогда одновременно с осаждением на подложку будет происходить и химическая реакция). Методы осаждения пленок подразделяют следующим образом:

- 1) физические методы осаждения, к которым можно отнести (по типу источника):
  - а) катодное (магнетронное) распыление;
  - б) лазерное испарение;
  - в) испарение при помощи ионного пучка;
  - г) термическое испарение за счет резистивного нагрева;
- 2) химические методы осаждения, английская аббревиатура которых – CVD (chemical vapor deposition) широко распространилась в отечественной научной литературе. В этом случае компоненты пленки транспортируют к подложке в виде паров их летучих соединений.

Получение качественных тонких пленок – сложная многопараметрическая задача. Основными управляющими параметрами процесса получения тонких пленок при осаждении являются кристаллографическая ориентация подложки и качество ее поверхности, температура подложки, скорость нане-

сения пленки. Чтобы образовалось покрытие на поверхности твердотельной подложки, частицы осаждаемого материала должны пролететь через средуноситель и вступить в непосредственный контакт с подложкой. После попадания на поверхность значительная часть частиц должна адсорбироваться на ней, либо за счет химической реакции с поверхностью образовать новое соединение, которое останется на поверхности. Эти частицы могут быть атомами, молекулами, ионами атомов, ионизированными молекулами или маленькими кусочками материала, как заряженными, так и незаряженными. Средой-носителем могут быть жидкость, газ или вакуум.

**Электронно-лучевое испарение.** Резистивный нагрев, используемый во многих испарительных установках, имеет несколько существенных недостатков: загрязнение от нагревателя, тигля, ограничения по относительно низкой мощности нагревательных элементов. Это не позволяет напылять чистые пленки и испарять материалы с высокой температурой плавления с приличной скоростью. Испарение электронным лучом лишено этих недостатков. При этом посредством нагрева нити накала, которая служит катодом, происходит термоэмиссия электронов, причем нить накала располагается не на одной линии с подложкой. Таким образом, исключается появление примесей от материала катода.

Электронно-лучевой разогрев обеспечивает наибольшую гибкость. Лучшие результаты при напылении получаются, если испаряемый материал размещать в небольшом углублении охлаждаемого водой медного нагревателя. Электронный ток 100 – 500 мА эмиттируется вольфрамовой нитью накала, находящейся вне поля прямого видения со стороны испаряемого вещества, и ускоряется высоким напряжением 3 – 10 кВ. Электронный луч с помощью магнитного поля направляется на маленький участок испаряемого вещества, которое локально плавится. Некоторые соединения перед испарением диссоциируют, и от испарителя в первую очередь отделяется компонент, который имеет более высокое давление пара. Для преодоления этого эффекта различ-

ные компоненты соединения испаряются из отдельных источников со скоростями, соответствующими молекулярному составу конденсата.

**Испарение в сверхвысоком вакууме.** Проблемы, связанные с загрязнением в среде-носителе, легко разрешаются при использовании методов осаждения в сверхвысоком вакууме (при давлении менее  $10^{-6}$  Па). Обычно используются следующие методы нагрева: постоянным током, вихревыми токами, электронной бомбардировкой и лазерным облучением. Держатели, изготавливаются из тугоплавких металлов, которые могут нагреваться при прохождении через них электрического тока. Такие материалы как вольфрам, тантал, платина и графит более предпочтительны для создания лодочек.

**Распыление.** Распыление – это явление передачи момента импульса от налетающей частицы частицам поверхности мишени с последующим отрывом атомов или молекул и переводом их в вакуум. В большинстве случаев ионно-лучевое распыление проводится при энергии ионов 100 – 1000 эВ, что обеспечивает поддержание низкой температуры подложки и ограничивает ее радиационное повреждение. При энергии свыше 100 кэВ ионы проникают так глубоко, что лишь небольшое количество поверхностных атомов распыляется, коэффициент распыления уменьшается. Распыление, таким образом, является процессом, в котором увеличение энергии ионов не эффективно.

**Катодное распыление.** В процессе осаждения тонких пленок материал, который должен напыляться, используется в качестве катода в системе с тлеющим разрядом в инертном газе (Ar или Xe) при давлении 1 – 10 Па и напряжении в несколько киловольт. Подложка, на которую нужно осадить пленку, располагается на аноде. Положительные ионы газа, создаваемые в разряде, ускоряются по направлению к катоду и достигают его с большой энергией, возрастание которой происходит в прикатодной области. В результате ионной бомбардировки материал с катода распыляется главным образом в виде нейтральных атомов, но частично и в виде ионов. Распыленное вещество конденсируется на всей окружающей площади, в том числе на подлож-

ках, расположенных на аноде. Используя магнитное поле, эффективность ионизации около мишени может быть значительно улучшена. В обычных планарных диодных процессах ионы образуются относительно далеко от мишени и вероятность потери своей энергии в результате столкновений достаточно велика.

**Химическое осаждение из газовой фазы.** Химическое осаждение из газовой фазы для получения твердых пленок происходит в процессе химической реакции вещества на горячей поверхности подложки. Осаждаемый материал находится в газообразном состоянии и смешан с инертным газом-носителем. Важность этого метода заключается в возможности его использования для осаждения разнообразных элементов и соединений при относительно низких температурах и атмосферном давлении.

**Лазерная абляция.** Лазерная абляция – это процесс быстрого плавления и испарения материала мишени, используя высокоэнергетическое лазерное излучение, с последующим перемещением материи от мишени к подложке в вакууме. Глубина проникновения лазерного луча в поверхность мишени мала (приблизительно 10 нм). Это означает, что только тонкий поверхностный слой материала подвержен воздействию излучения в то время, как оставшаяся часть мишени остается незатронутой. Таким образом, ЛА является неравновесным процессом. Это один из наиболее быстрых методов получения тонкопленочных покрытий, он предоставляет четко ориентированное направление распространения плазмы, наряду со стехиометрическим трансфером материи от мишени к подложке.

**Эпитаксия** – это метод послойного выращивания одного кристаллического твердого тела на поверхности подложки, при котором растущий кристалл наследует кристаллографическую структуру подложки. По способу доставки материала к поверхности подложки различают три вида эпитаксии: жидкофазную, молекулярно-пучковую и газофазную.

Условно, эпитаксию можно разделить на автоэпитаксию и гетероэпитаксию. В первом случае материал кристаллической подложки и эпитаксиального слоя совпадают. Гетероэпитаксия реализуется, когда материал эпитаксиального слоя отличен от материала подложки. Таким образом, эпитаксиальные методики позволяют выращивать гетероструктуры, что в частности используется при легировании полупроводников.

**Получение моно- и полимолекулярных слоёв.** Поверхностно-активные вещества (ПАВ) способны образовывать мономолекулярные плёнки на различных поверхностях раздела фаз: вода – воздух; твёрдое тело – жидкость; жидкость – жидкость. Такие плёнки можно рассматривать как двумерные наносистемы. Монослои ПАВ на поверхности раздела вода – воздух впервые были исследованы Ленгмюром, который разработал экспериментальный метод изучения таких плёнок [17].

При определённых условиях на поверхности раздела вода – воздух самопроизвольно образуются структуры с высокой степенью порядка, в которых молекулы (или ионы) ПАВ располагаются таким образом, что полярная группа находится в растворе, а углеводородный радикал ориентирован в воздух под небольшим углом к межфазной поверхности. Процессы самоорганизации в плёнке обусловлены наличием дифильности у молекул ПАВ и могут быть проанализированы с точки зрения взаимодействия полярной группы с водной подложкой и взаимодействием углеводородных радикалов между собой [17-19].

Значительный интерес представляют химические реакции, протекающие в мономолекулярных плёнках. Меняя поверхностное давление, можно контролировать ориентацию молекул в поверхностном слое и тем самым специфически воздействовать на протекание реакций. Так, плёнки Ленгмюра – Блоджетт используют для получения твёрдых наночастиц разной природы непосредственно в процессе химической реакции или фотохимического восстановления солей металлов [20-23].

Плѐнки, осаждённые на поверхности твёрдых тел, могут образовывать как моно-, так и полислои. Например, если стеклянную пластинку, расположенную вертикально, вытягивать из воды через монослой стеарата бария, находящийся на поверхности воды, то пластинка покрывается слоем ПАВ, в котором углеводородные радикалы ориентированы наружу. В результате поверхность такой пластинки становится гидрофобной. На неё можно наносить следующий слой. Последовательным нанесением слоёв можно получать гидрофильные или гидрофобные поверхности. Плѐнки, построенные из одинаково ориентированных слоёв, называют X-плѐнками, а из противоположно ориентированных – Y-плѐнками. Таким образом, можно получать полислоенные покрытия, толщина которых лежит в пределах нанометровых размеров.

**Кристаллизация аморфных сплавов.** В этом методе нанокристаллическая структура создается в аморфном сплаве путем его кристаллизации. Получение тонких лент аморфных металлических сплавов с помощью быстрого охлаждения расплава на поверхности вращающегося диска или барабана, отработано достаточно хорошо. Далее аморфная лента отжигается при контролируемой температуре для кристаллизации. Для создания нанокристаллической структуры отжиг проводится так, чтобы возникало большое число центров кристаллизации, а скорость роста кристаллов была низкой. Кристаллизация аморфных сплавов особенно активно изучается в связи с возможностью создания нанокристаллических ферромагнитных сплавов систем Fe-Cu-M-Si-B (M-Nb, Ta, W, Mo, Zr), имеющих очень низкую коэрцитивную силу и высокую магнитную проницаемость, т.е. мягких магнитных материалов.

## **2.2. Методы получения нанопорошков**

Все методы получения нанопорошков можно условно разделить на две группы. К первой группе можно отнести технологии, основанные на химических процессах, а ко второй – на физических процессах. В качестве химических методов получения нанопорошков обычно используют следующие:

осаждение;

термическое разложение;  
пиролиз;  
газофазные химические реакции (восстановление, гидролиз);  
электроосаждение.

Осаждение гидроксидов металлов из растворов солей проводится, в частности с помощью осадителей, в качестве которых используются растворы щелочей натрия и калия. Регулирование pH и температуры раствора позволяет получать высокие скорости кристаллизации и обеспечивать образование высокодисперсного гидроксида. Гель-метод применяется для получения порошков различных металлов и заключается в осаждении из водных растворов гелей нерастворимых металлических соединений.

Восстановление и термическое разложение – обычно следующая операция после осаждения и сушки ультрадисперсных оксидов или гидроксидов. В зависимости от требований к продукту, используют газообразные (водород, оксид углерода) или твердые восстановители. Метод позволяет получать порошки сферической, игольчатой, чешуйчатой или неправильной формы.

Нанопорошки Fe, W, Ni, Co, Cu и других металлов получают, например, восстановлением их оксидов водородом. В качестве твердых восстановителей используются углерод, металлы или их гидриды.

Физические методы синтеза нанопорошков основаны на испарении металлов, сплавов или оксидов с последующей их конденсацией при контролируемых температуре и атмосфере. Фазовые переходы пар – жидкость – твердое тело или пар – твердое тело происходят в объеме реактора или на охлаждаемой подложке (стенках). Исходное вещество испаряется посредством интенсивного нагрева и с помощью газа-носителя подается в реакционное пространство, где подвергается быстрому охлаждению. Нагрев осуществляется с помощью плазмы, лазерного излучения, электрической дуги, печей сопротивления, индукционными токами и т.д. В зависимости от вида исходных материалов и получаемого продукта испарение и конденсация проводятся в вакууме, в потоке инертного газа или плазмы. Размер и форма частиц зависят

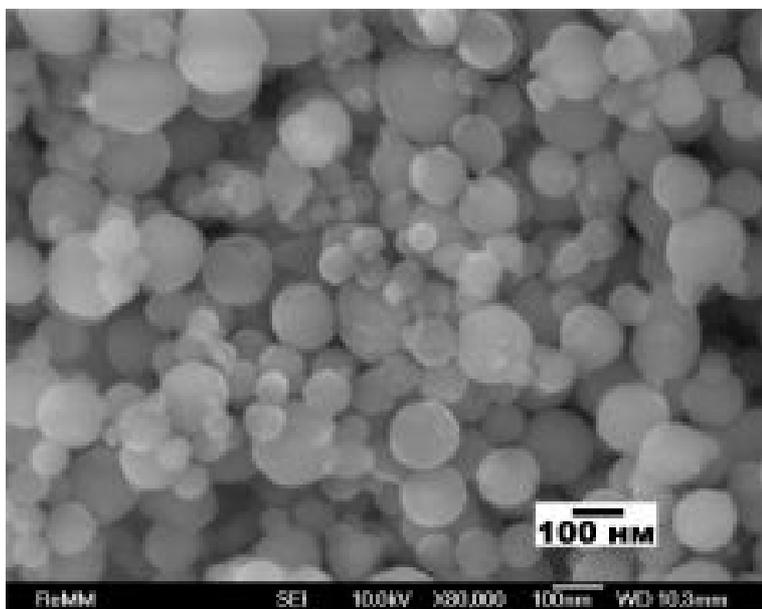
от температуры процесса, состава атмосферы и давления в реакционном пространстве. Например, в атмосфере гелия частицы имеют меньший размер, чем в атмосфере более плотного газа – аргона. Метод позволяет получать порошки Ni, Mo, Fe, Ti, Al с размером частиц в десятки нанометров.

Известен способ получения наноматериалов путем электрического взрыва проводников. Проволоки металла диаметром 0,1 – 1,0 мм помещают в реактор между электродами, на которые подается мощный импульс тока  $10^4$ – $10^6$  А/мм<sup>2</sup>. Происходит мгновенный разогрев и испарение проволок. Пары металла разлетаются, охлаждаются и конденсируются. В результате получается нанопорошок. Процесс проводится в атмосфере гелия или аргона. Таким способом получают металлические (Ti, Co, W, Fe, Mo) и оксидные (TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>) нанопорошки с частицами до 100 нм.

Механические методы основаны на измельчении материалов в мельницах (шаровых, планетарных, центробежных, вибрационных), гироскопических устройствах, атриторах и симолойерах. Механически измельчают металлы, керамику, полимеры, оксиды, другие хрупкие материалы, причем степень измельчения зависит от их природы. Так, для оксидов вольфрама и молибдена крупность частиц составляет около 5 нм, для железа – около 10 – 20 нм. Положительная сторона механических способов – сравнительная простота технологии и используемого оборудования, возможность измельчения больших количеств различных материалов и получения порошков сплавов. Недостатки – вероятность загрязнения материала истирающими материалами, трудность получения порошков с узким распределением частиц по размерам, сложность регулирования состава продукта. Независимо от метода получения нанопорошки имеют общую особенность – склонность к образованию агрегатов и агломератов частиц. В результате необходимо учитывать не только размеры отдельных наночастиц, но и площадь поверхности их объединений (рис. 2.2.1).

В химических методах для снижения степени агломерирования эффективно исключение воды из некоторых стадий процесса. Используются также

методы уменьшения контакта между частицами путем их капсулирования. Вышеназванная склонность наночастиц осложняет получение компактных материалов. В частности, чтобы преодолеть силы агломерирования, требуются большие механические усилия или повышение температуры спекания.



**Рис. 2.2.1.** Микрофотография нанопорошка алюминия.

Очень эффективный метод получения наночастиц, препятствующий их объединению заключается в матричной изоляции вещества. При этом могут быть использованы матрицы с различной геометрией и размером пор (см. п. 2.4).

### 2.3. Получение нанотрубок и нанопроволок

Углеродные нанотрубки – протяжённые цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров состоят из одной или нескольких свёрнутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов) и заканчиваются обычно полусферической головкой (рис. 2.3.1).

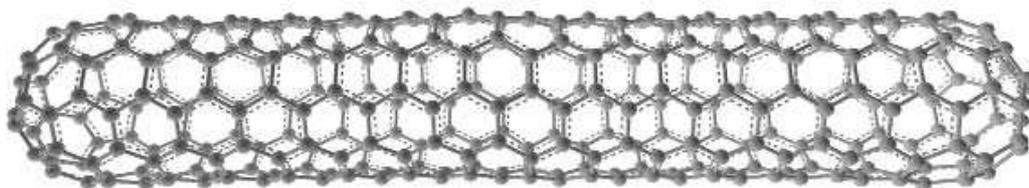
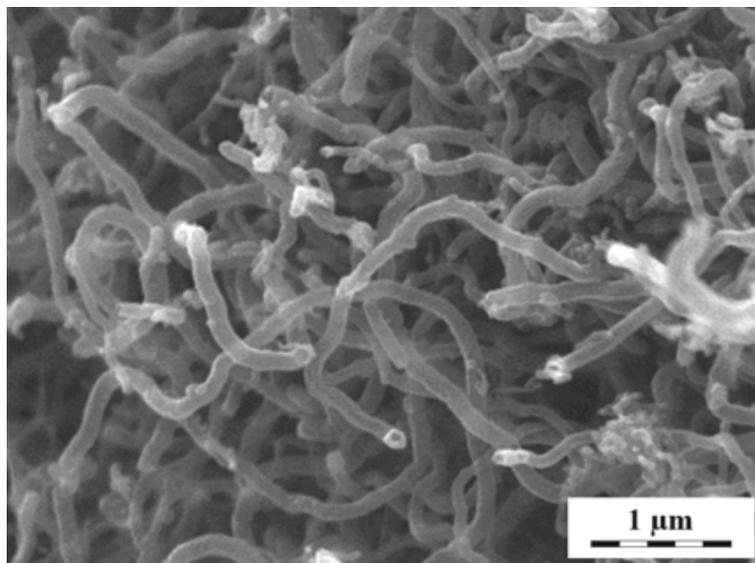


Рис. 2.3.1. Схематическое изображение нанотрубки.

Наиболее распространённым методом получения углеродных нанотрубок является термическое распыление графитовых электродов в плазме дугового разряда. Процесс синтеза осуществляется в камере, заполненной гелием под давлением около 500 торр. При горении плазмы происходит интенсивное термическое испарение анода, при этом на торцевой поверхности катода образуется осадок, в котором формируются нанотрубки углерода. Наибольшее количество нанотрубок образуется тогда, когда ток плазмы минимален и его плотность составляет около  $100 \text{ А/см}^2$ . В экспериментальных установках напряжение между электродами обычно составляет около 15 – 25 В, ток разряда несколько десятков ампер, расстояние между концами графитовых электродов 1 – 2 мм. В процессе синтеза около 90 % массы анода осаждается на катоде.

Образующиеся многочисленные нанотрубки имеют длину порядка 40 мкм (рис. 2.3.2). Они нарастают на катоде перпендикулярно плоской поверхности его торца и собраны в цилиндрические пучки диаметром около 50 мкм. Пучки нанотрубок регулярно покрывают поверхность катода, образуя сотую структуру. Ее можно обнаружить, рассматривая осадок на катоде невоо-

руженным глазом. Пространство между пучками нанотрубок заполнено смесью неупорядоченных наночастиц и одиночных нанотрубок. Содержание нанотрубок в углеродном осадке (депозите) может приближаться к 60 %.



**Рис. 2.3.2.** РЭМ изображение углеродных нанотрубок.

Для разделения компонентов полученного осадка используется ультразвуковое диспергирование. Катодный депозит помещают в метанол и обрабатывают ультразвуком. В результате получается суспензия, которая (после добавления воды) подвергается разделению на центрифуге. Крупные частицы сажи прилипают к стенкам центрифуги, а нанотрубки остаются плавающими в суспензии. Затем нанотрубки промывают в азотной кислоте и просушивают в газообразном потоке кислорода и водорода в соотношении 1:4 при температуре около 1000 К в течение 5 мин. В результате такой обработки получается достаточно легкий и пористый материал, состоящий из многослойных нанотрубок со средним диаметром 20 нм и длиной около 10 мкм. Технология получения нанотрубок довольно сложна, поэтому в настоящее время нанотрубки – дорогой материал: один грамм стоит несколько сот долларов США.

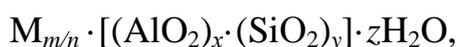
Согласно публикации в журнале «NanoLetters», физикам из нескольких китайских исследовательских центров удалось доработать технологию, кото-

рой пользовались ученые по всему миру – технологию химического осаждения атомов углерода из газовой среды. Им удалось синтезировать углеродные нанотрубки длиной до 18,5 см. Цуньшень Ванг (Xueshen Wang) и его коллеги использовали смесь веществ, которые многим известны отнюдь не в качестве химреактивов: свои рекордные нанотрубки китайцы вырастили в атмосфере паров спирта и воды. Правда, эти вещества находились в несколько нестандартных по алкогольным меркам пропорциях: 4 части спирта на 1 часть воды.

Кроме того, китайские ученые использовали водород, продуваемый через специальный реактор, а также сверхтонкий порошок железа и молибдена – это были зерна для затравки реакции. Также пригодилась им пленка из обычных, меньшей длины, нанотрубок – для эффективного удаления «мусора» в виде растущих в неправильных направлениях углеродных цилиндров вкупе с аморфным и потому неинтересным углеродом.

#### **2.4. Создание наноструктур внутри нанопористых матриц**

**Цеолиты и асбесты.** Цеолиты относятся к группе алюмосиликатов, каркас которых образуется при сочленении через общие вершины тетраэдров  $AlO_4$  и  $SiO_4$  [24]. Кристаллическая решетка цеолитов имеет регулярную систему полостей, сообщающихся между собой каналами, в которых находятся катионы металлов и молекулы воды. Катионы подвижны и могут в той или иной степени обмениваться на другие катионы. Вода, при нормальных условиях заполняющая свободный объем кристаллической решетки, может удаляться при нагревании или вакуумной откачке. Состав цеолитов можно представить следующей эмпирической формулой:



где:  $M$  – катионы металла (Na, K, Mg, Ca, Sr, Ba и др.),  $m$  – число катионов  $M$ ,  $n$  – валентность катиона, отношение  $y/x$  имеет различные значения в зависимости от структуры и обычно находится в пределах от 1 до 5. Часть форму-

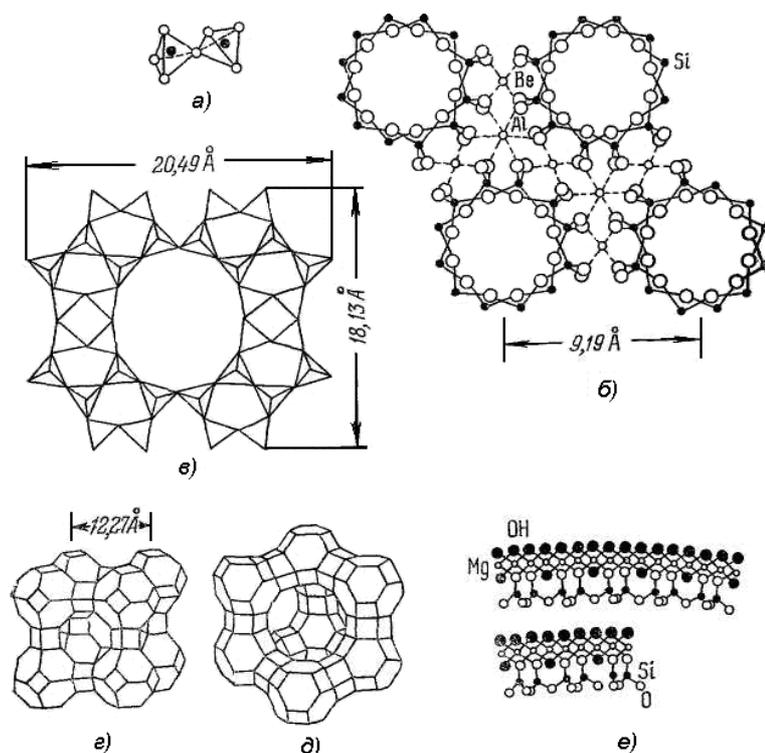
лы в квадратных скобках соответствует составу каркаса цеолита и  $z$  – число молекул воды определяются типом цеолита.

В настоящее время известно более 100 синтетических и около 40 природных цеолитов. Их специфической особенностью являются калиброванные размеры окон каналов (от 0,3 до 1 нм), которые определяются строением элементарной решетки каждого типа кристалла. Эта особенность стала причиной и другого довольно частого названия цеолитов – «молекулярные сита». Молекулярные сита – это материалы, которые вследствие своей внутренней структуры могут избирательно адсорбировать молекулы в соответствии с их размерами и формой.

Каркас цеолитов прочен, может выдерживать температуры до 1073 К или сжатие до 100 кбар [25]. Одни цеолиты устойчивы к щелочам (NaA, NaX), другие к кислотам (морденит). Наибольшими диаметрами каналов обладают промышленные цеолиты NaX (фожазит), NaA, морденит. Входы в каналы этих цеолитов образованы кольцами из тетраэдров (рис. 2.4.1).

Максимальные размеры кристаллов синтетических цеолитов ~ 0,1 мм. Природные кристаллы морденита встречаются в виде игл – 0,03×0,04×1 мм. Среди природных цеолитов есть и крупные кристаллы объемом до нескольких мм<sup>3</sup>.

Правильные каналы диаметром 15 – 100 Å имеются у волокнистого минерала хризотил-асбеста (хризотила)  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$  [25,26]. Монокристаллические слои минерала имеют естественную кривизну 88 Å и при росте сворачиваются внутрь и наружу, что хорошо видно на электронных фотографиях. Пачки волокон диаметром 200 – 300 Å образуют прозрачные кристаллы длиной до нескольких сантиметров. В зависимости от месторождения каналы в асбестах бывают заполнены либо аморфным веществом, либо водой, которая удаляется прогревом до 373 – 423 К, после чего в каналы могут быть введены исследуемые вещества, например, металлы.



**Рис. 2.4.1.** Структуры каркасных алюмосиликатов и хризотил-асбеста. а) Сочленение тетраэдров  $AlO_4 - SiO_4$ . Структуры: б) берилла, в) морденита. Форма полостей цеолитов: г) NaA, д) NaX, е) монокристаллические слои, образующие структуру волокон хризотила [24].

**Мезопористые вещества.** Аналогом цеолитов являются мезопористые мезоструктурированные материалы или МММ [27-30]. Эти материалы, подобно цеолитам, можно называть молекулярными ситами, т.к. они способны разделять молекулы по размерам. По сравнению с цеолитами МММ расширяют диапазон молекулярных сит до 10 нм и более. Кроме того большинство МММ, превосходят все известные типы цеолитов по величине удельной поверхности и объему пор, по крайней мере, в два раза.

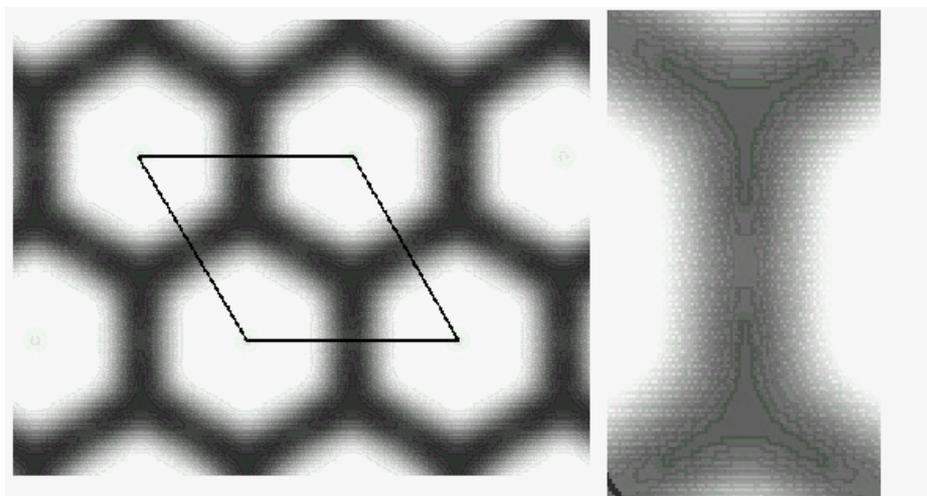
Синтез мезопористых материалов осуществляется путем самоорганизованной сборки структуры из неорганического компонента на мицеллярной поверхности поверхностно-активного вещества (ПАВ) [27]. Особенность молекул ПАВ заключается в том, что они обладают гидрофильной (любящей воду) и гидрофобной (не любящей воду) частью, т.е. они амфифильны. Молекулы ПАВ могут растворяться в воде и в масле, поэтому они располагаются на границе вода-масло или вода-воздух строго в определенном направле-

нии, гидрофильной частью в воду. При этом образуются так называемые мицеллы.

В качестве ПАВ обычно используют вещества описываемые формулой  $C_nH_{2n+1}N(CH_3)_3Br$  для  $n$  от 12 до 18. В воде такие молекулы диссоциируют с образованием алкиламмониевого катиона с гидрофильной  $[N(CH_3)_3]^+$  и гидрофобной  $[CH_3(CH_2)_{n-1}]$  частями. Уже при очень малых концентрациях в воде ионы ПАВ образуют цилиндрические мицеллы, поверхность которых образована положительно заряженными гидрофильными частями. При введении в такой мицеллярный раствор противоположно заряженных неорганических комплексов, например, анионов  $[SiO(OH)_3]^-$ , эти анионы сорбируются на поверхности мицеллы, вытесняя «собственные» противоионы ПАВ. Одновременно такие мицеллы самопроизвольно образуют регулярную гексагональную упаковку. Далее неорганические комплексы, сорбированные на поверхности мицеллы и в межмицеллярном объеме, полимеризуются (обычно – при нагревании), взаимодействуя друг с другом за счет реакции дегидратации. В результате между мицеллами образуется каркас из аморфной фазы  $SiO_2$ . Органическая часть мицеллы после сушки выжигается прокалкой на воздухе при 700 – 1000 К, при этом остается твердый мезопористый материал.

На рис. 2.4.2 показано строение наиболее популярного представителя этого класса, силикатного материала MCM-41. Этот материал имеет гексагональную структуру типа пчелиных сот с толщиной стенок  $h_w = 0,6 - 0,8$  нм и калиброванным размером каналов-пор  $d$ , который можно направленно изменять в диапазоне 3 – 10 нм (а в других МММ с той же структурой – до 30 – 50 нм и более). Удельная поверхность каналов MCM-41 – 1000 – 1200 м<sup>2</sup>/г и удельный объем – до 1 см<sup>3</sup>/г (табл. 1.4.1). Стенки пор МММ имеют разупорядоченную (аморфную) внутреннюю структуру, но сам материал обладает высокоупорядоченной «дальней» структурой. Подобные структуры, имеющие только дальний порядок, характерны для жидких кристаллов и других жидкоподобных мезофаз, т.е. фаз, промежуточных между аморфными и кристаллическими. Но в данном случае имеем твердый материал, стабильный при

нагревании по крайней мере до 973 К, рентгенографический анализ которого показывает отсутствие ближнего порядка и четкое наличие дальнего (до  $6 - 8$  узких рефлексов в области брегговских углов до  $8,0$ ).



**Рис. 2.4.2.** Распределение электронной плотности для МСМ-41 [30].

Силикатные и алюмосиликатные МММ могут иметь не только сотовую, но и трехмерную структуру. К таким относятся SBA-16, МСМ-48, МСМ-50.

*Таблица 1.4.1*

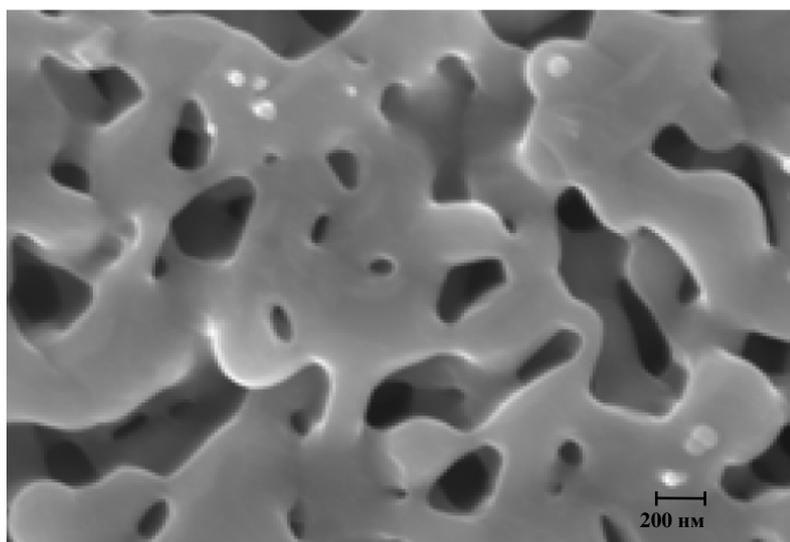
№	МММ	$d, \text{Å}$	$m^2/g$	$cm^3/g$
1	МСМ-41(С-16)	37,0	988,0	0,90
2	МСМ-41 (С-14)	26,1	1150,0	0,81
3	МСМ-41 (С-12)	24,3	660,0	0,57
4	МСМ-41 (С-12)	23,8	951,0	0,65
5	МСМ-41 (С-12)	20,3	660,0	0,57

**Силикагель.** Силикагель – это высушенный гель кремниевой кислоты пористого строения с исключительно развитой внутренней поверхностью, которая достигает  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ . Он обладает сильными адсорбирующими свойствами, химически и биологически безвреден, инертен, температура его плавления близка к температуре плавления обычного речного песка. Химическая формула - двуокись кремния  $\text{SiO}_2$ .

Повышая температуру, адсорбированный газ или водяной пар можно удалить с поверхности силикагеля. Это восстановление обычно происходит в течение 2 – 3 часов при температуре около 393 – 453 К.

Силикагель представляет собой тонкодисперсный порошок, либо гранулы размером до 7 мм в диаметре. Цвет гранул может варьироваться от прозрачно-матового до темного с черными включениями. Форма гранул овальная или неправильно сферическая. Размер пор силикагеля лежит в пределах 10 – 500 Å. Введение исследуемого вещества в поры осуществляется из расплава или раствора.

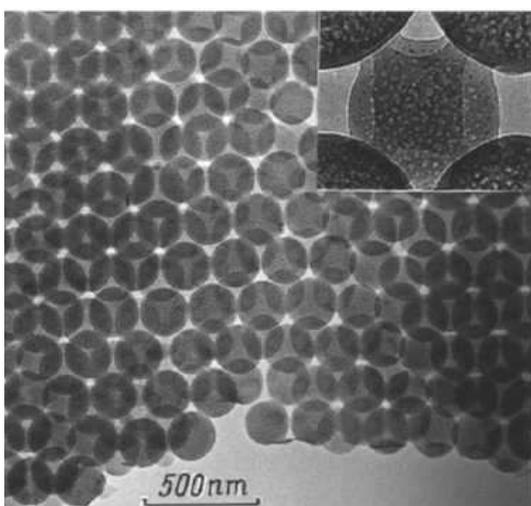
**Пористые стекла.** Пористые стекла получают путем кислотного выщелачивания натриевоборосиликатного стекла, содержащего фтор растворами 3 и 4 М HCl (при 373 К). После формования изделия оно обрабатывается кислотой и из него почти полностью извлекается боронатриевая составляющая. Остающееся стекло на 95 – 96 % оказывается кремнеземным [31]. При этом не изменяется форма, размеры и внешний вид изделия. Оно оказывается пронизанным сложными порами, средний диаметр которых 20 – 40 Å (рис. 2.4.3).



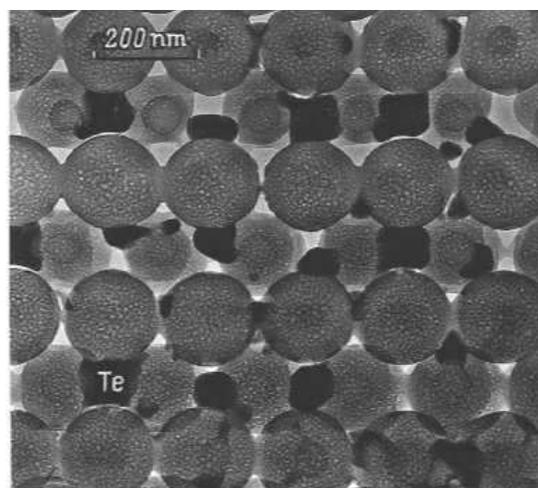
**Рис. 2.4.3.** Пористая структура стеклянной мембраны [31].

Варьирование химического состава стекол, режимов отжига и последующей обработки разными растворителями позволяет получать пористые стекла с размером пор от нескольких десятков до 1000 Å.

**Опаловые матрицы.** Для получения трехмерных диэлектрических матриц с регулярной системой пустот и каналов можно использовать синтетический опал. Опалы синтетические и природные, состоят из плотно упакованных аморфных сфер  $\text{SiO}_2$ , достаточно однородных по размерам (200 – 250 нм в диаметре).



*a)*



*б)*

**Рис. 2.4.4.** Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры силикатной сферы  $\text{SiO}_2$  (*a*) и вид опаловой матрицы с теллуром, введенным из расплава (*б*) [33].

Для получения трехмерной правильной решетки из нанокластеров, необходимо, чтобы сферы  $\text{SiO}_2$  в опале располагались упорядоченно с кубической или гексагональной плотной упаковкой. Тогда и пустоты между сферами будут иметь регулярное периодическое распределение. Поскольку размер сфер  $\text{SiO}_2$  составляет доли микрона, то, как показывают вычисления, пустоты (октаэдрические и тетраэдрические) будут иметь размеры (диаметры вписанных в них сфер)  $\sim 45 - 55$  и  $\sim 85 - 105$  нм соответственно. Они и будут определять максимальный размер «квазиатома» кластерной подрешетки при

введении в пустоты опаловой матрицы различных материалов тем или иным способом. При идеальной форме сфер  $\text{SiO}_2$  пустоты в опале соединяются каналами, имеющими в сечении форму треугольника с вогнутыми сторонами. Диаметр вписанного в него цилиндра составляет  $\sim 30 - 40$  нм [32,33]. Такие каналы-капилляры обеспечивают последовательное заполнение всех пор веществом с образованием кластеров при помещении исходного опала в соответствующую среду. Очевидно, что только в «монокристаллических» опалах возможно получение высококачественных трехмерных кластерных структур (рис. 2.4.4)

## **2.5. Получение упорядоченного пористого анодного оксида алюминия**

Анодирование – получение оксидов на поверхности металлов и полупроводников при анодной поляризации в кислородсодержащих средах с ионной проводимостью. Обычно анодирование проводят на постоянном токе в гальваностатическом или потенциостатическом режиме.

В зависимости от вида кислородсодержащей среды, заполняющей межэлектродное пространство, различают анодирование: в водных растворах электролитов, в расплавах солей, в газовой плазме, плазменно-электролитическое.

Анодирование в водных растворах электролитов наиболее распространенный и универсальный способ, легко поддающийся автоматизации. В качестве электролитов применяют водные растворы кислот и солей. Наиболее распространенный электролит при анодировании алюминия – водный раствор серной кислоты. Катод выполняют из свинца, графита или коррозионно-стойкой стали.

Пористый анодный оксид алюминия (ПАОА) характеризуется рядом свойств, которые делают его перспективным материалом для создания наноструктур [34]:

регулярная, близкая к идеально упорядоченной, структура;

простота управления размерами пор посредством выбора режимов формирования оксида;

широкий диапазон размеров пор (10 нм до 1 мкм);

высокая однородность плёнок, получаемых на большой площади.

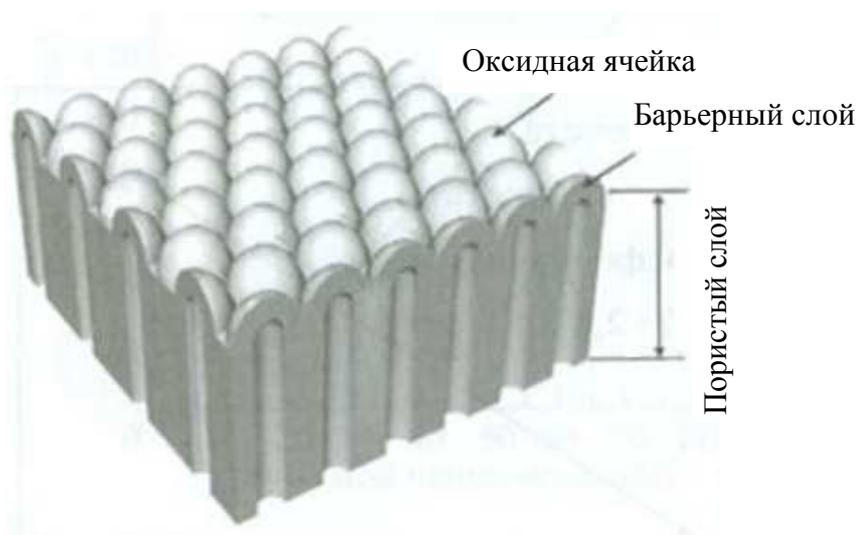
ПАОА представляет собой массив плотноупакованных гексагональных ячеек, в центре каждой из которых имеется вертикальный полый канал (рис. 2.5.1). Строение ПАОА характеризуется следующими параметрами, определяющими области применения и свойства оксида:

1) размер оксидной ячейки (период пористой структуры), который представляет собой диаметр окружности вписанной в шестиугольную проекцию ячейки;

2) диаметр поры;

3) толщина барьерного слоя;

4) толщина пористого слоя.



**Рис. 2.5.1.** Схема строения пористого оксида алюминия [34].

Геометрические характеристики оксида зависят от типа электролита, электрических параметров и времени формирования пленки. В результате экспериментальных исследований была установлена линейная зависимость

между размером оксидной ячейки и напряжением формирования оксидной пленки [34]:

$$D_C = -1,7 + 2,8U_A, \quad (2.5.1)$$

где  $D_C$  – размер оксидной ячейки, а  $U_A$  – анодное напряжение.

Выбор типа кислоты, входящей в состав электролита, является определяющим фактором для диаметра пор оксидной пленки (табл. 2.5.1) [34].

Таблица 2.5.1

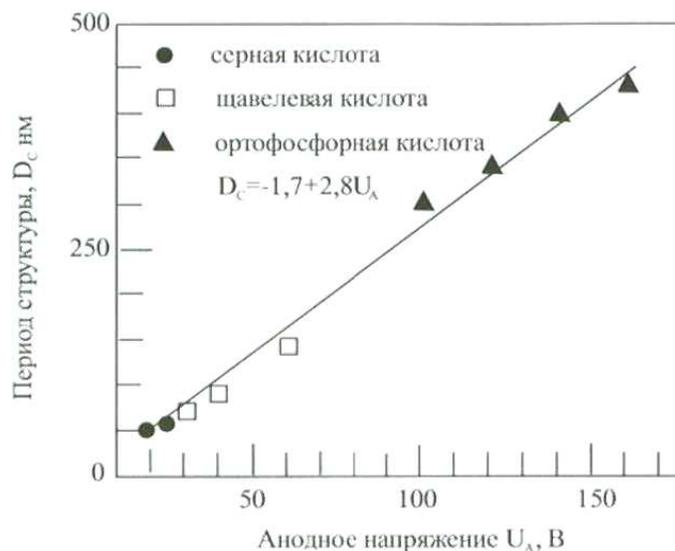
Электролит	Напряжение формирования, В	Диаметр оксидной ячейки, нм	Диаметр пор, нм	Толщина барьерного оксида
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5 – 25	13 – 65	8 – 40	5 – 25
(COOH) <sub>2</sub>	30 – 60	80 – 160	50 – 120	30 – 60
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	60 – 150	150 – 400	120 – 250	60 – 150

Зависимость диаметра оксидной ячейки от состава электролита представлена на рис. 2.5.2. Диаметр оксидной ячейки в интервале от 150 до 300 нм в однокомпонентных электролитах не достигается. Для получения размера оксидной ячейки в заданном диапазоне необходимо ввести в ортофосфорную кислоту небольшое количество серной или щавелевой кислоты.

Существует возможность формирования идеально упорядоченных структур ПАОА (рис. 2.5.3). Этот результат может быть достигнут несколькими способами:

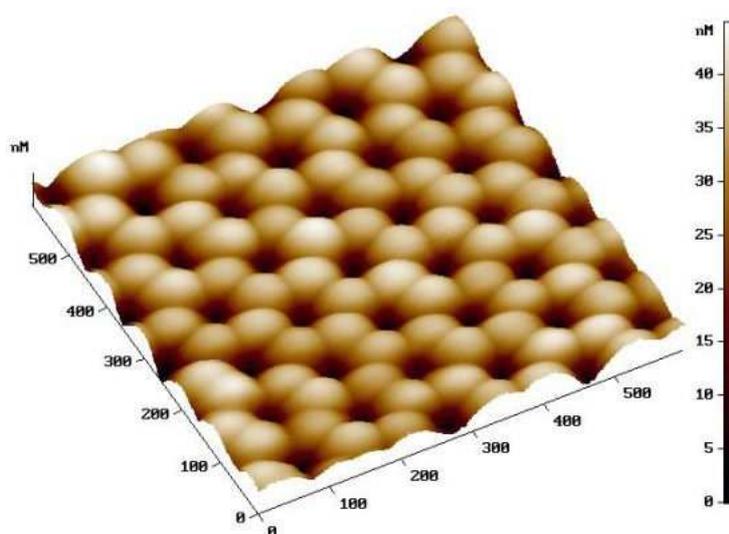
1. Анодное полирование алюминия в HClO<sub>4</sub> : C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>OH = 1 : 3 позволяет достичь формирования упорядоченного рельефа. При этом необходимо помнить, что данный раствор взрывоопасен при инициации электрическим зарядом.
2. Применение двустадийного анодирования дает возможность получения упорядоченной пористой структуры на поверхности алюминия. Первая стадия включает в себя создание упорядоченного рельефа границ раздела оксид/металл в течение некоторого времени. Затем выполняется

селективное удаление анодной пленки. На второй стадии при температуре 90 °С на поверхности алюминия формируется упорядоченная пористая структура в растворе 20 г/л  $\text{CrO}_3$  и 35 г/л  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .



**Рис. 2.5.2.** Зависимость периода расположения пор от напряжения.

Такие способы применимы только для достаточно толстых пленок, толщина которых достигает более 100 мкм, т.к. при подготовке поверхности удаляется несколько десятков микрон поверхностного слоя.



**Рис. 2.5.3.** Рельефное изображение самоорганизующейся матрицы пористого  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученное методом зондовой сканирующей микроскопии.

## **Контрольные вопросы**

1. Перечислите физические и химические методы получения тонких пленок.
2. Чем отличаются методы термического напыления от методов катодного напыления?
3. В чем разница между методами вакуумного и плазменного напыления тонких пленок?
4. Каковы достоинства метода магнито-плазменного напыления по сравнению с другими методами?
5. Как осуществляется получение пленок Ленгмюра-Блоджетт?
6. На чем основаны физические методы получения нанопорошков?
7. В чем достоинства и недостатки механических методов получения нанопорошков?
8. Каким образом получают нанопорошки с помощью химических методов?
9. Какой способ получения углеродных нанотрубок является самым распространенным?
10. Какие пористые материалы используются для получения нанокомпозитов?
11. В чем заключаются особенности строения кристаллической решетки цеолитов?
12. Как осуществляется синтез мезопористых наноматериалов (MCM и SBA)?
13. В чем особенности получения пористых пленок методом анодирования?

### **3. Методы исследования наноматериалов**

Для исследования наноматериалов в принципе могут применяться практически те же методы, что и для исследования объемных материалов. Однако у наноматериалов существует особая специфика, которая заключается в предъявлении повышенных требований к разрешающей способности методов. Таким образом, можно выделить ряд методов, применение которых позволяет учесть специфику наноматериалов:

- электронная микроскопия;
- зондовая микроскопия;
- метод ядерного магнитного резонанса;
- диэлектрическая спектроскопия.

#### **3.1. Электронная микроскопия**

По сравнению со световыми микроскопами, разрешающая способность которых ограничена пределом Релея, согласно которому разрешение микроскопа не может быть больше половины длины волны освещающего объект света, применение электронного луча с малой длиной волны позволяет существенно увеличить разрешающую способность до нанометрового диапазона [35-39]. В 1931 г. Р. Руденберг получил патент на просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ), а в 1932 г. М. Кнолль и Э. Руска построили первый просвечивающий микроскоп, применив магнитные линзы для фокусировки электронов. Растровый электронный микроскоп (РЭМ) был изобретен в 1952 г. Чарльзом Отли. И лишь после ряда технических усовершенствований он был внедрен в производство в середине 60-х годов.

**Просвечивающая электронная микроскопия.** Схема работы просвечивающего электронного микроскопа приведена на рис. 3.1.1. Электроны эмитируются посредством термоэлектронной эмиссии из нити накаливания как в обычной лампе накаливания. Затем электроны ускоряются высокой разностью потенциалов и фокусируются на образце электромагнитными линзами. Прошедший через образец луч содержит информацию об электронной

плотности, фазе и периодичности, которые используются при формировании изображения.

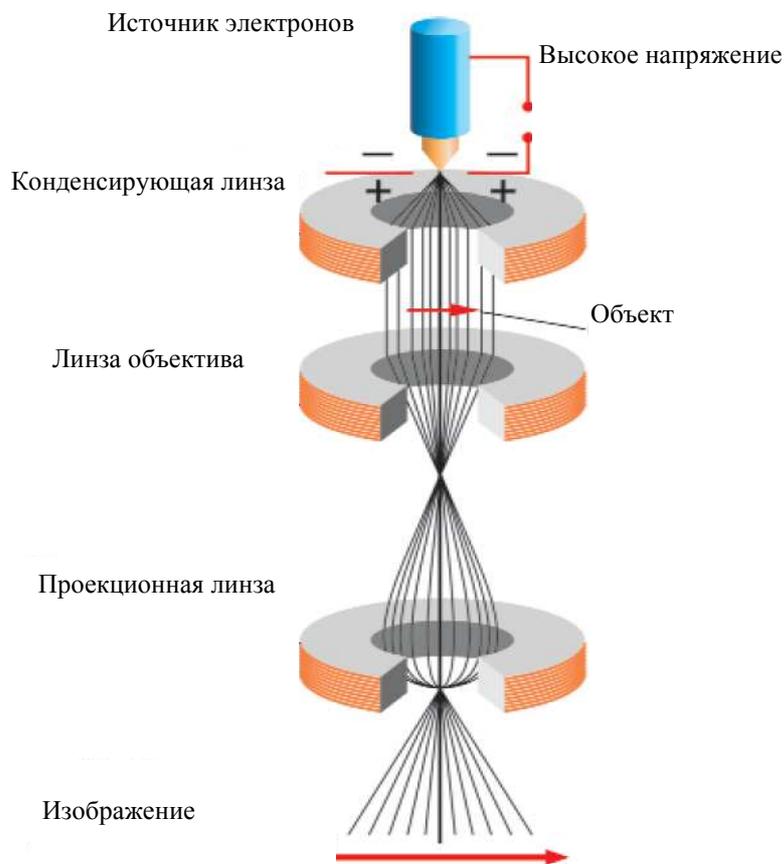
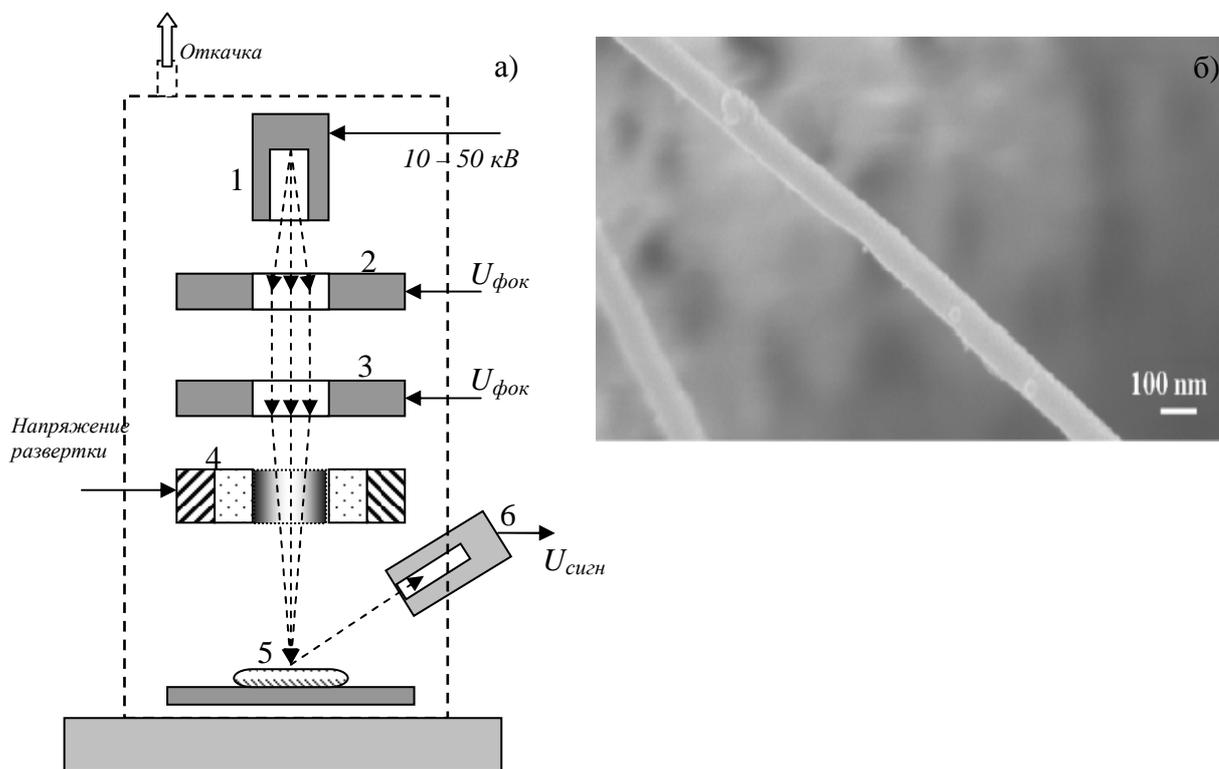


Рис. 3.1.1. Схема работы ПЭМ.

Просвечивающая электронная микроскопия дает возможность получить в одном эксперименте изображения с высоким разрешением и микродифракционные картины одного и того же участка образца. Современные просвечивающие электронные микроскопы обеспечивают разрешение до 0,1 нм и размер участка, с которого снимается микродифракционная картина, до 50 нм. По полученному изображению можно судить о строении материала, а по дифракционной картине – о типе кристаллической решетки.

**Растровая электронная микроскопия (РЭМ).** В растровом электронном микроскопе изображение исследуемого объекта формируется при сканировании его поверхности точно сфокусированным лучом электронов. Такой луч часто называют электронным зондом. Диаметр зонда может составлять 5

– 1000 нм. Процесс работы РЭМ аналогичен телевизионной развертке (рис. 3.1.2). Тонкий луч электронов при помощи отклоняющей системы обегает образец построчно и синхронно передает сигнал на экран. Источником электронов обычно служит вольфрам, из которого в результате термоэлектронной эмиссии испускаются электроны.



**Рис. 3.1.2.** Принцип работы растрового электронного микроскопа (а) (1 – электронная пушка, 2 – конденсорная линза, 3 – линза объектива, 4 – отклоняющая система, 5 – исследуемый образец, 6 – детектор отраженных электронов) и изображение нанопроволоки AgI, полученное с помощью РЭМ (б).

В зависимости от механизма регистрации сигнала различают несколько режимов работы сканирующего электронного микроскопа: режим отражённых электронов, режим вторичных электронов, режим катодolumинесценции и др. Разработанные методики позволяют исследовать не только свойства поверхности образца, но и визуализировать информацию о свойствах подповерхностных структур.

Для формирования картины поверхности используют отраженные электроны и вторичные электроны. Создаваемые ими сигналы после их регистра-

ции приборами усиливают, а затем используют для модуляции яркости изображения на электронно-лучевой трубке, развертка которой синхронна со смещением электронного зонда. Таким образом, между каждой точкой на поверхности образца ставится в соответствие точка на экране электронно-лучевой трубки. Яркость изображения пропорциональна интенсивности сигнала от соответствующей точки на изучаемой поверхности.

При использовании сигнала от отраженных электронов получается информация от слоя толщиной 1 – 2 мкм и диаметром существенно большим зоны падения электронного луча. Изображение поверхности получается с не очень высоким разрешением, зато отличается сильным черно-белым контрастом.

При использовании сигнала от вторичных электронов достигается наибольшее разрешение, так как вторичные электроны возникают в слое толщиной порядка 1 нм, а зона их возникновения ограничена областью вокруг падения электронного луча. Контрастность изображения несколько ниже, чем при использовании отраженных электронов, однако оно имеет стереометрический характер.

Важным достоинством РЭМ является сочетание большой разрешающей способности (до 5 – 10 нм) с большой глубиной фокуса. Это позволяет проводить высококачественные исследования поверхности шероховатых образцов.

### **3.2. Зондовая микроскопия**

Данная группа методов является наиболее широко используемой в области наноматериалов и нанотехнологий [40-50]. Основная идея всех методов этой группы заключается в использовании зонда – устройства считывания информации с поверхности исследуемого материала (рис. 3.2.1). В зависимости от типа используемого зонда различают несколько разновидностей зондовых микроскопов: сканирующий туннельный микроскоп, сканирующий атомно-силовой микроскоп, сканирующий магнитный микроскоп и т.д.

Перемещение образца по координатам  $x$  и  $y$  в процессе сканирования осуществляется при помощи пьезосканера, работающего в линейном режиме. Пьезосканер обычно изготавливается из керамики цирконата-титаната свинца (ЦТС), поскольку она обладает наибольшим пьезомодулем. Возможна и другая конструкция СЗМ, когда зонд перемещается над образцом.

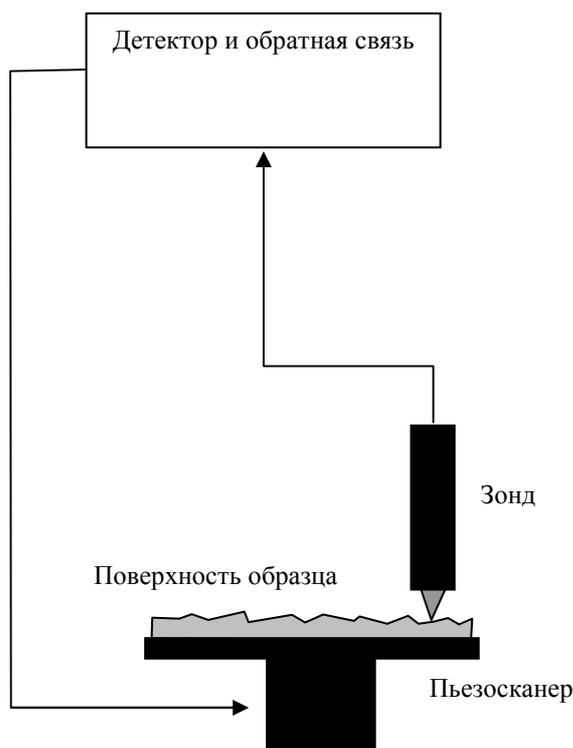
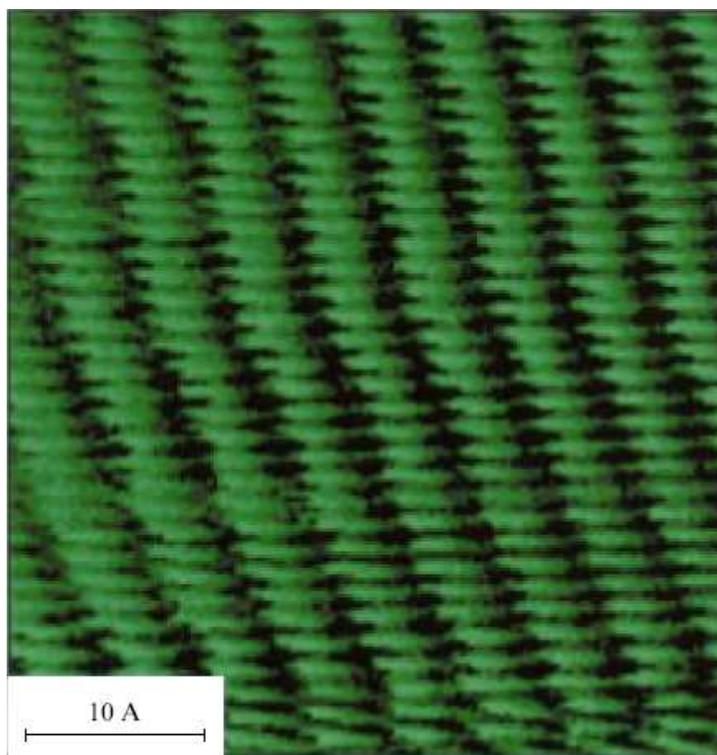


Рис. 3.2.1. Схема зондового сканирующего микроскопа.

**Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ).** В этом методе в качестве зонда используется электропроводящее острие. Между зондом и образцом создается электрическое напряжение порядка  $0,1 - 10$  В. В зазоре возникает туннельный ток величиной около  $1 - 10$  нА, который зависит от свойств и конфигурации атомов на исследуемой поверхности материала. Этот ток регистрируется приборами. Туннельным этот метод называется в связи с тем, что ток возникает вследствие туннельного эффекта, а именно квантового перехода электрона через область, запрещенную классической механикой. Этой областью и является зазор величиной  $2 - 10$  Å между кончиком иглы и ближайшей точкой поверхности исследуемого материала.

Энергия туннелирующих электронов составляет порядка 1 эВ. В современных приборах реализуют режим, при котором величина туннельного тока поддерживается постоянной за счет приборной реализации обратной связи, меняющей величину зазора. Таким образом, изменение положения зонда в процессе сканирования будет повторять рельеф поверхности исследуемого образца. В наиболее благоприятных условиях метод сканирующей туннельной микроскопии обеспечивает разрешение по плоскости (координаты  $x$  и  $y$ ) до 1 Å, а по высоте (координата  $z$ ) – до 0,01 Å.

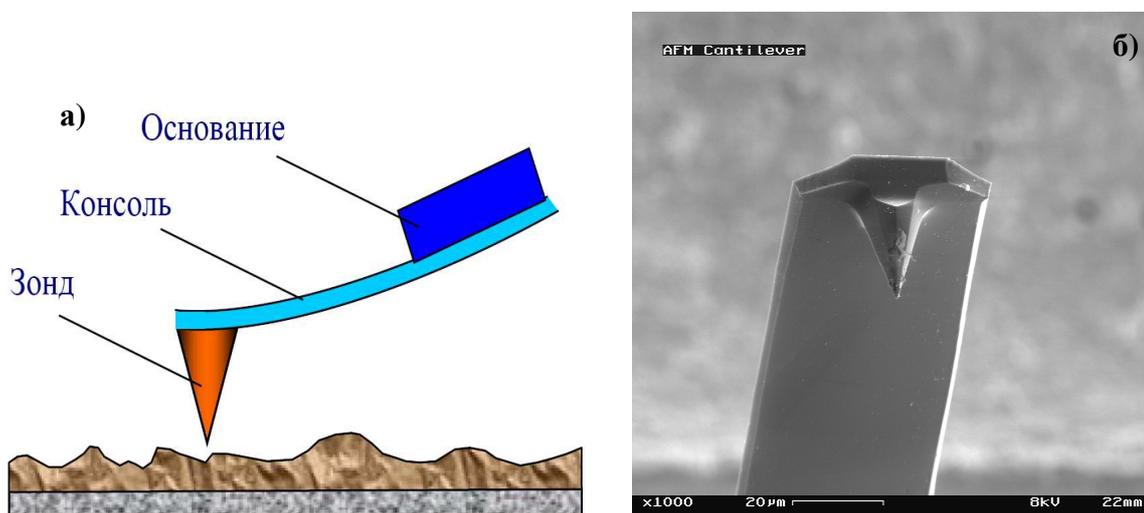
Ограничениями метода сканирующей туннельной микроскопии являются обязательность электропроводности материала исследуемого образца и необходимость высокого или сверхвысокого вакуума и низких температур (до 50 – 100 К) для получения высоких разрешений. В то же время для разрешения в диапазоне порядка 1 нм эти требования необязательны. На рис. 3.2.2 в качестве примера приведен снимок поливинилиденфторида с трифторэтиленом P(VDF – TrFE 70:30), полученный при помощи СТМ.



**Рис. 3.2.2.** СТМ изображение монослоя P(VDF – TrFE 70:30) на графитовой подложке.

**Атомно-силовая микроскопия (АСМ).** В режиме АСМ регистрируют изменение силы взаимодействия кончика зонда (иглы) с исследуемой поверхностью. Игла располагается на конце консольной балки с известной жесткостью, способной изгибаться под действием небольших сил, возникающих между поверхностью образца и вершиной острия. Балка с иглой носит название кантилевера (рис. 3.2.3). Деформация кантилевера измеряется по отклонению лазерного луча, падающего на его тыльную поверхность, или с помощью пьезорезистивного эффекта, возникающего в материале кантилевера при изгибе.

Имеется несколько вариантов метода атомно-силовой микроскопии. При контактном режиме кончик иглы (алмазной, фулеритовой или кремниевой с упрочняющим покрытием) в рабочем состоянии непрерывно находится в контакте с исследуемой поверхностью. При простоте реализации этого метода имеется и недостаток – возможность повреждения исследуемого материала или иглы.



**Рис. 3.2.3.** Контакт кантилевера с поверхностью в АСМ (а) и его электронная фотография (б).

При резонансном режиме (режим «обстукивания») проводится измерение параметров собственных колебаний кантилевера (резонансные частоты, затухания колебаний, сдвиг фаз между воздействующей силой и смещением).

Для получения изображения электрической и магнитной структуры поверхности используют безконтактный режим, при котором зонд находится на некотором расстоянии над поверхностью. Для снятия изображения магнитной структуры используют кантилеверы, у которых зонд покрыт магнитным материалом. Соответственно, для получения картины распределения зарядов используют кантилеверы, у которых зонд покрыт проводящим материалом. На рис. 3.2.4 показан скан доменной структуры сегнетоэлектрика триглицинсульфата (ТГС) с использованием зонда покрытого золотом.

Все разновидности зондовой микроскопии отличаются друг от друга выбором соответствующего зонда. При этом могут быть исследованы следующие характеристики поверхности:

плотность электронных состояний;

оптические свойства с применением оптического сканирующего микроскопа ближнего поля;

локальная температура поверхности – сканирующим тепловым микроскопом;

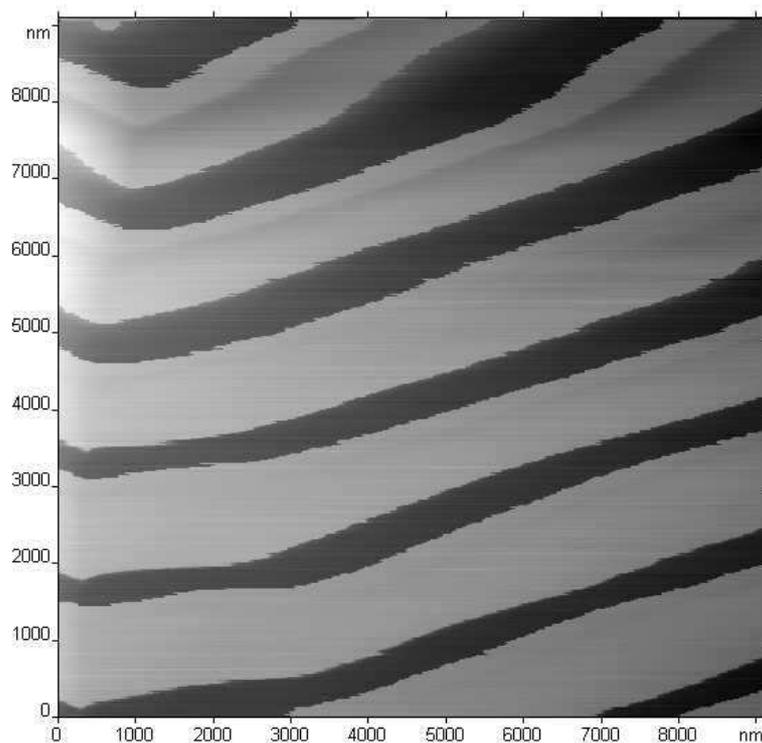
диэлектрические постоянные – сканирующим емкостным микроскопом;

магнитную структуру поверхности – магнитным микроскопом в силовом или резонансном режиме;

слой Гельмгольца – сканирующим электрохимическим микроскопом;

распознавание биологических молекул;

химическую информацию.



**Рис. 3.2.4.** АСМ изображение доменной структуры монокристалла триглицидсульфата. Снимок получен авторами в бесконтактном режиме.

### 3.3. Ядерный магнитный резонанс

Явление ядерного магнитного резонанса широко используется в физике твердого тела для определения локальных характеристик веществ, содержащих ядра с отличным от нуля спином [51]. Данный метод применяется и для исследования низкоразмерных систем [52,53].

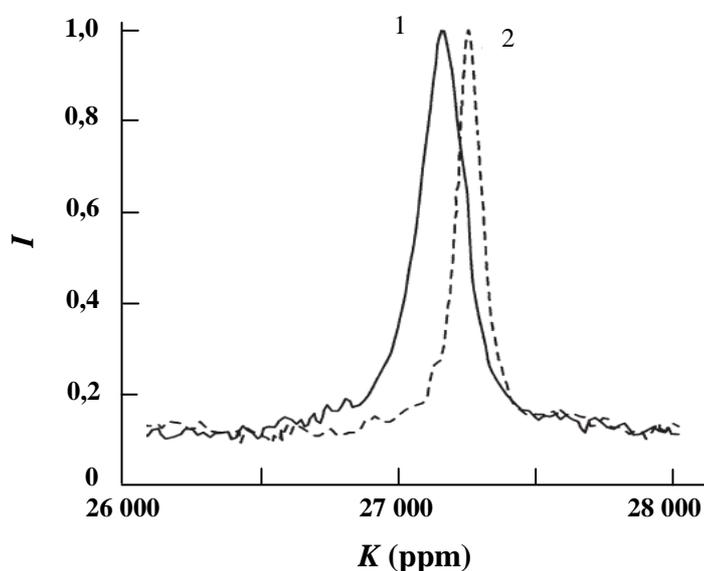
Для проводящих веществ в результате взаимодействия электронов проводимости с ядром происходит сдвиг линии ЯМР относительно диэлектрических веществ, содержащих аналогичные ядра (сдвиг Найта) [54]. Величина сдвига прямо пропорциональна парамагнитной восприимчивости электронов проводимости и описывается выражением

$$K = \frac{8\pi}{3} \frac{\chi_p}{N_0} \overline{|\chi_F(0)|^2}, \quad (3.3.1)$$

где  $N_0$  – число ядер в единице объема,  $\overline{|\chi_F(0)|^2}$  – средняя плотность вероятности нахождения электронов на сфере Ферми в месте расположения ядра.

Сдвиг Найта был обнаружен для малых частиц ртути, олова и меди [54-56]. Было показано, что величина найтовского сдвига для ртути в пористых углях относительно объемной ртути находится в пределах погрешности измерений [57]. Тогда как для пористых стекол, заполненных ртутью, было обнаружено, что различие в сдвиге Найта в сравнении с объемной ртутью весьма существенно [58].

Для спектров ЯМР, наблюдается уширение линий относительно объемных материалов, связанное с усреднением локальных свойств частиц, имеющих разный размер. В частности было обнаружено уширение спектральной линии ЯМР для активированных углей, наполненных ртутью (рис. 3.3.1).



**Рис. 3.3.1.** Спектры ЯМР  $^{199}\text{Hg}$  в активированном угле (1) и объемной ртути (2) при температуре 250 К.

### **3.4. Диэлектрическая спектроскопия**

Вид частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости позволяет судить о механизмах диэлектрической поляризации и потерь, получить количественные значения характеристических частот и диэлектрических вкладов этих механизмов [59]. В отличие от ЯМР методов, позволяющих изучать локальные свойства твердых тел, диэлектрические методы дают отклик всей системы в целом в результате пространственного усреднения локальных свойств [60].

В случае одного времени релаксации  $\tau$  частотная зависимость диэлектрической проницаемости описывается формулой Дебая

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 - i\omega\tau}, \quad (3.4.1)$$

а мнимая и действительная части будут определяться как

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (3.4.2)$$

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (3.4.3)$$

где  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_\infty$  – статическая и высокочастотная диэлектрическая проницаемости,  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$  – глубина дисперсии,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота. Для нахождения выражения для  $\tau$  может быть использовано уравнение Ландау-Халатникова для малых значений  $P$  и  $E$  [61]

$$\xi \frac{dP}{dt} = -\alpha P, \quad (3.4.4)$$

где  $\alpha = \alpha_0(T - T_c)$ ,  $T_c$  – температура фазового перехода,  $\xi$  – коэффициент затухания колебаний. Из (3.4.4) можно получить выражение для  $\tau$  вблизи фазового перехода при температуре  $T < T_c$ :

$$\tau = \frac{\xi}{2\alpha} = \frac{\xi}{\alpha_0(T_c - T)}. \quad (3.4.5)$$

В теории Коула-Коула в отличие от теории Дебая используется не одно время релаксации  $\tau$ , а симметричная функция распределения времен релаксации с наиболее вероятным значением  $\tau_0$

$$\varepsilon^*(\omega) - \varepsilon_\infty = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau_0)^{1-\lambda}}, \quad (3.4.6)$$

где  $\lambda$  – ширина спектра времен релаксации.

Ассиметричная функция распределения времен релаксации была рассмотрена в теории Гаврильяка-Негами [62]. Диэлектрическая проницаемость с учетом асимметрии функции распределения

$$\varepsilon^*(\omega) - \varepsilon_\infty = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{[1 + (i\omega\tau_0)^{1-\lambda}]^\alpha}, \quad (3.4.7)$$

где  $\alpha$  – параметр, характеризующий асимметричность спектра времен релаксации. При исследовании методом диэлектрической спектроскопии ультратонких сегнетоэлектрических пленок сополимера поливинилиденфторида с трифторэтиленом было обнаружено, что имеет место дебаевский тип диэлектрической релаксации и время релаксации  $\tau$  зависит от толщины пленки [63].

### **3.5. Другие методы исследования**

Существуют методы исследования поверхности твердых тел, основанные на анализе энергетических спектров отраженных излучений, возникающих при облучении изучаемого материала электронами, ионами или фотонами.

**Электронная Оже-спектроскопия.** Этот метод основан на энергетическом анализе вторичных Оже-электронов [64,65]. Эффект Оже назван по имени французского физика, открывшего его в 1925 г. Падающий электрон выбивает электрон внутренней оболочки атома. В результате возбуждения атомов на поверхности образца наблюдается эмиссия вторичных электронов. Малая доля из них (порядка  $10^{-5}$ ) покидает образец в результате межорбитальных переходов без одновременного испускания фотонов (квантов рентгеновского излучения). Такие электроны называются Оже-электронами. Кинетическая энергия Оже-электрона определяется разницей энергий внутренней оболочки, с которой электрон был выбит, и энергией более высоколежащего энергетического уровня, откуда на образовавшуюся вакансию переходит электрон с выбросом Оже-электрона. По энергии Оже-электронов можно судить о свойствах атомов, которые их испустили.

Таким образом, анализ энергетических спектров Оже-электронов позволяет судить о химическом составе поверхностного слоя исследуемого вещества, а в ряде случаев также дает сведения о химических связях атомов в нем. Существует возможность определения всех элементов тяжелее гелия. В приборах реализующих электронную Оже-спектроскопию энергия электронов в падающем пучке составляет 0,1 – 3 кэВ. При этом исследуется состав поверхности на глубине 0,5 – 3,0 нм. Основной вклад в сигнал дают первые два-

три слоя атомов. Разрешение по поверхности определяется диаметром первичного пучка электронов и составляет до 50 нм.

**Масс-спектроскопия вторичных ионов.** При этом методе происходит распыление поверхности исследуемого материала пучком ионов с последующим анализом продуктов распыления, а именно выбитых вторичных ионов. Вторичные ионы несут информацию о химическом составе 2 – 3 поверхностных атомных слоев в зоне зонда и исследуются посредством масс-спектрометра. Метод обладает высокой чувствительностью и позволяет определять все химические элементы, включая водород и гелий. Разрешение по глубине составляет 1 – 10 нм, а по поверхности зависит от устройства формирования ионного пучка и может составлять от 3 мкм до 500 нм, а при использовании специальных источников ионов и до 40 нм [64,65].

**Лазерный микрозондовый анализ.** Метод основан на использовании пучка импульсного лазерного излучения, под действием которого происходит испарение микрообъема материала из выбранной точки поверхности и его ионизация. Образующиеся ионы анализируются масс-спектрометром. Исследование материала проводят в вакууме. Длительность импульса излучения в ультрафиолетовом диапазоне светового спектра составляет 30 нс и менее. Диаметр пятна достигает 100 – 500 нм. Благодаря относительно малой плотности энергии в пятне ( $10^8 - 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>), невысокой начальной энергии испарившихся ионов (порядка 60 эВ) и малому рассеянию этой энергии обеспечивается высокая чувствительность анализа при весьма низких содержаниях элементов. Метод позволяет исследовать все виды материалов и анализировать как положительные, так и отрицательные ионы всех химических элементов, а также разрешать изотопы и идентифицировать органические радикалы. Недостатком метода является достаточно низкая точность определения количественного содержания элементов (для основных элементов погрешность до 10 %, а для элементов, присутствующих в очень малом количестве – до 30 %).

## **Контрольные вопросы**

1. Перечислите требования, предъявляемые к методам исследования наноматериалов.
2. Какую информацию о кристалле можно получить с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии?
3. Каким образом формируется изображение в растровом электронном микроскопе?
4. От чего зависит разрешающая способность электронного микроскопа?
5. В чем особенности метода сканирующей туннельной микроскопии?
6. В каких режимах можно исследовать образцы с помощью атомно-силового микроскопа?
7. Какие характеристики поверхности могут быть исследованы с помощью метода зондовой микроскопии?
8. От чего зависит разрешающая способность атомно-силового микроскопа?
9. Как явление ядерного магнитного резонанса может быть использовано для исследования низкоразмерных систем?
10. В чем отличие метода диэлектрической спектроскопии от ЯМР-метода?
11. Какую информацию об исследуемом материале можно получить методами ОЖЕ-спектроскопии?
12. В чем достоинства метода масс-спектроскопии вторичных ионов?
13. На чем основан метод лазерного микрозондового анализа?

## 4. Влияние размерных эффектов на физические свойства твердых тел

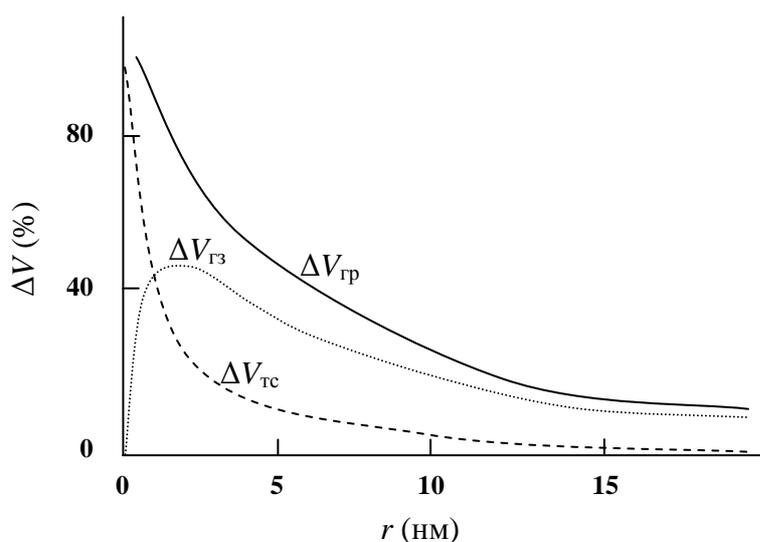
### 4.1. Механические свойства наноматериалов

Проблема прочности материалов – одна из важнейших в технике. Она занимает главенствующее положение применительно к разработке новых конструкционных и инструментальных материалов нового поколения. Для теоретического осмысления экспериментальных результатов механических свойств наносистем необходимо разделять эффекты, связанные с границами раздела и размером частиц.

**Зависимость свойств от размера зерен.** Наиболее сильные изменения свойств наночастиц и наноматериалов наступают в диапазоне размеров кристаллитов 100 – 10 нм. Это связано с тем, что для наночастиц доля атомов, находящихся в тонком поверхностном слое (порядка 1 нм), по сравнению с мезо- и микрочастицами заметно возрастает. Действительно, доля приповерхностных атомов будет пропорциональна отношению площади поверхности частицы  $S$  к ее объему  $V$ . Если обозначить характерный размер частицы (кристаллита) как  $D$ , то  $S/V \sim D^2/D^3 \sim 1/D$ . У поверхностных атомов, в отличие от находящихся в объеме, задействованы не все связи с соседними атомами. В результате в приповерхностном слое возникают сильные искажения кристаллической решетки и даже может происходить смена типа решетки. Другим аспектом является тот факт, что свободная поверхность представляет собой сток бесконечной емкости для точечных и линейных кристаллических дефектов (в первую очередь вакансий и дислокаций). При малых размерах частиц этот эффект заметно возрастает, что может приводить к выходу большинства структурных дефектов на поверхность и очистке объема наночастицы от дефектов структуры и химических примесей. В настоящее время установлено, что процессы деформации и разрушения протекают в тонком приповерхностном слое с опережением по сравнению с внутренними объемами металлического материала, это во многом определяет возникновение

ряда физических эффектов, в т.ч. физического предела текучести и физического предела усталости [66,67]. Для наночастиц определенного размера весь материал будет работать как приповерхностный слой.

Следующей причиной специфики свойств наноматериалов является увеличение объемной доли границ раздела с уменьшением размера зерен или кристаллитов. При этом можно выделить объемную долю следующих составляющих: границ раздела, границ зерен и тройных стыков. Объемную долю границ раздела можно оценить по формуле  $\Delta V_{ГР} = 1 - [(D - s)/D]^3$ , где  $s$  – толщина границ раздела (около 1 нм), а  $D$  – характерный размер зерна или кристаллита. Объемную долю границ зерен – по формуле  $\Delta V_{ГЗ} = [3s(D - s)^2]/D^3$ , а объемную долю тройных стыков как разность  $\Delta V_{ТС} = \Delta V_{ГР} - \Delta V_{ГЗ}$ . На рис. 4.1.1 представлены рассчитанные по этим формулам зависимости указанных объемных долей [68]. Видно, что с уменьшением размера зерна от 1 мкм до 2 нм объемная доля межзеренной компоненты (границ раздела) увеличивается с 0,3 до 87,5 %. Объемные доли межзеренной и внутризеренной компонент достигают одинакового значения 50 % при размере зерна около 5 нм. При размере зерна менее 10 нм начинает сильно возрастать доля тройных стыков.



**Рис. 4.1.1.** Зависимость объемных долей границ раздела, границ зерен и тройных стыков от размера зерен [68].

Неравновесность границ зерен вызывает возникновение высоких напряжений и искажения кристаллической решетки, изменение межатомных расстояний и появление значительных смещений атомов, вплоть до потери дальнего порядка. Результатом является значительное повышение микротвердости.

Экспериментальные данные по размерной зависимости микротвердости нанокристаллических материалов достаточно противоречивы, что может быть следствием разной структуры границ раздела [69]. Первые исследования по влиянию размера зерен на микротвердость проводились для нанокристаллических металлов (Cu и Pd). Было установлено, что уменьшение зерен крупнозернистой меди от  $25 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^3$  нм сопровождается ростом микротвердости. Микротвердость  $H_v$  нанокристаллической меди ( $d \sim 16$  нм) была в  $\sim 2,5$  раза больше, чем меди с размером зерна  $5 \cdot 10^3$  нм, однако при уменьшении зерен от 16 до 8 нм  $H_v$  понижалась на  $\sim 25$  %. Понижение  $H_v$  наблюдалось и при уменьшении зерен Pd от 13 до 7 нм. На рис. 4.1.2 показано влияние величины зерна на твердость нитрида бора.

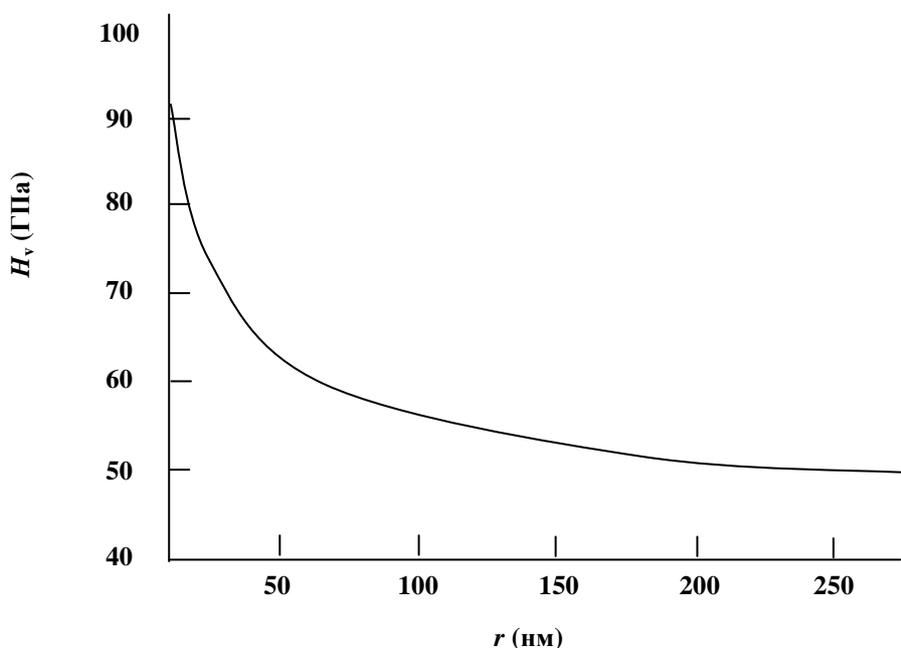


Рис. 4.1.2. Влияние величины зерна на твердость нитрида бора [70].

Наноматериалы также могут обладать сверхпластичностью. Сверхпластичность характеризуется исключительно большим относительным удлинением материала при растяжении. Впервые это явление было продемонстрировано в 1934 г. на примере удлинения сплава Sn-B более чем в 20 раз. В 1985 г. была обнаружена сверхпластичность керамики на поликристаллическом тетрагональном оксиде  $ZrO_2$ , стабилизированном оксидом иттрия  $Y_2O_3$ .

Сверхпластичность керамических материалов очень важна для получения из них изделий путем формования, твердофазного спекания, горячего прессования при достаточно низких температурах. Благодаря сверхпластичности достигается высокая точность размеров керамических изделий очень сложной формы, имеющих внутренние полости и поверхности с меняющейся кривизной.

Интересными объектами с точки зрения их механических свойств являются вискеры и нановискеры [71]. Под вискерами понимают нитевидные кристаллы, для которых соотношение длины к диаметру более 1000. Они, как правило, имеют совершенное, почти идеальное бездислакационное строение, что исключает обычные механизмы пластической деформации и приближает их прочность к теоретическому для данного вещества порогу. Вискеры в десятки и даже сотни раз могут быть прочнее обычных кристаллов, обладают поразительной гибкостью, коррозионной стойкостью и кристаллографической анизотропией свойств.

Благодаря чрезвычайной гибкости и прочности, нановискеры используют в АСМ в качестве острия для кантилеверов, позволяющих получать атомарное разрешение поверхности. Среди них нужно выделить кантилеверы Клинова (рис. 4.1.3) [72]. На острие зонда данных кантилеверов выращено множество нановискеров различной длины. В этой связи использовать такой кантилевер можно многократно.

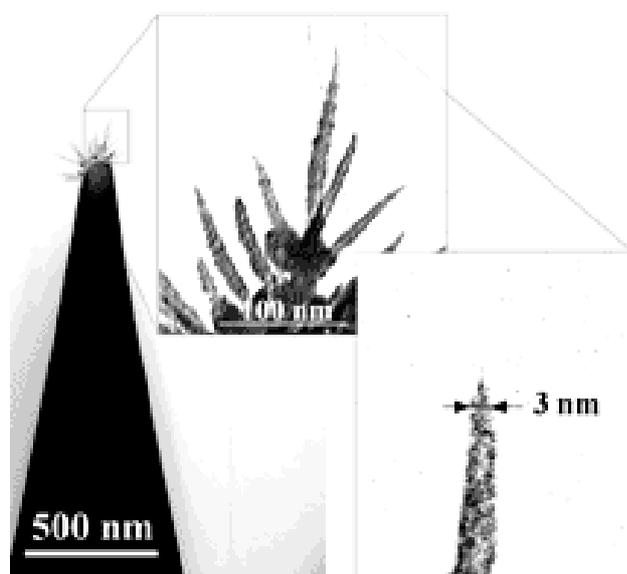


Рис. 4.1.3. РЭМ изображение висцерного кантилевера Клинова [72].

**Перспективные направления применения.** Анализ проведенных в последние годы отечественных и зарубежных исследований свидетельствует о высокой перспективности следующих основных направлений в области разработки конструкционных материалов: изготовление наноструктурных керамических и композиционных изделий точной формы, создание наноструктурных твердых сплавов для производства режущих инструментов с повышенной износостойкостью и ударной вязкостью, создание наноструктурных защитных термо- и коррозионно-стойких покрытий, создание обладающих повышенной прочностью и низкой воспламеняемостью полимерных композитов с наполнителями из наночастиц и нанотрубок [73].

Наноструктурные материалы отличаются большой прочностью при статическом и усталостном нагружении, а также твердостью по сравнению с материалами с обычной величиной зерна. Поэтому основное направление их использования в качестве высокопрочных и износостойких материалов. Так предел текучести увеличивается по сравнению с обычным состоянием в 2,5 – 3 раза, а пластичность либо уменьшается очень незначительно, либо для  $\text{Ni}_3\text{Al}$  возрастает в 4 раза [74]. Композиты, армированные углеродными нановолокнами и фуллеренами, рассматриваются как перспективные материалы

для работы в условиях ударных динамических воздействий, в частности для брони и бронежилетов [74].

Инструментальные сплавы с нанозерном являются, как правило, более стойкими по сравнению с обычным структурным состоянием. Нанопорошки металлов с включениями карбидов используют в качестве шлифующего и полирующего материала на конечных стадиях обработки полупроводников и диэлектриков.

Важным и перспективным в настоящее время является использование наноматериалов в качестве компонентов композитов самого разного назначения. Добавление нанопорошков (подшихтовка) к обычным порошкам при производстве сталей и сплавов методами порошковой металлургии позволяет снижать пористость изделий, улучшать комплекс механических свойств. Проявление эффекта сверхпластичности в наноструктурных сплавах алюминия и титана делает перспективным их применение для изготовления деталей и изделий сложной формы и использования в качестве соединительных слоев для сварки различных материалов в твердом состоянии [74].

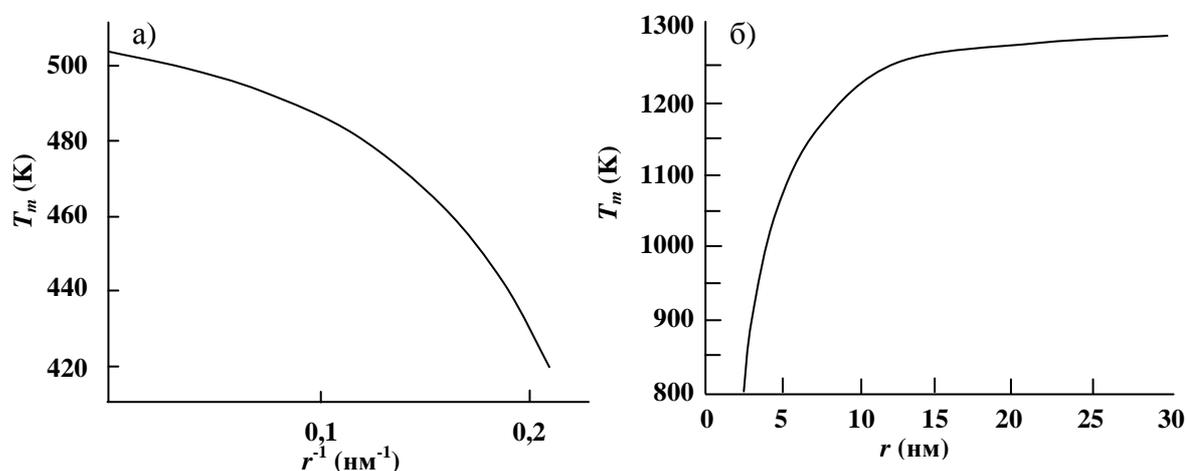
В последние годы разработаны нанокompозитные металлокерамические материалы, в частности, на основе WC/Co и TiC/Fe, значительно превосходящие по износостойкости, прочности и ударной вязкости аналоги с обычной микроструктурой. Повышенные эксплуатационные характеристики нанокompозитных материалов обусловлены образованием при спекании специфических непрерывных нитевидных структур, формирующихся в результате трехмерных контактов между наночастицами разных фаз. Разработка и внедрение в промышленное производство технологии создания нанокompозитных изделий будет способствовать решению проблемы изготовления высококачественных режущих инструментов.

## 4.2. Изменение тепловых свойств малых частиц и наноструктурированных материалов

Согласно рассмотренным в главе 1 причинам, приводящим к размерной зависимости свойств тел, в первую очередь должны измениться следующие тепловые свойства: температуры плавления и полиморфных превращений, теплоемкость, температура Дебая. Понижение температуры плавления для малых частиц было обнаружено для: Sn, Ag, Cu, Al, Au, Pb, Sn, Bi, In, Ga [75-77]. Исследования для частиц олова диаметром от 8 до 80 нм (рис. 4.2.1а) показали сильное отклонение экспериментальных данных от формулы Томсона (1.1.6). Однако данные хорошо аппроксимируются формулой (1.1.7), при этом зависимость имеет следующий вид:

$$T_m(r) = 505 - 40 \left( \frac{3,74}{r - 3,2} - \frac{1}{r} \right). \quad (4.2.1)$$

Также хорошо согласуется с формулой (1.1.7) зависимость  $T_m(r)$  для частиц золота в интервале от 2 до 30 нм (рис. 4.2.1б).



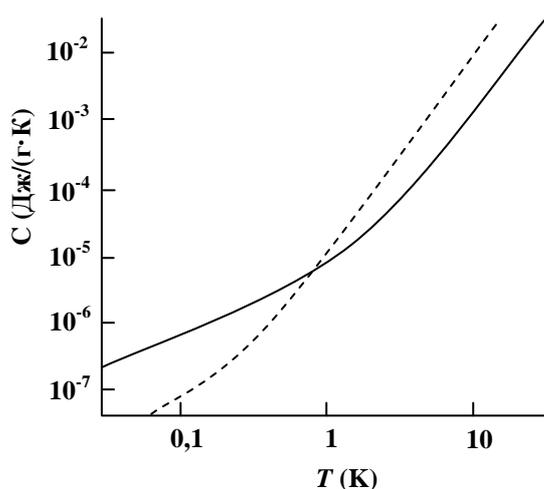
**Рис. 4.2.1.** Понижение температуры плавления  $T_m$  для наночастиц олова Sn [75] (а) и золота [76] (б) в зависимости от их радиуса.

Анализируя данные разных авторов по зависимости температуры плавления малых частиц от их размеров, можно заключить, что температуры плавления частиц размером более 10 нм и массивных кристаллов почти не

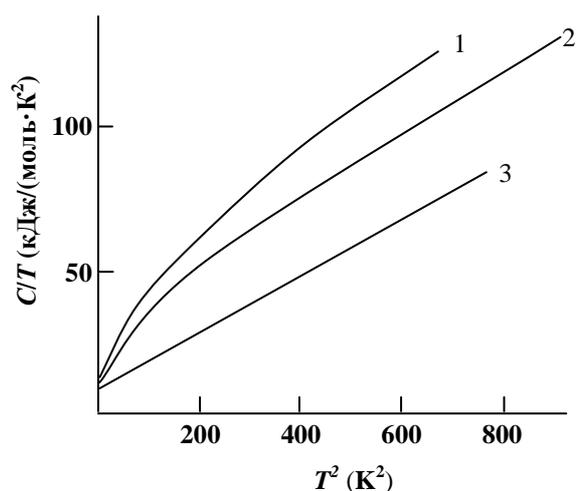
отличаются. Обусловленное размерным эффектом заметное понижение температуры плавления наблюдается при размерах наночастиц менее 10 нм.

Теплоемкость – одно из наиболее изученных свойств наночастиц. Проведенные исследования теплоемкости выявили ее отклонение от массивного тела при низких температурах [78]. Для частиц серебра и золота были проведены исследования в интервале температур 0,05 – 10,0 К. Выше 1 К теплоемкость наночастиц Ag размером 10 нм и наночастиц Au размером 4,6 и 18 нм имела значения в 3 – 10 раз больше, чем для массивных образцов. Напротив, ниже 1 К теплоемкость массивных образцов была несколько больше. На рис. 4.2.2 показана зависимость теплоемкости наночастиц серебра размером 10 нм в сравнении с объемным образцом.

Для палладия проведенные измерения при температурах ниже 30 К показали увеличение теплоемкости при уменьшении размера частиц (рис. 4.2.3) [78]. Для наночастиц свинца диаметром 2,2, 3,7 и 6,6 нм и индия диаметром 2,2 нм при температурах ниже 10 К теплоемкость на 25 – 75 % больше теплоемкости массивных металлов. Теплоемкость частиц ванадия при  $T < 10$  К имеет слабый размерный эффект.



**Рис. 4.2.2.** Удельная теплоемкость наночастиц серебра размером 10 нм. Сплошная кривая соответствует теплоемкости массивного серебра [78].



**Рис. 4.2.3.** Температурная зависимость теплоемкости наночастиц Pd диаметром 3 нм (1), 6,6 нм (2) и массивного палладия (3) [78].

Предсказываемое выражением (1.2.3) понижение температуры Дебая было обнаружено многими авторами (табл. 4.2.1) [79,80]. Относительную величину изменения температуры Дебая обычно обозначают как  $\theta_D(r)/\theta_D$ , где  $\theta_D$  – температура Дебая в массивных образцах, а  $\theta_D(r)$  – в наночастицах.

Таблица 4.2.1

Металл	Диаметр частицы, нм	$\theta_D(r)/\theta_D$
Ag	~ 20	0,75
	10 – 20	0,75 – 0,83
	15	0,735
Al	15 – 20	0,50 – 0,67
Au	2,0	0,69
	1,0	0,92
	10,0	0,995
In	2,2	0,80
Pb	2,2	0,87
	3,7	0,90
	6,0	0,92
	20,0	0,84
V	3,8	0,83
	6,5	0,86

### 4.3. Проводимость и сверхпроводимость в наноструктурах

**Проводимость тонких проволок.** Исследования проводящих свойств тонких проволок является особенно актуальными в связи с их широким применением в микро- и наноэлектронике. Наблюдается существенное различие электрических свойств объемных проводников от свойств образцов, у которых линейный размер сравним с длиной свободного пробега носителей заряда. Было экспериментально установлено [81], что при заданной температуре удельное электрическое сопротивление тонких металлических проволок прямоугольного сечения зависит от геометрии проволок.

В работе [82] исследовалось влияние механизма поверхностного отражения электронов (дырок) на электрическую проводимость тонкой цилиндрической полупроводниковой проволоки  $n$ -типа ( $p$ -типа) радиуса  $R$  и длины  $L$  ( $L \gg R$ ). К концам проволоки было приложено переменное электрическое на-

пряжение с частотой  $\omega$ . Направление электрического поля совпадало с осью цилиндра. В результате было показано, что значительное влияние на интегральную проводимость тонкой полупроводниковой проволоки оказывают классические размерные эффекты, которые обусловлены поверхностным рассеянием носителей заряда. На проводимость существенно влияет механизм отражения электронов (дырок) от границ проволоки. Вместе с тем существенно ограничивает рост проводимости тонкой проволоки по сравнению с объемной проводимостью относительное увеличение доли диффузно отраженных носителей заряда.

**Проводимость фуллереноподобных материалов.** В зависимости от тонких особенностей молекулярной симметрии фуллерены и нанотрубки могут быть диэлектриками, полупроводниками, обладать металлической проводимостью и высокотемпературной сверхпроводимостью. Эти свойства в сочетании с наномасштабной геометрией делают их почти идеальными материалами для изготовления электрических проводов, сверхпроводящих соединений или целых устройств, которые с полным основанием можно назвать изделиями молекулярной электроники. Химической сборке элементов различных схем благоприятствуют свойства фуллерена, который может образовывать ионы от  $+6$  до  $-6$  и в различных матрицах – связи с донорами, акцепторами, свободными радикалами и ионами.

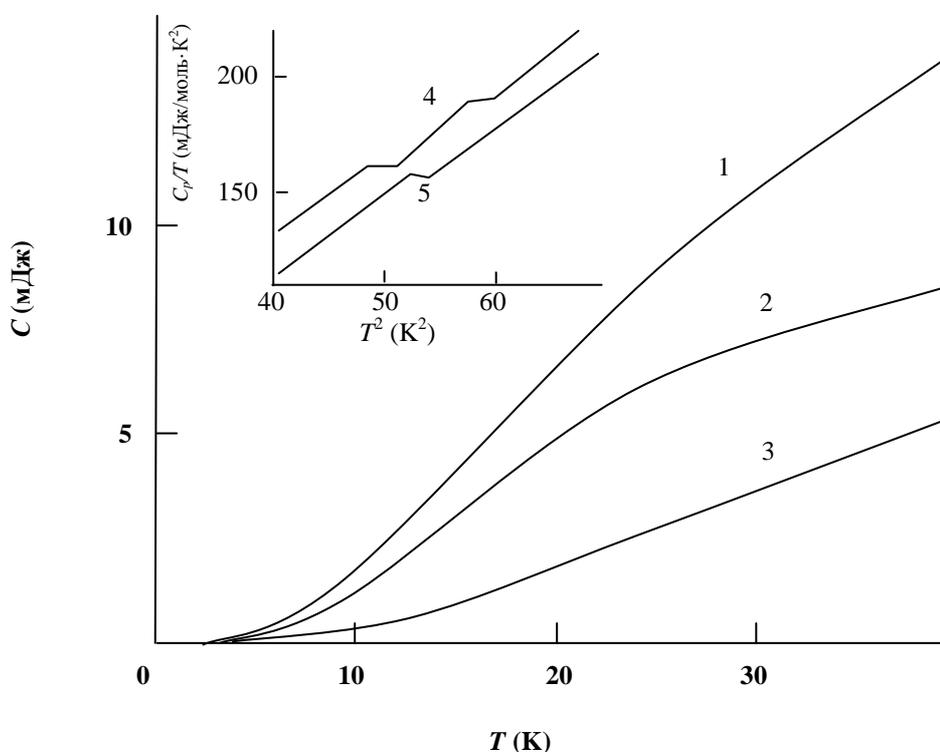
Углеродные нанотрубки используются в качестве игольчатых щупов сканирующих зондовых микроскопов и в дисплеях с полевой эмиссией, в электронных устройствах со схемами из коротких нанотрубок, подвергнутых манипулированию и сборке. Молекулярный характер фуллереновых материалов позволяет разработать химическую стратегию сборки этих элементов в пригодные для использования структуры, материалы и возможно даже молекулярные электронные устройства

Второй класс перспективных материалов для наномерных проводников – молекулярные ансамбли. К ним относятся, например, агрегаты на основе порфиринов (в том числе хлорофилла) и других амфифильных молекул, по-

лучаемых из растворов. Обнаружена чувствительность, а главное – уникальная избирательность таких систем к внешним воздействиям (свет, атмосфера, вибрация), что позволяет использовать их в различных сенсорах, в том числе со смешанной электронно-ионной проводимостью. Исследуются наноразмерные молекулярные стержни и проволоки (molecular rods and wires), в том числе в качестве интерфейса между неорганическими материалами (например, двумя металлическими электродами). Предполагается, что со временем будет происходить интегрирование с классической приборной базой.

**Поверхностная и объемная сверхпроводимости.** Результаты экспериментальных исследований по изучению критических температур  $T_c$  тонких сверхпроводящих пленок и зависимость  $T_c$  от толщины пленки, оксидирования поверхности и т.д. весьма противоречивы. Во многих из этих экспериментов были получены более высокие  $T_c$  по сравнению с массивными металлами. Авторы объясняют этот факт вероятным появлением поверхностной сверхпроводимости. В тоже время для ряда тонких сверхпроводящих пленок из Pb, Mo, Ta и Hg критическая температура по сравнению с массивными образцами понижалась [83]. В работах Гинзбурга [84] было выявлено, что наблюдение поверхностной проводимости происходит в том случае, когда щель, а значит и критическая температура объемной сверхпроводимости, меньше, чем для поверхностной. Роль поверхностной проводимости могла бы существенно увеличиться при условии перехода поверхностных электронов в сверхпроводящее состояние. Для проверки предположений о возможном разделении объемной и поверхностной проводимостей, выдвинутых Гинзбургом, авторами [85] был выбран наноструктурированный свинец. Этот выбор был обусловлен следующими причинами: свинец является классическим материалом для изучения сверхпроводящих свойств, имеет простую структуру, низкую температуру плавления, его физические свойства достаточно хорошо изучены. В работе исследовались термодинамические свойства наночастиц свинца, полученных в пористом стекле со средним диаметром пор 7 нм. Расплав свинца внедрялся в пористое стекло под давлением с по-

следующей кристаллизацией наночастиц при понижении температуры. Для определения теплоемкости наночастиц свинца изучались температурные зависимости свинца в порах, пористого стекла и массивного свинца. Из рис. 4.3.2 следует, что для наночастиц свинца наблюдается два сверхпроводящих перехода выше и ниже температуры перехода объемного образца ( $T_c = 7,2$  К). Наличие двух переходов объясняется наличием объемной (нижний переход при  $T_c = 6,9$  К) и поверхностной (верхний переход при  $T_c = 7,9$  К) сверхпроводимостей.



**Рис. 4.3.2.** Температурные зависимости теплоемкости Pb, внедренного в нанометровые поры стекла (1), наночастиц Pb (2) и пористого стекла (3). На вставке – теплоемкость наночастиц Pb (4) и массивного Pb (5) в области сверхпроводящего перехода [85].

**Квантовые проволоки.** Квантовыми проволоками называют структуры толщиной всего в один атом. Исследование свойств квантовых проволок актуально в связи с необходимостью миниатюризации электронных приборов. Специалисты из исследовательского центра ИВМ выполнили теоретиче-

ский расчет проводимости квантовой проволоки, состоящей из атомов углерода. Согласно их вычислениям, проводимость квантовой проволоки при увеличении ее длины изменяется не монотонно, а колеблется. Она достигает максимумов для проволоки, состоящей из четного числа атомов, поскольку в этом случае больше число допустимых электронных состояний. Осцилляции, подобные предсказанным, наблюдались в экспериментах, выполненных в Японии. Ониши Х. и его коллеги из Токио создали квантовую проволоку из атомов золота между иглой сканирующего туннельного микроскопа и поверхностью золотого образца. При увеличении расстояния между иглой и поверхностью проволока становится длиннее и тоньше. Проводимость проволоки при ее растяжении изменялась скачками на квантовую единицу проводимости  $2e^2/h$ . Такое же скачкообразное изменение проводимости наблюдалось и в университете Лейдена (Нидерланды). Созданная там квантовая проволока представляла собой микроскопический мост между двумя концами надломленной золотой проволоки.

#### ***4.4. Особенности размерных эффектов в сегнетоэлектриках***

В настоящее время сегнетоэлектрики активно занимают ведущие позиции в твердотельном приборостроении. Благодаря своим физическим свойствам: большая диэлектрическая проницаемость, ее зависимость от электрического поля, огромный пиро- и пьезоэлектрический эффекты, нелинейность в оптической области, переключаемость спонтанной поляризации делают сегнетоэлектрики привлекательными материалами для разнообразных применений.

Размерные эффекты приводят к существенному изменению всего комплекса сегнетоэлектрических свойств при уменьшении толщины пленок и размера зерен. Последнее является существенным фактором, определяющим возможности применений сегнетоэлектриков в качестве элементов нанoeлектроники. Причиной изменения свойств сегнетоэлектриков являются те же

эффекты, которые мы рассмотрели в первой главе. Остановимся на этих причинах немного подробнее в рамках существующих теорий.

**Теория Ландау-Гинзбурга.** Феноменологическая теория сегнетоэлектричества, основанная на теории фазовых переходов второго рода Ландау была развита в работах Гинзбурга. Благодаря одинаковым трансформационным свойствам параметра порядка в теории Ландау и вектора поляризации, плотность термодинамического потенциала  $\Phi$  вблизи перехода для одноосного сегнетоэлектрика, помещенного в электрическое поле  $E$  может быть представлена в виде полинома Ландау-Гинзбурга

$$\Phi = F - EP = F_0 + \frac{1}{2}\alpha P^2 + \frac{1}{4}\beta P^4 + \frac{1}{6}\gamma P^6 - EP, \quad (4.4.1)$$

где  $\alpha = \alpha_0(T-T_0)$ ,  $\alpha_0$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – температурно-независимые коэффициенты Ландау. Существенно, что при  $\beta > 0$  и  $\gamma \geq 0$  (4.4.1) описывает фазовый переход второго рода, а при  $\beta < 0$  и  $\gamma > 0$  – переход первого рода. Равновесные условия соответствуют минимуму термодинамического потенциала:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P} = 0, \quad \frac{\partial^2 \Phi}{\partial P^2} > 0. \quad (4.4.2)$$

Разложение (4.4.1) справедливо для объемного кристалла, для которого выполняются условия Борна-Кармана. Для сегнетоэлектрических кристаллов конечных размеров весьма существенными становятся поверхностная энергия и поле деполяризации, что должно быть учтено в разложении (4.4.1). Впервые это было сделано для тонких пленок в работе [86].

Рассмотрим сегнетоэлектрическую пленку, спонтанная поляризация  $P$  в которой направлена перпендикулярно поверхности, с координатами  $z = \pm L/2$ . Для пленки параметр порядка  $P$  является функцией расстояния от поверхности, поэтому свободная энергия ( $E = 0$ ) должна содержать члены, зависящие от градиента поляризации нормально к поверхности  $(\nabla P)^2$  и скачок поляризации на поверхности  $(\Delta P)^2$  [86]

$$F = F_0 + \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{+L/2} \left[ \frac{\alpha}{2} P^2 + \frac{\beta}{4} P^4 + \frac{\gamma}{6} P^6 + \frac{D}{2} \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \right] dz + \frac{D}{2\delta} [(\Delta P_+)^2 + (\Delta P_-)^2], \quad (4.4.3)$$

где  $D$  – корреляционный фактор,  $\delta$  – коэффициент, определяющий поверхностную энергию (коэффициент связи),  $\Delta P_{\pm}$  – значения спонтанной поляризации на границах пленки  $z = \pm L/2$  (при нахождении пленки в неполярной среде необходимо положить  $\Delta P_{\pm} = P_{\pm}$ ). Решение (4.4.3) записывается в виде дифференциального уравнения Эйлера-Лагранжа

$$D \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \alpha P(z) + \beta P^3 - \gamma P^5(z) - \frac{4\pi}{L} \int_{-L/2}^{+L/2} P(z) dz \quad (4.4.4)$$

с граничными условиями в виде:

$$\frac{\partial P}{\partial z} \pm \frac{1}{\delta} P(z) = 0, \quad z = \pm \frac{L}{2}. \quad (4.4.5)$$

Численное решение (1.5.4) с учетом граничных условий (4.4.5) позволяет получить размерный эффект в виде  $P = P(L)$ . Характер зависимости спонтанной поляризации  $P$  и температуры фазового перехода  $T_c$  от толщины пленки определяется знаком коэффициента связи  $\delta$ . Уменьшению  $P$  и  $T_c$  с утоньшением пленки отвечает  $\delta > 0$ . Напротив, при  $\delta < 0$  наблюдается увеличение  $P$  и  $T_c$  с утоньшением пленки.

Для получения члена свободной энергии, определяющего поле деполяризации, следуя [87], рассмотрим сегнетоэлектрическую пленку с металлическими электродами толщиной  $L$  и  $L_e/2$  соответственно (рис. 4.4.1). При замкнутых электродах спонтанная поляризация экранируется в металле на длине экранирования Томаса-Ферми  $l_s$ , что приводит к дополнительному вкладу в свободную энергию

$$\Delta F_s = - \int_{-L/2}^{+L/2} \left[ \frac{V}{L + L_e} P(z) + \frac{1}{2} E_d(z) P(z) \right] dz, \quad (4.4.6)$$

где  $V$  – приложенное к электродам напряжение,  $E_d$  – удовлетворяющее уравнению Пуассона поле деполяризации

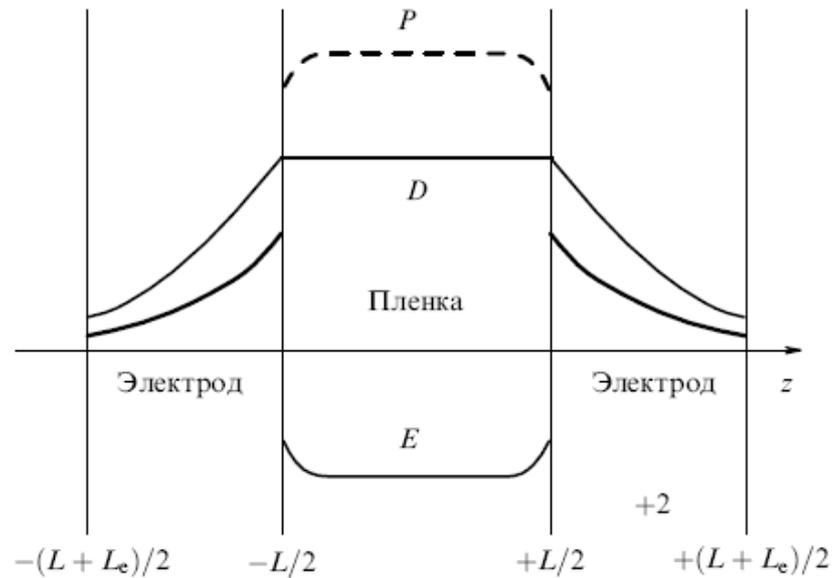
$$\frac{dE_d}{dz} = -\frac{1}{\chi} \frac{dP}{dz}, \quad |z| \leq \frac{L}{2}, \quad (4.4.7)$$

$\chi$  – поляризуемость. К (1.5.6) и (1.5.7) необходимо добавить граничное условие

$$\int_{-(L+L_e)/2}^{(L+L_e)/2} E(z) dz = V, \quad (4.4.8)$$

и уравнение Томаса-Ферми:

$$\frac{d^2 E}{dz^2} = \frac{E}{l_s^2}, \quad \frac{L}{2} < |z| < \frac{L+L_e}{2}. \quad (4.4.9)$$



**Рис. 4.4.1.** Поле деполяризации в сегнетоэлектрической пленке с металлическими электродами [87].

Численный анализ решения выражения (4.4.6), проведенный в [87], показывает, что учет поля деполяризации приводит к дополнительному размерному эффекту в тонкой сегнетоэлектрической пленке. Таким образом, свободная энергия сегнетоэлектрической пленки с учетом поверхностной энергии и поля деполяризации будет иметь вид:

$$F = F_0 + \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{+L/2} \left[ \frac{\alpha}{2} P^2 + \frac{\beta}{4} P^4 + \frac{\gamma}{6} P^6 + \frac{D}{2} \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \right] dz + \frac{D}{2\delta} [P_+^2 + \Delta P_-^2] - \int_{-L/2}^{+L/2} \left[ \frac{V}{L+L_e} P(z) + \frac{1}{2} E_d(z) P(z) \right] dz. \quad (4.4.10)$$

**Теория Гинзбурга-Андерсена-Кокрена (ГАК).** Теория ГАК, базируемая на разложении термодинамического потенциала (4.4.1), приводит к концепции «мягкой моды» – температурнозависящего, низкочастотного поперечного оптического колебания:

$$\omega_{TO}^2 \sim (T - T_0). \quad (4.4.11)$$

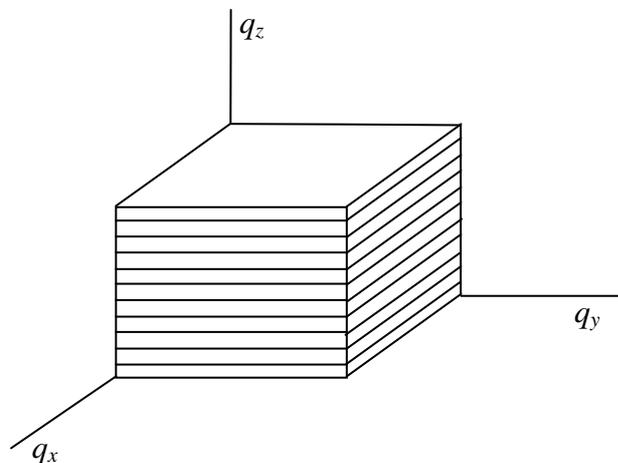
Например, при ограничении кристалла вдоль оси  $z$  следует расслоение зоны Бриллюэна (рис. 4.4.2) с минимальным значением  $q_z$  равным  $\pi/d$  [88]. Для нити и сферы ограничиваются и остальные  $q_i$ , так что зона Бриллюэна будет полой в центре [88]. Эта область очень мала и результат ее удаления будет зависеть от того, насколько круто расположена кривая  $\omega_{TO}(q)$  около  $q = 0$ . Для одномерной цепочки атомов было получено

$$\omega_{TO}^2 = A(T - T_0) + Bq^2, \quad (4.4.12)$$

где  $B$  – постоянная величина. Согласно (4.4.12) изменение  $\omega_{TO}$  при ограничении кристалла определяется величиной  $B$  и будет заметно при выполнении условия:

$$Bq^2 = B\pi^2/d^2 \geq A(T - T_0). \quad (1.5.13)$$

Исследования, выполненные для  $\text{BaTiO}_3$ , частично указывают на то, что  $B$  имеет большие значения, достигая  $10^{12} (\text{см/сек})^2$  для некоторых направлений в кубической фазе [89].



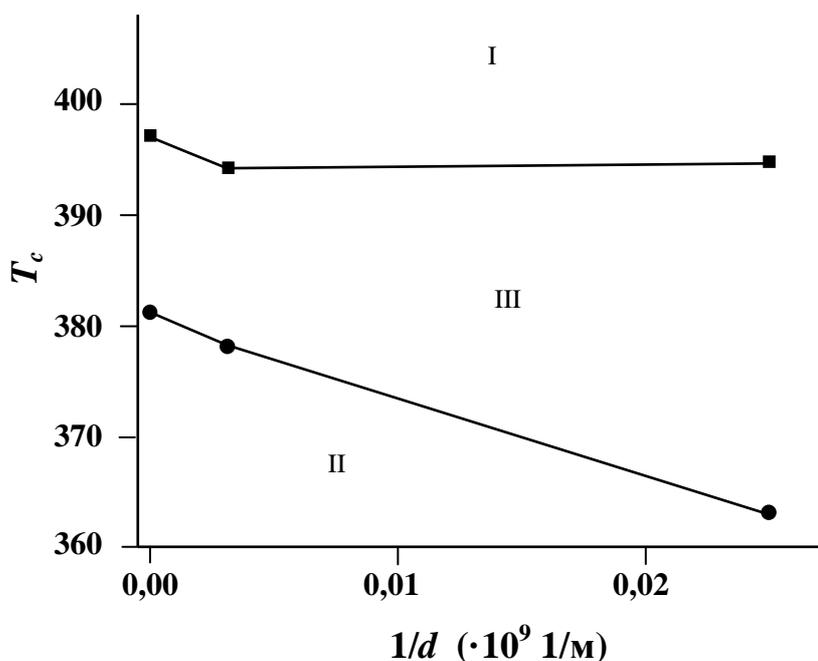
**Рис. 4.4.2.** Расслоение зоны Бриллюэна для кристалла, ограниченного по оси  $z$  [88].

**Экспериментальные результаты.** Сегнетоэлектрические свойства малых частиц изучены сравнительно мало. Наиболее хорошо изучены и широко применяются сегнетоэлектрические тонкие пленки  $\text{PbTiO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3\text{-SrTiO}_3$  (БСТ),  $\text{PbTiO}_3\text{-ZrTiO}_3$  (ЦТС) в связи с большими значениями спонтанной поляризации и диэлектрической проницаемости. Исследования диэлектрических свойств синтезированных пленок показали наличие значительного диэлектрического гистерезиса, высоких значений спонтанной поляризации и диэлектрической проницаемости.

Существуют работы, в которых изучались сегнетоэлектрические наноструктуры на основе водорастворимых сегнетоэлектриков. Ряд работ был посвящен исследованию свойств нитрита натрия, внедренного в силикатные нанопористые матрицы, фотонные кристаллы, пористые стекла, и исследованию сегнетовой соли в молекулярных решетках и в пористой окиси алюминия (см. [91,92] и ссылки в этих работах). В частности, было показано, что при внедрении  $\text{NaNO}_2$  в поры малых размеров наблюдается сосуществование в широком температурном диапазоне кристаллической и расплавленной фаз нитрита натрия, незначительные сдвиги сегнетоэлектрического фазового перехода, рост диэлектрической проницаемости и проводимости, при этом возрастание диэлектрической проницаемости композита обусловлено процессами типа релаксации Максвелла-Вагнера. Обнаружено, что в нанопористых силикатных матрицах наблюдается временная эволюция нитрита натрия, проявляющаяся в уменьшении диэлектрической проницаемости и проводимости при последующих циклах нагрева-охлаждения. Исследования твердых растворов  $\text{Na}_{1-x}\text{K}_x\text{NO}_2$  ( $x = 0, 0,05$  и  $0,10$ ), внедренных в пористые стекла со средним диаметром пор  $70 \text{ \AA}$ , показали [93], что существенного понижения температуры фазового перехода при увеличении доли калия не наблюдается. С ростом содержания калия в области состояния предплавления происходит заметное «ужесточение» решетки, приводящее к уменьшению диэлектрических потерь.

Проведенные диэлектрические и дилатометрические исследования нитрата калия, внедренного в пористые стекла со средним размером пор 23 и 160 нм из расплава и из раствора, обнаружили влияние размерных эффектов на температурный интервал стабильности сегнетоэлектрической структуры [94]. Результаты исследований указывают на то, что последовательность фазовых переходов такая же, как и в объемном  $\text{KNO}_3$ . Скачки деформации при фазовых переходах для нанокомпозитов, полученных из водных растворов, менее резки по сравнению с образцами, полученными внедрением из расплава, в которых наблюдались резкие скачки деформации. Подобное поведение объяснялось авторами различным коэффициентом заполнения полостей стекол при различных методах внедрения. Аналогичное поведение наблюдалось и для температурной зависимости диэлектрической проницаемости.

По результатам измерений авторами [94] была построена фазовая диаграмма (рис. 4.4.3). Согласно фазовой диаграмме при уменьшении размера пор происходит расширение области существования сегнетофазы от 14 К для объемного  $\text{KNO}_3$  до, примерно, 30 – 32 К для нанокомпозитов со средним размером пор 23 нм.



**Рис. 4.4.3.** Зависимость  $T_c$  для  $\text{KNO}_3$  в пористом стекле от размера пор [94].

Внедрение неводорастворимых сегнетоэлектриков в нанопоры весьма затруднительно. Однако имеется несколько работ, в которых были получены наноконпозиты  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{БСТ}$ , ЦТС с использованием золь-гель технологии. В работе [95] результаты АСМ микроскопии указывают на неоднородность полученных сегнетоэлектриков БСТ и ЦТС в порах  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Таким образом, золь-гель технология не позволяет создавать однородные образования сегнетоэлектрических твердых растворов типа перовскита в матрицах  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Наноструктуры ТБС [96] имели вид наностолбиков диаметром 100 – 200 нм и длиной до нескольких микрометров, состоящих из отдельных кристаллов размерами 3 – 100 нм.

Имеются несколько работ [97,98], посвященных исследованию сегнетовой соли и триглицинсульфата в пористых матрицах  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Для сегнетовой соли в условиях ограниченной геометрии не наблюдается верхней точки Кюри (297 К) вплоть до температуры плавления (343 – 353 К), а нижняя точка Кюри понижается на 10 К [99]. Для триглицинсульфата в силикатных матрицах SBA-15 (53 Å) наблюдается повышение температуры Кюри на 3 – 4 К и значительное размытие фазового перехода. Исследования, проведенные методом нелинейной диэлектрической спектроскопии, указывают на то, что спонтанно поляризованные области в такой матрице сохраняются в температурном интервале, на 10 К превышающем температуру Кюри.

Согласно известным к настоящему времени данным по исследованию размерных эффектов в сегнетоэлектриках, можно заключить, что как Феноменологическая теория Ландау-Гинзбурга, так и динамическая теория (ГАК) указывают на возможность существования критического размера  $L_{cr}$ , меньше которого сегнетоэлектрическое состояние не реализуется. Эксперименты показали, что для перовскитовых сегнетоэлектриков разброс  $L_{cr}$  лежит в пределах 1,2 – 5 нм, но здесь не до конца определена роль электродов, а также дефектность структуры. В полимерных сегнетоэлектрических пленках, выращенных методом Ленгмюра-Блоджетт, критический размер вообще отсутствует. Экспериментальные данные, полученные разными авторами, указывают

на то, что физические свойства малых частиц сегнетоэлектриков в пористых матрицах зависят от формы и размера пор, взаимодействия частиц со стенками матрицы и между собой. Свойства частиц в ограниченной геометрии могут значительно отличаться от характеристик, как соответствующих объемных материалов, так и изолированных малых частиц.

#### **4.5. Магнитные свойства наночастиц**

Магнитные наноматериалы используются в системах записи и хранения информации, в новых постоянных магнитах, в системах магнитного охлаждения и в качестве магнитных сенсоров. Магнитные наночастицы широко распространены в природе и встречаются во многих биологических объектах. Все это объясняет большой интерес специалистов различного профиля к таким системам.

Свойства магнитных наночастиц определяются многими факторами, среди которых следует выделить химический состав, тип кристаллической решетки и степень ее дефектности, размер и форму частиц, взаимодействие частиц с окружающей их матрицей и соседними частицами. Изменяя размеры, форму, состав и строение наночастиц, можно в определенных пределах управлять магнитными характеристиками материалов на их основе.

Среди магнитных материалов, нашедших широкое технологическое применение, следует отметить ферромагнетики. Одной из наиболее важных характеристик ферромагнетика является коэрцитивная сила ( $H_c$ ). При разработке новых магнитных материалов часто стремятся достичь максимальных значений  $H_c$ , что особенно актуально для магнитных наночастиц, поскольку в таком случае изменение направления вектора намагниченности за счет тепловых флуктуаций будет затруднено. Помимо ферромагнетиков, в которых магнитные моменты атомов упорядочены, технологическое применение находят также магнитные спиновые стекла – системы, в которых конкуренция случайных магнитных взаимодействий между магнитными моментами приводит к магнитному неупорядоченному состоянию.

Для получения наномагнитов обычно используются те же методы, что для получения наночастиц других веществ. Обычно считается, что методы вакуумного напыления, вслед за литографией с постоянно увеличивающимся разрешением, представляют наиболее совершенную технику для создания наноразмерных магнитов. Однако, хорошо кристаллизованные наномагниты также могут быть изготовлены другим методом. В этом методе тонкие проволоки магнитных металлов с большим аспектным отношением электрохимически синтезируются внутри пор пленок оксида алюминия, полученного анодированием [100]. Массивы никелевых нанопроволок были изготовлены методом электроосаждения в нанопорах с поперечными размерами порядка 30 нм [101]. Пористые темплаты были изготовлены травлением ядерных треков. Треки были сформированы на слюдяных подложках (5 мкм толщины) облучением  $\sim 6$  мэВ  $\alpha$ -частицами из источника  $100 \mu\text{Ci } ^{252}\text{Cf}$  в камере при давлении около  $10^{-3}$  торр. Ожидается, что интересные свойства проявятся, когда геометрические размеры проволок станут сравнимыми с характерными длинами, такими как ширина доменной стенки или ширина домена. В массивных магнитных системах длина корреляции  $\xi$  возрастает с температурой и отклоняется при температуре перехода массива  $T_c(\infty)$ . Когда один или несколько размеров в системе малы, рост  $\xi$  в конечном счете ограничивается наименьшим размером  $d$  и температура перехода  $T_c(d)$  понижается. Для никелевых нанопроволок с диаметрами от 500 до 30 нм [101] измеренные значения  $T_c(d)$  подчиняются размерному соотношению

$$\frac{[T_c(\infty) - T_c(d)]}{T_c(\infty)} = \left(\frac{\xi_0}{d}\right)^\lambda, \quad (4.5.1)$$

где  $\lambda = 0,94$  и  $\xi_0 = 22 \text{ \AA}$ . Измеренная длина корреляции  $\xi_0 = 22 \text{ \AA}$  близка к значению  $20 \text{ \AA}$ , характерному для тонких поликристаллических никелевых пленок. Большие коэрцитивные поля наблюдались для массива цилиндров ферромагнитного никеля с диаметрами от 35 до 250 нм, созданными электроосаждением в нанопористых мембранах. Коэрцитивные поля нанопроволок малого диаметра уменьшаются почти линейно от 1500 Э до 200 Э при 300 К.

Классический антиферромагнетик MnO был внедрен в пористое стекло со средним диаметром пор около 7 нм [102]. Температурная эволюция кристалла и магнитная структура MnO в пористом стекле изучалась посредством нейтронной дифракции. Было продемонстрировано, что магнитный порядок, подобный тому, что наблюдался в массивном материале, появляется в областях меньших, чем средний размер наночастиц. Однако упорядоченный магнитный момент  $3,84 \mu_B/\text{ион}$  был значительно меньше, чем для массивного материала. Было обнаружено, что магнитный фазовый переход является переходом второго рода, в отличие от перехода первого рода в массивном образце, и наблюдается повышение температуры Нееля. Экспериментально наблюдаемая температурная зависимость магнитного момента была  $m(T) \sim (1 - T/T_N)^\beta$  с  $T_N = 122 \text{ К}$  и  $\beta = 0,34$ . Критический индекс  $\beta$  близок к ожидаемому для фазового перехода в классической 3D модели Гейзенберга.

**Суперпарамагнетизм.** Наиболее ярким отличием в магнитных свойствах однодоменной наночастицы от свойств объемного ферромагнетика является эффект суперпарамагнетизма. В однодоменной частице температура вызывает флуктуации направления магнитного момента относительно его энергетически выгодной ориентации. Если частица изотропна, то характер ее намагничивания будет подобен намагничиванию парамагнитного иона с необычайно большим значением спина и будет описываться функцией Ланжевена. Ансамбли таких изотропных частиц называют ансамблями ланжевенских частиц. Если же частицы анизотропны, то магнитные свойства их ансамбля будут в значительной мере отличаться от свойств ансамбля ланжевенских частиц.

Первые работы по интерпретации магнитных свойств ансамбля анизотропных однодоменных частиц были выполнены английскими физиками Стонером и Вольфартом. Исследование некоторых твердых растворов магнитного и немагнитного металлов в определенном интервале их соотношений демонстрировало экстремально высокие значения коэрцитивности, нехарактерные для чистого ферромагнетика. Стонер и Вольфарт предложили

простую и в то же время удачную интерпретацию этих результатов. Они предположили, что в таком твердом растворе происходит распад на магнитную и немагнитную фракции, в результате чего образуются ферромагнитные частички нанометрового масштаба, равномерно, но не упорядоченно расположенные в немагнитной среде. Исходя из соображений, что таким малым частицам энергетически выгодно быть однодоменными, было сделано предположение о перемагничивании в каждой частице путем когерентного вращения всех магнитных моментов ионов в частице. Последнее предполагает, что в процессе перемагничивания абсолютное значение намагниченности частиц не изменяется. Полученные результаты хорошо согласовывались с экспериментальными данными и поэтому однодоменную анизотропную частицу, перемагничивание в которой осуществляется без изменения абсолютного значения ее намагниченности, принято называть Стонер-Вольфартовской частицей.

**Состояния Стонер-Вольфартовских частиц.** В отличие от магнитных свойств ансамбля ланжевенских частиц, где определяющим внутренним параметром является магнитный момент частицы (в реальных системах – дисперсия по этому параметру), а внешним параметром – температура, магнитные свойства ансамблей СВ-частиц зависят от многих дополнительных параметров. Наиболее важными среди них являются тип анизотропии частиц и их взаимное расположение в ансамбле. Среди внешних параметров дополнительно к температуре добавляются начальное состояние ансамбля (которое может быть неравновесным) и время наблюдения за ансамблем – время измерения.

В определенном интервале значений магнитных полей наличие у каждой частицы, например, одноосной анизотропии, приводит к возникновению барьера, разделяющего два энергетических минимума в фазовом пространстве ориентаций магнитного момента. Время жизни в каждом из минимумов будет определяться высотой барьера и температурой. Установление термодинамического равновесия в таком ансамбле будет происходить путем тер-

моактивационных переориентаций магнитного момента через барьер с характерным для данной температуры временем релаксации.

Дальнейшее продвижение в область малых размеров привело к открытию нового явления – туннелирования магнитного момента в сверхмалых ферромагнитных частицах. К этой группе наноматериалов относятся искусственные кристаллы, содержащие магнитные кластеры  $Mn_{12}$  и  $Fe_3$ . Магнитный момент таких кластеров равен 10 магнетонам Бора, т.е. занимает промежуточное положение между магнитным моментом атомов и макроскопических частиц. Обменное взаимодействие между кластерами в кристалле отсутствует, а магнитная анизотропия весьма высока. Таким образом, появляется возможность квантовых переходов между магнитными равновесными состояниями в кластерах. Изучение этих процессов представляется интересным и важным с точки зрения разработки элементной базы квантовых компьютеров.

**Эффект гигантского магнитосопротивления.** Достижением в исследовании магнетизма наноматериалов следует признать открытие эффекта гигантского магнитосопротивления [103]. Суть эффекта заключается в изменении сопротивления (порядка нескольких десятков процентов) многослойной структуры из сверхтонких ферромагнитных и диамагнитных слоев (например,  $Co/Cu$ ) при смене ферромагнитного упорядочения в структуре на антиферромагнитное. Можно сказать, что такие многослойные структуры представляют собой новый тип доменной структуры ферромагнетика, в котором роль доменов играют ферромагнитные пленки, а доменными стенками являются пленки диамагнетика. Этот эффект находит свое применение при создании новых датчиков магнитного поля.

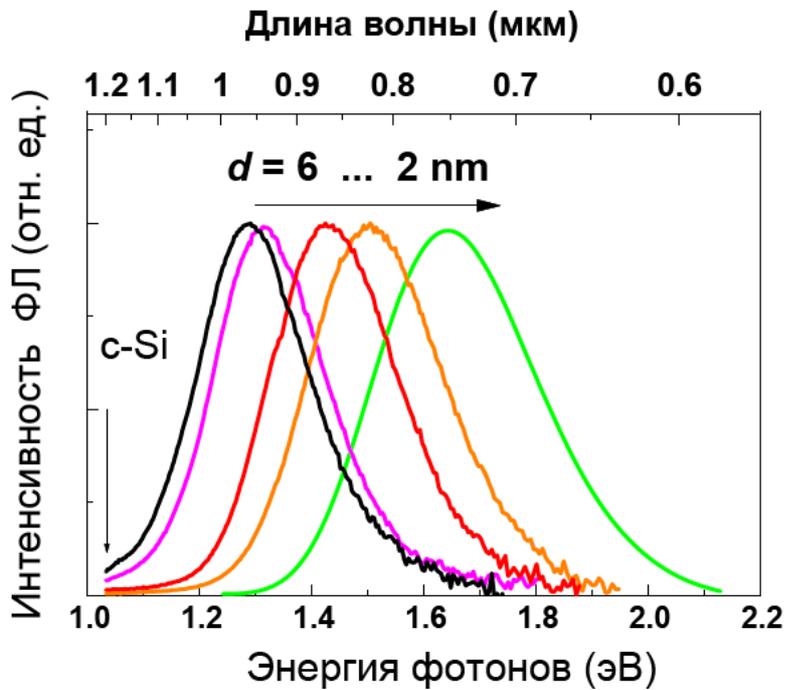
**Хранение информации.** Развитие методов напыления сверхтонких пленок и нанолитографии привело в последнее десятилетие к активному изучению магнитных наноструктур. Стимулом этой активности является идея о создании новых магнитных наноматериалов для сверхплотной записи и хранения информации. При этом предполагается, что каждая частица несет один

бит информации. Если расстояние между частицами составляет 100 нм, то ожидаемая плотность записи – 10 Гбит/см<sup>2</sup> [104]. Принципиальными ограничениями плотности записи при таком подходе являются магнитостатическое взаимодействие частиц и значительные термические флуктуации. Последние имеют существенную специфику для малых ферромагнитных частиц, которая проявляется в экспоненциальном росте вероятности распада намагниченного состояния с уменьшением размера частицы.

#### **4.6. Оптические свойства наноструктур**

Как уже отмечалось в первом параграфе, при уменьшении частиц до наноразмеров меняется электронный спектр исследуемого вещества. Следовательно, от размера частиц будут зависеть и оптические свойства, такие как поглощение и отражение света, люминесценция и т.д.

**Люминесценция в малых частицах.** Достаточно маленький кусочек полупроводника можно рассматривать, как квантовую точку. Исторически первыми квантовыми точками, вероятно, были микрокристаллы селенида кадмия CdSe. Электрон в таком микрокристалле чувствует себя как электрон в трёхмерной потенциальной яме, он имеет много стационарных уровней энергии с характерным расстоянием между ними. Точное выражение для уровней энергии зависит от формы точки. Аналогично переходу между уровнями энергии атома, при переходе между энергетическими уровнями квантовой точки может излучаться фотон. Возможно также забросить электрон на высокий энергетический уровень, а излучение получить от перехода между более низколежащими уровнями. Это и есть люминесценция квантовых точек. При этом, в отличие от атомов, частотами переходов можно управлять, меняя размеры кристалла. Собственно, наблюдение люминесценции кристаллов селенида кадмия с частотой, определяемой размером кристалла, и послужило первым наблюдением квантовых точек. На рис. 4.6.1 показано изменение частоты излучения квантовых точек при люминесценции, для нанокристаллов кремния.



**Рис. 4.6.1.** Спектр фотолюминесценции нанокристаллов Si в матрице окиси кремния.

**Край оптического поглощения.** Смещение края поглощения вследствие квантового ограничения может наблюдаться в наноструктурах с нанопорами, составляющими несколько нанометров в диаметре. Как показано в п. 1.3, спектр поглощения для таких частиц будет определяться соотношением

$$\hbar\omega_{l,n} = E_g + \frac{(\hbar\phi_{l,n})^2}{2m_r a^2}, \quad m_r = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h},$$

где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны для объемных материалов. Край поглощения, который может быть определен запрещенной зоной для наночастицы, соответствует низшему переходу и смещен по сравнению с объемом. Вследствие квантового ограничения ширина запрещенной зоны увеличивается как  $a^{-2}$  с уменьшением размера наночастицы. В полупроводниках это смещение будет также зависеть от эффективной массы носителей. В связи с тем, что эффективная масса дырки в полупроводниках обычно больше, чем эффективная масса электрона, расстояния между энергетическими уровнями электронов больше, чем между уровнями дырок. Расчет смещения края поглощения для

частицы размером  $a = 5$  нм и  $m_e = m_h = m_o$  ( $m_o$  – масса свободного электрона) дает значение примерно 25 мэВ.

Hendershot и др [105], исследуя фосфид индия (InP), внедренный в пористое стекло с каналами 4 нм и 15 нм, показали, что поглощение в стекле с порами 4 нм начинается примерно с 750 нм и имеет максимум при 500 нм, в то время как для образца с порами 15 нм наблюдался более широкий пик, начинающийся около 1000 нм с максимумом при 700 нм. Для сравнения, объемный InP имеет узкий переход вблизи 918 нм. Такое поведение края поглощения, связанное с квантовым ограничением, было обнаружено и в других полупроводниках, например GaAs [106], CdSe [107] и т.д.

**Нелинейные оптические свойства.** Нелинейно-оптические и электрооптические свойства полупроводников в виде наночастиц с квантовыми свойствами представляют большой интерес для практического применения. Экспериментально нелинейные оптические свойства наночастиц в пористом стекле были исследованы для GaAs [108], InP [109] и Cu<sub>2</sub>O [110] и металлов.

Композиционные материалы на основе наночастиц металлов представляют особый интерес для лазерной физики и оптоэлектроники благодаря ультрабыстрому нелинейному оптическому отклику, а также проявлению в них гигантского электронного эффекта Керра. Исследованию нелинейных оптических свойств сред с включениями наночастиц золота посвящено достаточно большое число научных публикаций. Была изучена зависимость нелинейных оптических свойств композиционных материалов, содержащих металлические наночастицы, от их размера и формы, особенностей методов формирования наночастиц (ионная имплантация, магнетронное распыление, химические методы синтеза и т.д.), а также параметров лазерного излучения (длительность и частота следования импульсов, длина волны излучения). Особое внимание уделялось оценке степени влияния окружающих наночастицы диэлектрических и полупроводниковых матриц на нелинейные оптические свойства материалов.

Важнейшими характеристиками композиционного материала, обуславливающими его применение на практике, являются абсолютная величина и знак нелинейного показателя преломления  $\gamma$ , который может принимать либо положительное значение при самофокусировке лазерного излучения, либо быть отрицательным при самодефокусировке. Очевидно также, что характерные значения  $\gamma$  зависят не только от индивидуальных свойств композиционного материала, но и от параметров используемого лазерного излучения.

Впервые оптические нелинейности металлических коллоидных частиц Au и Ag в водных растворах наблюдались Рикардом с коллегами в 1985 году и регистрируемые значения восприимчивости третьего порядка  $\chi^{(3)}$  составляли  $1,5 \cdot 10^{-8}$  ед. СГСЭ для Au частиц и  $2,4 \cdot 10^{-9}$  ед. СГСЭ для Ag частиц. Эти величины примерно на два порядка выше, чем у объемных металлических материалов. В случае меди  $\chi^{(3)}$  заметно превышает значения, соответствующие Au и Ag, что обуславливает практический интерес к исследованию Cu наночастиц.

Несмотря на то, что для композитных материалов с металлическими наночастицами теоретические оценки предсказывают величины  $\chi^{(3)}$  порядка  $10^{-6}$  ед. СГСЭ, реально на практике из-за низкой концентрации частиц величина  $\chi^{(3)}$  составляет не более  $10^{-8}$  ед. СГСЭ. Возникает очевидная задача создания композиционных материалов на основе диэлектрических слоев с высоким фактором заполнения металлическими наночастицами.

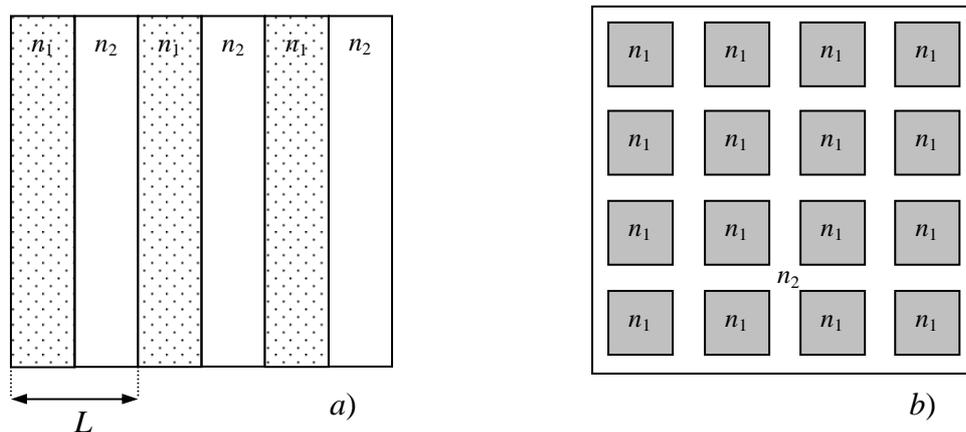
При измерении нелинейно-оптических характеристик композитов, полученных путем имплантации ионов меди в кварцевое стекло, были получены наночастицы Cu с размером  $4,0 \pm 0,5$  нм. При этом величина нелинейности  $\chi^{(3)}$  составляла  $10^{-7}$  ед. СГСЭ, что как минимум на порядок превышает ранее известные на практике значения  $\chi^{(3)}$ , для SiO<sub>2</sub> стекол с подобными частицами, полученными иными методиками. Поскольку величина  $\chi^{(3)}$  напрямую связана с фактором заполнения, очевидно, что увеличение параметра за-

полнения, реализуемого при ионной имплантации, приводит к повышению  $\chi^{(3)}$  [111].

**Фотонные кристаллы.** Фотонными кристаллами принято называть среды, у которых диэлектрическая проницаемость периодически меняется в пространстве с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света. Фотонные кристаллы, благодаря периодическому изменению коэффициента преломления, позволяют получить разрешённые и запрещённые зоны для энергий фотонов, аналогично полупроводниковым материалам, в которых наблюдаются разрешённые и запрещённые зоны для энергий носителей заряда. Практически, это значит, что если на фотонный кристалл падает свет, обладающий длиной волны, которая соответствует запрещённой зоне данного фотонного кристалла, то он не может распространяться в фотонном кристалле и отражается обратно. И наоборот, если на фотонный кристалл падает свет, обладающий длиной волны, которая соответствует разрешённой зоне данного фотонного кристалла, то он может распространяться в фотонном кристалле. Другими словами, фотонный кристалл выполняет функцию оптического фильтра.

По характеру изменения коэффициента преломления фотонные кристаллы можно разделить на три основных класса. Одномерные, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в одном пространственном направлении как показано на рис. 4.6.2а. На этом рисунке символом  $L$  обозначен период изменения коэффициента преломления,  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления двух материалов (но в общем случае может присутствовать любое число материалов). Такие фотонные кристаллы могут проявлять свои свойства в одном пространственном направлении, перпендикулярном слоям. Двухмерные, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в двух пространственных направлениях как показано на рис. 4.6.2б. Такие фотонные кристаллы могут проявлять свои свойства в двух пространственных направлениях, и форма областей с коэффициентом преломления  $n_1$  не ограничивается прямоугольниками, как на рисунке, а может быть любой (ок-

ружности, эллипсы, и т. д.). Трёхмерные, в которых коэффициент преломления периодически изменяется в трёх пространственных направлениях. Такие фотонные кристаллы могут проявлять свои свойства в трёх пространственных направлениях, и можно их представить как массив объёмных областей (сфер, кубов и т. д.), упорядоченных в трёхмерной кристаллической решётке.



**Рис. 4.6.2.** Схематическое представление одномерного (a) и двумерного фотонного кристалла (b).

Как и электрические среды, в зависимости от ширины запрещённых и разрешённых зон, фотонные кристаллы можно разделить на проводники – способные проводить свет на большие расстояния с малыми потерями, диэлектрики – практически идеальные зеркала, полупроводники – вещества способные, например, выборочно отражать фотоны определённой длины волны, и сверхпроводники, в которых благодаря коллективным явлениям фотоны способны распространяться практически на неограниченные расстояния.

В природе фотонные кристаллы встречаются, например, в опале, благодаря чему он может иметь красочные цвета. Было показано, что синтетические опалоподобные системы [112], обладают свойствами фотонных кристаллов во всей видимой части спектра. Пустоты между сферами  $\text{SiO}_2$  составляют до 26 % от общего объема опала и могут быть заполнены веществам другого сорта. Это позволяет изменять коэффициент преломления. Согласно

теоретическим оценкам, фотонная запрещенная зона может существовать при  $n > 2,8$ . В чистых опалах, где  $n$  значительно ниже, образование фотонной запрещенной зоны невозможно. Следовательно, для заполнения пустот следует использовать материалы с высокой диэлектрической постоянной. Если в опаловую матрицу внедрить вещество, которое является сегнетоэлектриком или ферромагнетиком, то можно с помощью магнитных и электрических полей управлять фотонной запрещенной зоной, а, следовательно, управлять световым потоком.

**Материалы для оптической записи данных.** Заполнение пористых сред светочувствительными материалами было использовано при создании новых сред для оптической записи информации (серебросодержащие пористые голограммы). С этими материалами можно проводить объемную голографическую запись с высоким КПД. Когда в 2006 году была разработана технология Blu-ray, 25-гигабайтный диск стоил порядка 1 доллара за гигабайт памяти. Сегодня эта цена уже вдвое ниже. Разработчики из General Electric предполагают, что к моменту промышленного запуска в 2011 – 2012 гг. голографические диски по их технологии будут стоить менее 10 центов за гигабайт, а может быть даже и дешевле.

Развивая идею голографической записи, сотрудники Технологического Университета Мельбурна Джеймс Чон и его коллеги, предложили использовать такие свойства лазерного излучения, как поляризация и длина волны. Основной проблемой, с которой столкнулись исследователи, была необходимость поиска такого материала, который бы изменял свои свойства под действием лазерного излучения с различной поляризацией. Выход был найден – им оказался материал, содержащий в огромном количестве палочкообразные наночастицы золота различных размеров и ориентации. Оказывается, что под действием лазерного пучка определенной поляризации происходит «плавление» только тех частиц, ориентация которых совпадает с поляризацией излучения – при записи форма частиц меняется на сферическую. Но самое интересное, что, изменив направление поляризации электромагнитного излу-

чения, можно осуществлять записи информации в том же объеме диска, где уже хранятся данные.

Еще одним интересным свойством частиц является их реакция на излучение определенной длины волны – наночастицы определенного размера изменяют свою форму под действием излучения строго определенной длины волны. Таким образом, исследователям предоставляется возможность, варьируя такие параметры лазерного излучения, как длина волны и поляризация, использовать множество «каналов» записи данных в одном объеме материала. В результате появляется возможность в одном кубическом сантиметре хранить до 140 Гб информации. Переводя эти цифры в формат стандартного оптического DVD-диска, мы получим увеличение его емкости до 1,6 Тб соответственно. Однако, согласно прогнозам самих исследователей, их разработка вряд ли выйдет на рынок ранее 2015 года. Впрочем, главным итогом этой работы стал успешный поиск материала, пригодного для объемной оптической записи информации.

#### ***4.7. Переход от микроэлектроники к нанoeлектронике***

**Микроэлектроника** – раздел электроники, связанный с изучением и производством электронных компонентов, с геометрическими размерами характерных элементов порядка нескольких микрометров и меньше. Такие устройства обычно производят из полупроводников, используя процессы фотолитографии и легирование.

Литография остаётся одним из определяющих технологических процессов в микроэлектронике в течение более 40 лет. Микролитография, или в настоящее время уместнее говорить о нанолитографии, предназначена для создания топологического рисунка на поверхности монокристаллической кремниевой пластины.

Наименьший размер элементов при изготовлении интегральных микросхем (ИМС), в основном, определяется разрешающей способностью микролитографии, которая зависит от длины световой волны. Ввиду малости раз-

мера элементов микросхем от использования видимого света и даже ближнего ультрафиолета при засветке давно отказались. В качестве характеристики технологического процесса производства микросхем указывают ширину полосы микролитографии и, как следствие, размеры транзисторов и других элементов на кристалле. Этот параметр, однако, находится во взаимозависимости с рядом других производственных возможностей: чистотой получаемого кремния, методами вытравливания и напыления.

В 70-х годах 20 века ширина полосы микролитографии составляла 2 – 8 мкм, в 80-х была улучшена до 0,5 – 2 мкм. Некоторые экспериментальные образцы рентгеновского диапазона обеспечивали 0,18 мкм. В 90-х годах из-за нового витка «войны платформ» экспериментальные методы стали внедряться в производство и быстро совершенствоваться. В начале 90-х процессоры (например, ранние Pentium и Pentium Pro) изготавливали по технологии 0,5 – 0,6 мкм. Потом их уровень поднялся до 0,25 – 0,35 мкм. Следующие процессоры (Pentium 2, K6-2+, Athlon) уже делали по технологии 0,18 мкм.

В конце 90-х годов фирма Texas Instruments создала новую ультрафиолетовую технологию с шириной полосы около 0,08 мкм. Но достичь её в массовом производстве не удавалось вплоть до недавнего времени. Она постепенно продвигалась к нынешнему уровню, совершенствуя второстепенные детали. По обычной технологии удалось обеспечить уровень производства вплоть до 0,09 мкм.

Новые процессоры (первоначально это был Core 2 Duo) делают по новой УФ-технологии 0,065 мкм. Есть и другие микросхемы, давно достигшие и превысившие данный уровень (в частности, видеопроцессоры и flash-память фирмы Samsung – 0,040 мкм). Тем не менее, дальнейшее развитие технологии вызывает всё больше трудностей. Обещания фирмы Intel по переходу на уровень 0,030 мкм уже к 2006 году так и не сбылись. Сейчас альянс ведущих разработчиков и производителей микросхем работает над технологическим процессом 0,032 мкм. При переходе к литографии с разрешением меньшим, чем 100 нм, обычно используется электронно-лучевое экспониро-

вание с помощью электронного сканирующего микроскопа и сухое проявление.

Сухое проявление основано на травлении резиста в плазменных, ионнолучевых или плазмохимических процессах. В настоящий момент основные усилия сосредоточены на разработке плазмохимических процессов проявления, т.к. они обладают большей селективностью, скоростью и анизотропией травления. Технология плазмохимического травления основана на генерировании электрическим разрядом химически активных частиц (атомов, радикалов или ионов), которые, вступая в химическую реакцию с обрабатываемым веществом, образуют легко летучие соединения, удаляемые вакуумной системой.

В настоящее время существуют промышленные технологии и соответствующее оборудование для плазмохимического травления стандартных для микроэлектроники материалов – кремния, диоксида кремния, нитрида кремния, алюминия, вольфрама и т.д. Эти процессы широко используются для травления металлических и диэлектрических слоев при создании полупроводниковых структур.

**Наноэлектроника.** Последние достижения науки показывают, что в отличие от традиционной микроэлектроники, потенциальные возможности которой в ближайшее десятилетие, по-видимому, будут исчерпаны, дальнейшее развитие электроники возможно только на базе принципиально новых физических и технологических идей. Так, на протяжении ряда десятилетий повышение функциональной сложности и быстродействия систем достигалось увеличением плотности размещения и уменьшением размеров элементов, принцип действия которых не зависел от их масштаба. При переходе к размерам элементов порядка десятков или единиц нанометров возникает качественно новая ситуация, состоящая в том, что размерные эффекты оказывают определяющее влияние на физические процессы в наноструктурах.

Создание наноструктур базируется на новейших технологических достижениях в области конструирования на атомном уровне твердотельных по-

верхностных и многослойных структур с заданным электронным спектром и необходимыми электрическими, оптическими, магнитными и другими свойствами. Требуемая зонная структура таких искусственных материалов обеспечивается выбором веществ, из которых изготавливаются отдельные слои структуры («зонная инженерия»), поперечных размеров слоев (размерное квантование), изменением степени связи между слоями («инженерия волновых функций»). Наряду с квантово-размерными планарными структурами (двумерный электронный газ в квантовых ямах, сверхрешетки) исследуются одно- и нульмерные квантовые объекты (квантовые нити и точки), интерес к которым связан с надеждами на открытие новых физических явлений и, как следствие, на получение новых возможностей эффективного управления электронными и световыми потоками в таких структурах. Мы рассмотрим лишь несколько наиболее перспективных устройств наноэлектроники.

**Нанотрубка в роли транзистора.** Оказывается, для того чтобы сделать транзистор на основе нанотрубок, не нужно прилагать дополнительных усилий – делать между ними полимерные переходы и т.п. Как установили сотрудники Калифорнийского университета UCSD и университета Клемсона, Y-образная нанотрубка может выполнять функции транзистора, обладая при этом более высоким быстродействием.

Для того, чтобы создать нанотрубку в форме буквы Y, была разработана новая технология выращивания. Сначала была выращена обычная «прямая» нанотрубка, затем на ее поверхность нанесли специально обработанные наночастицы титана, которые выступили в роли катализаторов роста еще одной ветви на поверхности уже сформированной нанотрубки.

Как показали результаты измерений вольтамперных характеристик Y-транзистора, после прикладывания напряжения на «ствол» нанотрубки протекание электронов от одной ветви к другой прекращается. Это характерная особенность транзисторных ключей: при подаче напряжения на затвор ток между истоком и стоком не протекает. И наоборот, как только был приложен

положительный потенциал к «стволу» нанотранзистора, протекание тока через «ветви» возобновилось.

Исследователи планируют провести ряд экспериментов с нанотранзистором и использовать различные виды наночастиц для выращивания наноструктур с другими электрическими свойствами Y-перехода (рис. 4.7.1). Если учесть, что технологии создания разветвленных наноструктур на основе нанотрубок уже разработаны, то создание такого нанотранзистора может помочь в разработке и производстве чипов, состоящих из одной сложной сети нанотрубок.



Рис. 4.7.1. Y-образная нанотрубка.

**Конденсаторы из углеродных нанотрубок.** Конденсаторы очень большой емкости можно сделать из углеродных нанотрубок, используя технологию, предложенную исследователями из UC Davis. Суперконденсаторы – это устройства для хранения электричества, способные выдавать большое количество энергии за короткое время. Суперконденсаторы пригодятся в электронике и других областях, где необходим мощный и короткий импульс энергии. Новые устройства могут вырабатывать 30 кВт/кг по сравнению с 4 кВт/кг, характерные для самых современных конденсаторов.

Профессор Ning Pan и его сотрудники создали суспензию из нанотрубок – крошечных пустотелых углеродных цилиндров диаметром в несколько атомов. Они разработали метод нанесения нанотрубок на никелевую подложку так, чтобы нанотрубки располагались близко друг к другу. Традиционные конденсаторы накапливают электрический заряд между двумя проводящими пластинами, разделенными слоем диэлектрика. При этом, чем больше площадь их поверхности, тем больший заряд накапливает конденсатор. «Благодаря своему малому размеру нанотрубки обладают огромной площадью поверхности, на которой можно накапливать энергию», – говорит Ning Pan.

**Квантовый ключ.** Исследователям из японского Национального института материаловедения удалось перенести старую технологию механо-электрических выключателей на квантовый уровень. Они создали миниатюрный выключатель, подобный тем, которые по сей день используются во многих приборах.

Принцип работы выключателя прост – при подаче напряжения на устройство между двумя нанопроводниками в зависимости от полярности возникает или распадается мостик из серебра. Длина мостика, по которому протекает ток, – всего 1 нм. На отрезке длиной 1 нм можно расположить 10 атомов водорода, поэтому сообщение о создании нового квантового устройства претендует на открытие. Весь секрет заключается в составе нанопроводников – шин. Один проводник выполнен из чистого серебра, покрытого тонким слоем сульфида серебра, второй – из платины, покрытой чистым серебром. При возникновении положительной разности потенциалов между шинами атомы серебра выделяются из сульфида в мостик длиной 1 нм, и, соответственно, при изменении знака напряжения мостик разрушается и атомы возвращаются в сульфид. Квантовое устройство работает при комнатной температуре и обычном и атмосферном давлении.

Прототип, изготовленный учеными, переключается с частотой около 1 МГц при разнице потенциалов между шинами  $\pm 600$  мВ. Частота переключе-

чений устройства связана с толщиной шин. Как говорит Хасегава, если их еще уменьшить, то можно достичь частоты в 1 ГГц.

Преимущество нового ключа состоит в том, что благодаря конструкции устройства емкость памяти на его основе будет выше той, которая существует сейчас. Если же использовать каждый ключ в качестве элемента памяти, то емкость одного слоя составит  $2,5 \text{ Гбит/см}^2$ , в то время как самые сверхплотные чипы памяти характеризуются емкостью в  $1 \text{ Гбит/см}^2$ .

Исследователи смогли сконструировать логические ячейки И, ИЛИ и ИЛИ-НЕ на основе нового ключа. Все логические устройства показали хорошие рабочие характеристики. Теперь ученые разрабатывают методы серийного производства матрицы квантовых ключей. Как говорит Хасегава: «Если нам удастся разработать многослойные чипы на основе этих переключателей, то произойдет еще одна революция в микроэлектронике». Исследователи говорят, что наноэлектроника на основе новых квантовых ключей может вытеснить современную уже через 10 лет.

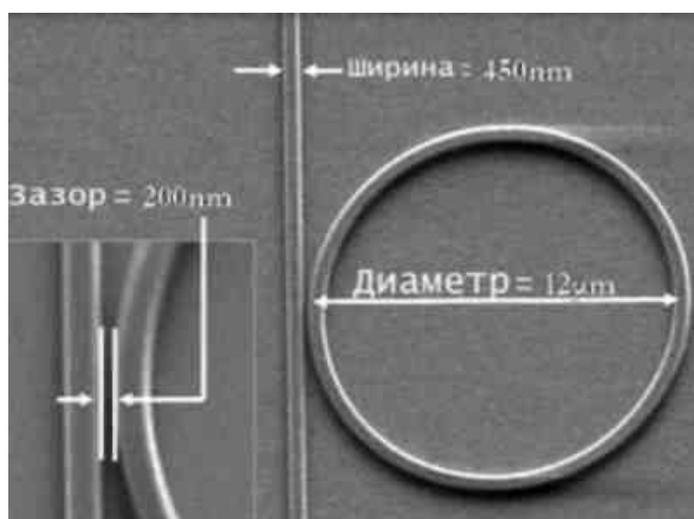
**Фотонные транзисторы.** Большинство электронных устройств в скором времени могут стать фотонными, т.е. вместо электронов, переносящих информацию, будут «курсировать» фотоны. Эта область науки развивается уже с 1970 г. Фотоника (так называется эта новая область устройств, где в качестве основного сигнала используются отдельные фотоны) может применяться в таких областях, как телекоммуникации, оптоволоконные сети, маршрутизация Интернета и создания «световых компьютеров».

Почему же выгодно использовать фотонику вместо обычной электроники? Во-первых, фотонные устройства будут потреблять меньше энергии. Во-вторых, с помощью фотонных чипов можно будет оперировать большими объемами информации и, следовательно, скорость вычислений возрастет.

Грубо говоря, в фотонном чипе лучи света заменят ток электронов по проводникам в аналогичном электронном чипе. Фотоника гораздо меньше

отдает теплоты в окружающую среду и, следовательно, меньше потребляет энергии для работы.

На сегодняшний день имеется ряд прототипов нанофотонных устройств. Однако есть проблема: фотонные устройства надо органично «вписать» в море современной электроники. И для этого необходимо сконструировать устройство, которое обеспечивало бы взаимодействие между фотонными и электронными чипами. Такое устройство можно назвать «фотонным транзистором», или «фотонным ключом» (рис. 4.7.2). Его функция – пропускать световые волны при наличии соответствующего сигнала и не пропускать, если сигнала разрешения нет.



**Рис. 4.7.2.** Микрофотография фотонного чипа.

В Корнеллском университете (США) исследователям удалось приблизиться к решению этой проблемы. Они смогли создать устройство, которое переводит электрический сигнал в модулируемый световой луч в наноразмерном диапазоне. При этом размеры фотонного устройства позволяют использовать его в маршрутизаторах, оптоволоконных сетях и микропроцессорах.

Такие устройства удавалось делать и ранее, но их размеры составляли несколько миллиметров. Естественно, что связывать чип миллиметровых размеров с современными микросхемами было бы неэффективно. Ученые из

Корнелла смогли сделать такой же чип размерами несколько микрон. Такое устройство уже можно интегрировать в современные микросхемы. Удалось это сделать благодаря использованию арсенида галлия. Этот полупроводник легко можно интегрировать в полупроводниковые устройства, и он в основном применяется в современной микроэлектронике.

В основу нанофотонного модулятора лег кольцевой резонатор, который отстоит от прямого светового волновода на 200 нм (рис. 4.7.2). Свет, проходящий через прямой отрезок волновода, множество раз огибает кольцевой резонатор. Явление это широко известно и используется в фотонных устройствах. Причем от диаметра кольца напрямую зависит длина волны светового пучка на выходе из резонатора. Ученые использовали диаметры 10 и 12 мкм и получили свет с длиной волны 1555 и 1576 нм соответственно.

Кольцо-модулятор расположено на поверхности из отрицательно допированного кремния, а внутри кольца – область с положительным допированием (рис. 4.7.2). Поэтому волновод представляет собой зону раздела между *p*- и *n*-областями *p-n*-диода, образованного структурой волноводов и полупроводников.

Как только на микросистему подают напряжение, электроны и дырки поступают в область волновода, изменяя его оптический коэффициент преломления. Соответственно у волновода изменяется резонансная частота света, которую он может пропускать. Таким образом, напряжение «запирает» свет, проходящий через прямой отрезок волновода.

Ранее ученые использовали похожий принцип диода в фотонике для того, чтобы модулировать свет в прямых участках волновода. И это удавалось только тогда, когда свет проходил сравнительно большое расстояние по волноводу. Соответственно, для работы устройства нужен волновод большей длины и тогда чип будет уже макроскопических размеров. А ученые из Корнелла заставили бежать свет по кругу в резонансном кольце, тем самым удлинив его путь.

В тестах на устройство подавали 0,3 В и этого хватало, чтобы прекратить распространение света по волноводу. Затем исследователи протестировали устройство на частоту включений. Результаты оказались достаточно оптимистичными: с помощью кольца-резонатора удалось пропустить через фотонный транзистор 1,5 Гбит в секунду.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какие механические свойства претерпевают изменения при уменьшении частиц до наноразмеров?
2. Почему температура плавления металлических наночастиц меньше, чем у объемных образцов?
3. Как и почему меняется теплоемкость наноразмерных частиц?
4. Каким образом меняется электронный спектр малых частиц и почему?
5. Что такое квантовые проволоки?
6. От чего зависит механизм проводимости в фуллереноподобных материалах?
7. Как изменяются свойства у сегнетоэлектриков при уменьшении размеров до наносостояния?
8. Какие свойства меняются у ферромагнетиков, размер частиц которых лежит в нанометровом диапазоне?
9. В чем суть явления суперпарамагнетизма?
10. Что такое эффект гигантского магнитосопротивления и когда он наблюдается?
11. От чего зависит спектр пропускания фотонных кристаллов?
12. Какие достижения нанотехнологий используются для хранения информации?
13. В чем принципиальное различие между микро- и наноэлектроникой?
14. Какая роль в наноэлектронике отводится углеродным нанотрубкам?
15. Что такое фотонные транзисторы?
16. В чем заключается принцип работы квантового ключа?

## Список использованной литературы

1. Skripov V.P., Koverda V.P., Skokov V.N. Size effect on melting of small particles // *Physica status solidi (a)*. – 1981. – V. 66. – iss. 1. – P. 109-118.
2. Wronski, C.M. The size dependence of the melting point of small particles of tin // *Brit. J. Appl Phys.* – 1967. – V. 18. – iss. 12. – P. 1731-1737.
3. Jellinek J., Beck T.L., Berry R.S. Solid-liquid phase changes in simulated isoenergetic Ar<sup>13</sup> / J. Jellinek, // *J. Chem. Phys.* – 1986. – V. 84. – iss. 5. – P. 2783-2794.
4. Berry R.S. Potential surfaces and dynamics: what clusters tell us // *Chem Rev.* – 1993. – V. 93. – P. 2379-2394.
5. Cheng, H.P., Berry R.S. Surface melting of clusters and implications for bulk matter // *Phys. Rev. A.* – 1992. – V. 45. iss. 11. – P. 7969-7980.
6. Kunz, R.E., Berry R.S. Multiple phase coexistence in finite systems // *Phys. Rev. E.* – 1994. – V. 49. – iss. 3. – P. 1895-1908.
7. Braier P.A., Berry R.S., Wales D.J. How the range of pair interactions governs features of multidimensional potentials // *J. Chem. Phys.* – 1990. – V. 93. – iss. 12. – P. 8745-8756.
8. Rosenstock H.B. On the optical properties of solids // *J. Chem. Phys.* – 1955. – V. 23. – iss. 12. – P. 2415-2423.
9. Бурсиан Э.В. Нелинейный кристалл. Титанат бария. – М.: Наука, 1974. – 295 с.
10. Maradudin A., Wallis R. Lattice-Dynamical Calculation of the Surface Specific Heat of a Crystal at Low Temperatures // *Phys. Rev. B.* – 1966. – V. 148. – iss. 3. – P. 945-961.
11. Burton J. Configuration, energy, and heat capacity of small spherical clusters of atoms // *J. Chem. Phys.* – 1970. – V.52. – iss. 1. – P. 345-352.
12. Baltes H.P., Hilf E.R. Specific heat of lead grains // *Solid State Commun.* – 1973. – V. 12. – iss. 5. – P. 369-373.
13. Тамм И.Е. О возможности связанных состояний электронов на поверхности кристалла // *ЖЭТФ.* – 1933. – Т. 3. – № 1. – С.34-43.

14. Bukowski T.J., Simmons H.J. Quantum dot research: current state and future prospects // *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* – 2003. – V. 27. – iss. 3-4. – P. 119-142.
15. Alhassid Y. The statistical theory of quantum dots // *Rev. Mod. Phys.* – 2000. – V. 72. – iss. 4. – P. 895-968.
16. Klimov V. I. Linear and nonlinear optical spectroscopy of semiconductor nanocrystals // *Handbook on Nanostructured Materials and Nanotechnology.* – 1999. – V. 4. – P. 451-527.
17. Блинов А.М. Лэнгмюровские пленки // *Успехи физ. наук.* – 1988. – Т.155. – С.443-480.
18. Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids // *J. Am. Chem. Soc.* – 1917. – V.39. – P.1848-1906.
19. Арслан В.В. Полимерные слои и пленки Ленгмюра-Блоджетт // *Успехи физ. наук.* – 1994. – Т.63. – С.3-43.
20. Colvin V.L., Goldstein A.N., Alivisatos A.P. Semiconductor nanocrystals covalently bound to metal surfaces with self-assembled monolayers // *J. Am. Chem. Soc.* – 1992. V.114. P.5221-5230.
21. Chumanov G., Sokolov K., Gregory B.W., Cotton T.M. Colloidal Metal Films as a Substrate for Surface-Enhanced Spectroscopy // *J. Phys. Chem.* – 1995. – V.99. – P.9466-9471.
22. Jang J., Meldrum F.C., Fendler J.H. Epitaxial Growth of Size-Quantized Cadmium Sulfide Crystals Under Arachidic Acid Monolayers // *J. Phys. Chem.* – 1995. –V.99. – P.5500-5504.
23. Помогайло А.Д. Гибридные полимер-неорганические нанокомпозиты // *Успехи химии.* – 2000. – Т.69. – С. 60-90.
24. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. – М.: «Мир», 1976.- 781 с.
25. Богомолов В. И. Жидкости в ультратонких каналах // *УФН.* – 1978. – Т.124. – С.171-182.
26. Брегг У.Л., Кларингбулл Г.Ф. Кристаллическая структура минералов. – М.: «Мир», 1967. – 392 с.

27. Парфенов В.А., Кирик С.Д., Белоусов О.В., Вершинина М.А. Исследование процессов формирования мезоструктурированных силикатов типа MCM-41 в зависимости от состава реакционной среды // Вестник КрасГУ. Естественные науки. – Красноярск, 2003. – № 2. – С.100-107.
28. Романовский Б.В., Макшина Е.В.. Нанокompозиты как функциональные материалы // Соросовский образовательный журнал. – 2004. – Т.8. – С.50-55.
29. Fenelonov V.B., Romannikov V.N., Derevyankin A.Yu. About Mesopore Surface Area and Size Calculations for Hexagonal Mesophases (Types of MCM-41, FSM-16, ets) // Micropor. Mesopor. Mater. – 1999. – V.28. – P.57-72.
30. Jian Suan. Mesoporous molecular sieves: From catalysis to solid phase synthesis // A Thesis Master of Science. – The university of New Brunswick, 1999. – P.154-155.
31. Свитцов А.А., Кострикова О.А. Электронный учебник "Полупроницаемые пористые мембраны". – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2005. – Режим доступа: <http://www.membrane.msk.ru/books/book2/>, свободный.
32. Богомолов В.Н., Голубев В. Г., Картенко Н.Ф., Курдюков Д.А., Певцов А.Б., Прокофьев А.В., Ратников В.В., Феоктистов Н.А., Шаренкова Н.В. Получение регулярных трехмерных (3М) решеток кремниевых кластеров субмикронных размеров в матрице SiO<sub>2</sub> (опале) // ПЖТФ. – 1998. – Т.24. – С.90-95.
33. Богомолов В.Н., Сорокин Л.М., Курдюков Д.А., Павлова Т.М., Хатчисон Дж. Сравнительное изучение с помощью просвечивающей электронной микроскопии трехмерной решетки из нанокластеров теллура, полученной различными способами в опаловой матрице // Физика твердого тела. – 1997. – Т.39. – С.2090-2095.
34. Нанотехнологии в электронике / под ред. Е. Ю. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 448с.

35. Cowley J.M., Liu J. Contrast and resolution in REM, SEM and SAM // *Surface Science*. – 1993. – V. 298. – iss. 2-3. – P. 456-467.
36. Mancos M., Scheinfein M.R., Cowley J.M. Quantitative micromagnetics at high resolution using far-out-of-focus STEM electron holography // *Advances in Imaging and Electron Physics*. – 1996. – V. 98. – P. 323-426.
37. Bauer E. Low energy electron microscopy // *Rep. Prog. Phys.* – 1994. – V. 57. – P. 895-938.
38. Ade H., Yang W., English S.L., Hartman J., Davis R.F., Nemanich R.J. A free electron laser - photoemission electron microscope system (FEL-PEEM) // *Surf. Rev. Lett.* – 1998. – V. 5. – iss. 6. – P. 1257-1268.
39. Stohr J., Wu Y., Hermsmeier B.D., Samant M.G., Harp G.R., Koranda S., Dunham D., Tonner B.P. Element-specific magnetic microscopy with circularly polarized X-rays // *Science*. – 1993. – V. 259. – iss. 29. – P. 658-661.
40. Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E. Surface studies by scanning tunneling microscopy // *Phys. Rev. Lett.* – 1982. – V. 49. – iss. 1. – P. 57-61.
41. Binnig G., Quate C.F. Atomic Force Microscope // *Phys. Rev. Lett.* – 1986. – V. 56. – iss. 9. – P. 930-933.
42. Wickramasinghe, H.K. Scanned-probe microscopes // *Scientific American*. – 1989. – V. 261. – iss. 4. – P. 98-105.
43. Bürgi L., Jeandupeux O., Hirstein A., Brune H., Kern K. Confinement of surface state electrons in fabry-pérot resonators // *Phys. Rev. Lett.* – 1998. – V. 81. – iss. 24. – P. 5370-5373.
44. Betzig E., Trautman J.K., Harris T.D., Weiner J.S., Kostelak R.L. Breaking the diffraction barrier: optical microscopy on a nanometric scale // *Science*. – 1991. – V. 251. – iss. 5000. – P. 1468-1470.
45. Majumdar J.P., Carrejo J.L. Thermal imaging using the atomic force microscope // *Appl. Phys. Lett.* – 1993. – V. 62. – iss. 20. – P. 2501-2503.

46. Williams C.C., Slinkman J., Hough W.P., Wickramasinghe H.K. Lateral dopand profiling with 200 nm resolution by scanning capacitance microscopy // *Appl. Phys. Lett.* – 1989. – V. 55. – iss. 16. – P. 1662-1664.
47. Hobbs P.C.D., Abraham D.W., Wickramasinghe H.K. Magnetic force microscopy with 25 nm resolution // *Appl. Phys. Lett.* – 1989. – V. 55. – iss. 22. – P. 2357-2359.
48. Bard A.J., Fan F.R.F., Pierce D.T., Unwin P.R., Wipf D.O., Zhou F. Chemical imaging of surfaces with the scanning electrochemical microscope // *Science.* – 1991. – V. 254. – iss. 5028. – P. 68 – 74
49. Gaub H.E., Rief M., Gautel M., Oesterhelt F., Fernandez J.M. Reversible unfolding of individual titin immunoglobulin domains by AFM // *Science.* – 1997. – V. 276. – iss. 5315. – P. 1109-1112.
50. Gimzewski J.K., Joachim C. Nanoscale science of single molecules using local probes // *Science.* – 1999. – V. 283. – iss. 5408. – P. 1683-1688.
51. Лундин, А.Г., Зорин В.Е. Ядерный магнитный резонанс в конденсированных средах // *УФН.* – 2007. – Т. 177. – №10. – С. 1107-1132.
52. Абрагам, А. Ядерный магнетизм. М.: изд. Иностранной Литературы, 1963. – 551 с.
53. Глинчук М. Д., Грачев В.Г., Ройцин С.Б., Сислин Л.А. Электрические эффекты в радиоспектроскопии: Электронный, парамагнитный, двойной электронный-ядерный и параэлектронный резонансы // – М.: Наука, 1981. – 332 с.
54. Yee P., Knight W. D. Quantum size effect in copper: NMR in small particles // *Phys. Rev. B.* – 1975. – V. 11. – iss. 9. – P. 3261-3267.
55. Nomura K. Electron level quantization effects in small tin particle // *Solid State Communications.* – 1977. – V. 24. – iss. 1. – P. 81-82.
56. Kobayashi S., Takahashi T., Sasaki W. NMR properties of superconducting fine particles: Al and Sn // *J. Phys. Soc. Jpn.* – 1974. – V. 36. – iss. 3. – P. 714-719.

57. Касперович В.С., Чарная Е.В., Tien C., Wur C.S. ЯМР ртути в пористых углях и силикагеле // ФТТ. – 2003. – Т. 45. – № 9. – Р. 1717-1721.
58. Borisov B. F., Charnaya E.V., Plotnikov P.G., Hoffmann W.D., Michel D., Kumzerov Yu.A., Tien C., Wur C. S. Solidification and melting of mercury in a porous glass as studied by NMR and acoustic techniques // Phys. Rev. B. – 1998. – V. 58. – iss. 9. – P. 5329-5335.
59. Поплавко Ю.М. Физика диэлектриков. – Киев: Высш. шк., 1980. – 400с.
60. Kircher O., Schiener B., Böhmer R. Long-lived dynamic heterogeneity in a relaxor ferroelectric // Phys. Rev. Lett. – 1998. – V. 81. – iss. 20. – P. 4520-4523.
61. Струков Б.А., Леванюк А.П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. – М.: Наука, 1995. – 302 с.
62. Гаврильяк С., Негами С. Переходы и релаксационные явления в полимерах. – М.: Мир, 1968. – С. 118-137.
63. Верховская, К.А., Плаксеев А.А., Лотонов А.М., Гаврилова Н.Д., Юдин С.Г. Диэлектрическая спектроскопия в ультратонких полимерных сегнетоэлектрических пленках // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – № 7. – С. 1297-1300.
64. Металловедение и термическая обработка стали. / Под ред. Бернштейна М.Л. и Рахштадта А.Г. – М.: Metallurgia, 1991. Т.1. – 304 с.
65. Ковалев А.И., Щербединский Г.В. Современные методы исследования поверхности металлов и сплавов. – М.: Metallurgia, 1989. – 192 с.
66. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. – М: Наука, 2003. - 248 с.
67. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. – М: Наука, 1983. – 260 с.
68. Алымов М.И., Зеленский В.А. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. – М.: МИФИ, 2005. – 52 с.

69. Андриевский Р.А., Глезер А.М. Прочность наноструктур. // УФН. – 2009. – Т. 179. – №4. – С. 337-358.
70. Dubrovinskaia N, Solozhenko V.L, Nobuyoshi Miyajima, Dmitriev V., Kurakevych O.O., Dubrovinsky L. Superhard nanocomposite of dense polymorphs of boron nitride: Noncarbon material has reached diamond hardness // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – V.90 – 101912 (3p.).
71. Ohlsson B.J., Bjork M.T., Magnusson M.H., Deppert K., Samuelson L., Wallenberg L. R. Size-, shape-, and position-controlled GaAs nano-whiskers // *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – V. 79. – iss. 20. – P. 3335-3339.
72. Kasumov A., Klinov D, Roche P.-E., Gueron S., and Bouchiat H., Thickness and low-temperature conductivity of DNA molecules // *Applied physics letters.* – 2004. – V.84. –iss.6. – P.1007-1009.
73. Лякишев Н.П., Алымов М.И., Добаткин С.В. Объемные наноматериалы конструкционного назначения // *Металлы.* – 2003. – №3. – С.3-16.
74. Новые материалы. Под ред. Ю.С. Карабасова – М.: МИСИС, 2002 – 736 с.
75. Wronski, С.М. The size dependence of the melting point of small particles of tin // *Brit. J. Appl Phys.* – 1967. – V.18. – iss.12. – P. 1731-1737.
76. Коверда В.П., Скоков В.Н., Скрипов В.П. Кристаллизация малых частиц в островковых пленках олова, свинца и висмута // *Кристаллография.* – 1982. – Т.27. – № 2. – С.358-370.
77. Castro T., Reifenberger R., Choi E., Andres R.P. Size-dependent melting temperature of individual nanometer-sized metallic clusters // *Phys. Rev. B.* – 1990. – V.42. – iss.13. – P. 8548-8556.
78. Goll G., Löhneysen H.V. Specific heat of nanocrystalline and colloidal noble metals at low temperatures // *Nanostruct. Mater.* – 1995. – V.6. – P. 559-562.
79. Novotny V., Meincke P.P.M. Thermodynamic lattice and electronic properties of small particles // *Phys. Rev. B.* – 1973. – V.8. – iss.9. – P. 4186-4199.
80. Петров Ю.И. Физика малых частиц. – М.: Наука, 1982. – 359 с.

81. Pierre F., Gougam A.B., Anthore A., Pothier H., Esteve D., Birge N.O. Dephasing of electrons in mesoscopic metal wires // *Phys. Rev. B.* – 2003. – V.68. – iss.8. – P.085413-085427.
82. Кузнецова И.А., Хадчукаев Р.Р., Юшканов А.А. Влияние поверхностного рассеяния носителей заряда на высокочастотную проводимость тонкой цилиндрической полупроводниковой проволоки // *Физика твердого тела.* – 2009. – Т.51. – вып. 10. – С.2022-2027.
83. Максимов Е.Г. Новые экспериментальные данные по тонким сверхпроводящим пленкам // *УФН.* – 1966. – Т.88. – вып. 3. – С. 587-588.
84. В.Л. Гинзбург Сверхпроводимость: позавчера, вчера, сегодня, завтра // *УФН.* – 2001. – Т.171. – № 10. – С.1059-1070..
85. Панова Г.Х., Набережнов А.А., Фокин А.В. Поверхностная и объемная сверхпроводимость Pb, внедренного в нанометровые поры // *Физика твердого тела.* – 2009. – Т.50. – вып. 7. – С.1317-1320.
86. Qu B.D., Zhang P.L., Wang Y.G., Wang C.L., Zhong W.L. Dielectric susceptibility of ferroelectric thin films // *Ferroelectrics.* – 1994. – V. 152. – P. 219-224.
87. Tilley DR. In: Carlos Paz de Araujo, Scott JF, Taylor GW, editors. *Ferroelectric thin films: synthesis and basic properties*; 1996. – p.11-45.
88. Курчатов И.В. Сегнетоэлектрики.– М.; Л.: ГТТИ, 1933; Избр. труды / Под ред. А.П. Александрова. – М.: Наука, 1982.– Т.1. –281 с.
89. Бурсиан Э.В., Гиршберг Я.Г., Макаров К.В., Зайковский О.И. Диэлектрическая проницаемость и динамика решетки тонкой пленки сегнетоэлектрика // *ФТТ.* – 1970. – Т. 12. – С. 1850-1857.
90. Bune A., Fridkin V.M., Ducharme S., Blinov L.M., Palto S.P., Sorokin A.V., Yudin S.G., Zlatkin A. Two-dimensional ferroelectric films // *Nature.* – 1998. – V. 391. – P. 874-877.
91. Baryshnikov S.V., Tien C., Charnaya E.V., Lee M.K., Michel D., Böhlmann W., Stukova E.V. Dielectric properties of mesoporous sieves filled with NaNO<sub>2</sub> // *Ferroelectrics.* – 2008. – V. 363. – iss. 1. – P. 177-186.

92. Vakhrushev S.B., Kumzerov Yu.A., Fokin A., Naberezhnov A.A., Zalar B., Lebar A., Blinc R.  $^{23}\text{Na}$  spin-lattice relaxation of sodium nitrite in confined geometry // *Phys. Rev. B.* – 2004. – V. 70. – iss. 13. – P. 132102-132104.
93. Вахрушев С.Б., Голосовский И.В., Королева Е.Ю., Набережнов А.А., Окунева Н.М., Смирнов О.П., Фокин А.В., Товар М., Glazman M. Структура и диэлектрический отклик нанокompозитных твердых растворов  $\text{Na}_{1-x}\text{K}_x\text{NO}_2$  // *ФТТ.* – 2008. – Т. 50. – № 8. – С.1489-1495.
94. Poprawski R., Rysiakiewicz-Pasek E., Sieradzki A., Cizman A., Polanska J. Ferroelectric phase transitions in  $\text{KNO}_3$  embedded into porous glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids.* – 2007. – V. 353 – iss. 47-51. – P. 4457-4461.
95. Мишина Е.Д., Шерстюк Н.Э., Вальдер В.О., Мишина А.В., Воротилов К.А., Васильев В.А., Сигов А.С., De Santo M.P., Cazzanelli E., Barberi R., Rasing Th. Нелинейно-оптическая и микрорамановская диагностика тонких пленок и наноструктур сегнетоэлектриков  $\text{ABO}_3$  // *ФТТ.* – 2006. – Т. 48. – № 6. – С. 1140-1142.
96. Жигалина О.М., Воротилов К.А., Кускова А.Н., Сигов А.С. Электронная микроскопия наноструктур титаната бария-стронция в матрице оксида алюминия // *ФТТ.* – 2009. – Т. 51. – № 7. – С. 1400-1402.
97. Yadlovker D., Berger S. Uniform orientation and size of ferroelectric domains // *Phys. Rev. B.* – 2005. – V. 71. – iss. 18. – P. 184112-184117.
98. Tien C., Charnaya E.V., Lee M.K., Baryshnikov S.V., Michel D., Böhlmann W. NMR studies of structure and ferroelectricity for Rochelle salt nanoparticles embedded in mesoporous sieves // *J. Phys.: Cond. Matter.* – 2008. – V. 20. – iss. 21. – P. 215205-215210.
99. Baryshnikov S. V., Charnaya E. V., Stukova E. V., Milinskiy A. Yu., Cheng Tien Ferroelectricity in Rochelle salt nanoparticles confined to porous alumina// *Ferroelectrics.* – 2010 (to be published).

100. S. Kawai and R. Ueda, J. Magnetic properties of anodic oxide coatings on aluminum containing electrodeposited Co and Co-Ni // *Electrochem. Soc.* – 1975. – V.122. – iss.5. – P. 32-39.
101. Sun L., Searson P. C., Chien C L. Finite-size effects in nickel nanowire arrays // *Phys. Rev. B.* – 2000. – V.61. – iss.10. – P.R6463-R6463.
102. Golosovsky I.V., Mirebeau I., Andre G., Kurdyukov D. A., Kumzerov Y. A., Vakhrushev S. B. Magnetic ordering and phase transition in MnO embedded in a porous glass // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V.86. – iss.25. – P.5783-5786.
103. Piraux L., George J. M., Despres J. F., Leroy C., Ferain E., Legras R. Giant magnetoresistance in magnetic multilayered nanowires // *Appl. Phys. Lett.* – 1994. – V.65. – iss.19. – P.2484-2486.
104. Алферов Ж.И., Копьев П.С., Сурис Р.А., Асеев А.Л., Гапонов С.В. Наноматериалы и нанотехнологии: // "Нано- и микросистемная техника" / Сборник статей под редакцией П.П. Мальцева Москва: Техносфера, 2005 – 592 с.

## Список дополнительной литературы

### Учебники и монографии

1. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. – М.: «Мир», 1976. – 781 с.
2. Петров Ю.И. Физика малых частиц. – М.: Наука, 1982. – 359 с.
3. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства // Рос. Акад. наук. УрО. Ин-т химии твердого тела. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 199 с. – Библиогр.: с.178-199.
4. В.Я. Демиховский, Г.А. Вугальтер Физика квантовых низкоразмерных структур. – М.: Логос, 2000.
5. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с. – Библиогр.: 414 назв.
6. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. - М.: Физматлит, 2000. – 222 с. – Библиогр.: с.193-222.
7. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 332 с. – Библиогр.: 222 назв.
8. В.Я. Демиховский, Г.А. Вугальтер Физика квантовых низкоразмерных структур. – М.: Логос, 2000.
9. Рыков С.А. Сканирующая зондовая микроскопия полупроводниковых материалов и наноструктур / Под ред. А.Я.Шика. – СПб.: Наука, 2001. – 52 с. – Библиогр.: 14 назв.
10. Оптические свойства наноструктур: Учеб. пособие / Воробьев Л.Е., Ивченко Е.Л., Фирсов Д.А., Шалыгин В.А. – СПб.: Наука, 2001. – 188 с. – Библиогр.: 46 назв.
11. Чурилов А.Б. Введение в наноэлектронику: Учеб. пособие / Яросл. гос. ун-т. – Ярославль, 2002. – 132 с.

12. We are in micro- and nanoelectronics? / Чернова Н.И., Проничева Н.А., Васильев А.Г., Вортилов К.А.: Учеб. пособие по англ. яз. - М.: МИРЭА, 2003. – 105 с.
13. Битюков В.К., Голоденко Б.А. Нанотехнологии. Принципы, методы и реализации: Учеб. пособие / Воронеж. гос. технол. акад. – Воронеж, 2003. – 192 с. – Библиогр.: с.191.
14. Головин Ю.И. Введение в нанотехнологию. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 112 с. – Библиогр.: 39 назв.
15. Нанотехнология и микромеханика: Учеб. пособие / Иванов Ю.А., Малышев К.В., Шалаев В.А. и др. Ч.1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. – 48 с. – Библиогр.: 10 назв.
16. Золотухин И.В., Калинин Ю.Е. Магнитные наноструктуры: Учеб. пособие / Воронеж. гос. техн. ун-т. – Воронеж: ВГТУ, 2003. – 113 с. – Библиогр.: 9 назв.
17. Рыбалко В.В. Наноразмерные углеродосодержащие материалы: Учеб. пособие. – М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2003. – 50 с. – Библиогр.: 35 назв.
18. Рыженков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Ультрадисперсные системы: получение, свойства, применение: Учеб. пособие. - М.: МИСиС, 2003. – 182 с. – Библиогр.: 12 назв.
19. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники: Учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 496 с. (Сер. "Учебники НГТУ").
20. Алымов М.И. Методы получения нанопорошков: Учеб. пособие. – М.: МИФИ, 2004. – 22 с. – Библиогр.: 36 назв.
21. Алымов М.И. Механические свойства нанокристаллических материалов: Учеб. пособие. – М.: МИФИ, 2004. – 32 с. – Библиогр.: 7 назв.
22. Булер П. Нанотермодинамика. – СПб.: ООО "Янус", 2004. – 172 с. – Библиогр.: 32 назв.

23. Вивденко Ю.Н. Технологические системы производства наукоемкой техники: Учеб.-справ. пособие. – Омск: ОмГТУ, 2004. – 544 с. – Библиогр.: 125 назв.
24. Гречихин Л.И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства: Моногр. – Минск: Технопринт, 2004. – 399 с. – Библиогр.: 188 назв.
25. Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы нанотехнологии: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 108 с. – Библиогр.: 7 назв.
26. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
27. Алымов М.И., Зеленский В.А. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов: Учеб. пособие. – М.: МИФИ, 2005. – 52 с. – Библиогр.: 61 назв.
28. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы: Учеб. пособие. – М.: Академия, 2005. – 192 с. – Библиогр.: 46 назв.
29. Нанотехнология и микромеханика: Учеб. пособие / Иванов Ю.А., Малышев К.В., Федоркова Н.В. и др. Ч.2. Получение и измерение вакуума. – М.: МГТУ, 2005. – 47 с.
30. Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Ультрадисперсные системы: физические, химические и механические свойства: Учеб. пособие. – М.: МИСиС, 2005. – 113 с. – Библиогр.: с.112.
31. Фуллерены: Учеб. пособие / Л.Н.Сидоров, М.А.Юровская, А.Я.Борщевский и др. – М.: Экзамен, 2005. – 688 с. – Библиогр.: в конце глав.
32. Христофоров А.И., Сысоев Э.П., Христофорова И.А. Нанокерамика: Учеб. пособие в 3 ч. Ч.1. – Владимир: ВГУ, 2005. – 76 с. – Библиогр.: 60 назв.
33. Н. Кобаяси. Введение в нанотехнологию. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 134 с.

34. Вахрушев СБ., Кумзеров Ю.А., Окунева Н.М., Филимонов А.В. Физика наноразмерных структур. Наноструктуры в пористых средах: Учеб. пособие / СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2008. – 104 с.

### Журнальные статьи

35. Cheng Tien, Е.В.Чарная, С.В.Барышников, М.К. Lee, S.Y. Sun, D. Michel, W. В Ohlmann. Эволюция  $\text{NaNO}_2$  в пористых матрицах // ФТТ. – 2004. – Т.46. – №12 – С.2224-2228
36. Стукова Е.В., Барышников С.В. Диэлектрическая проницаемость пористых матриц, заполненных триглицинсульфатом // Современные наукоёмкие технологии. – 2006. – №1 – С.63-64.
37. Барышников С.В., Стукова Е.В., Чарная Е.В., Cheng Tien, М.К. Lee, W. Bohlmann, D. Michel. Диэлектрические и ЯМР-исследования нанопористых матриц, заполненных нитритом натрия // ФТТ. – 2006. – Т.48. – №3 – С.551-557.
38. Барышников С.В., Чарная Е.В., Tien Cheng, Michel D., Андриянова Н.П., Стукова Е.В. Диэлектрические параметры мезопористых решеток, заполненных  $\text{NaNO}_2$  // ФТТ. – 2007. – Т.49. – №4 – С.751-756.
39. Tien Cheng, Charnaya E.V., Lee M.K., Baryshnikov S.V.  $^{23}\text{Na}$  spin-lattice relaxation in powder Rochelle salt. // ФТТ. – 2007. – Т.49. – №7 – С.1265-1268.
40. Барышников С.В., Tien Cheng, Чарная Е.В., Lee M.K., Michel D., Bohlmann W., Андриянова Н.П. Диэлектрические и ЯМР-исследования суперионного проводника  $\text{AgI}$ , внедренного в мезопористые силикатные матрицы // ФТТ. – 2008. – Т.50. – №7 – С.1290-1294.
41. Барышников С. В., Борисов Б. Ф., Гартвик А. В., Горчаков А. Г., Чарная Е. В., Бельман В., Михель Д. Акустические исследования плавления и кристаллизации нанокристаллов нитрита натрия в порах мезопористых силикатных матриц // Акустический журнал. – 2009. – Т.55. – №1. – С. 32-38

42. Барышников С.В., Чарная Е.В., Милинский А.Ю., Стукова Е.В., Tien Cheng, Bohlmann W., Michel D. Диэлектрические свойства смешанных сегнетоэлектриков  $\text{NaNO}_2\text{-KNO}_3$  в нанопористых силикатных матрицах // ФТТ. – 2009. – Т.51. – №6 – С.1172 -1176.
43. Горчаков А.Г., Седых П.С., Чарная Е.В., Барышников С.В., Tien Cheng, Michel D. ЯМР-исследования нанопористых матриц, заполненных нитритом натрия, при вращении под магическим углом //ФТТ. – 2009. – Т.51. – №10 – С.2028 -2033.
44. Cheng Tien, E. V. Charnaya, M. K. Lee, S. V. Baryshnikov, S. Y. Sun, D. Michel, and W. Böhlmann Coexistence of melted and ferroelectric states in sodium nitrite within mesoporous sieves // Phys. Rev. – 2005. – В 72. – 104105.
45. Baryshnikov S.V., Charnaya E.V., Andriyanova N.P., Stukova E.V. Phase transitions in nanometer size particles // Journal of Guangdong Non-ferrous metals. – 2005.– Vol.15. – N.2-3. – P.351.
46. Baryshnikov S.V, Cheng Tien, Charnaya E.V., Lee M.K., Michel D., Boehlmann W. and Andriyanova N. P. Superionic phase transition in AgI embedded into molecular sieves //Journal of Physics: Condensed Matter – 2008. – V.20. – No2 – P.025214-025219.
47. Tien Cheng, Charnaya E.V., Lee M.K., Baryshnikov S.V., Michel D., Böhlmann W. NMR studies of structure and ferroelectricity for Rochelle salt nanoparticles embedded in mesoporous sieves // J. Phys.: Condens. Matter. – 2008. – 20. – No 21. – 215205 (6pp).
48. Baryshnikov S. V., Cheng Tien, Charnaya E. V., Lee M. K., Michel D., Böhlmann W., Stukova E. V. Dielectric Properties of Mesoporous Sieves Filled with  $\text{NaNO}_2$  // Ferroelectrics. – 2008. – V. 363. – P.177-186.
49. Cheng Tien, Charnaya E.V., Lee M.K., Baryshnikov S.V., Michel D., Bohlmann W. Nature of the  $^{23}\text{Na}$  Spin Relaxation Increase Near the Ferroelectric Phase Transition in Bulk and Confined Sodium Nitrite // Ferroelectrics. – 2008. – V.366. – Number 1. – P.74-83.

50. Baryshnikov S.V., Charnaya E.V., Milinskiy A.Yu., Stukova E.V., Cheng Tien, Michel D. Phase transitions in  $K_{1-x}Na_xNO_3$  embedded into molecular sieves // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2009. – 21. – No 32. – 325902 (6pp).
51. Tien, Charnaya E.V., Podorozhkin D.Yu., Lee M.K., Baryshnikov S.V. Ferroelectricity and gradual melting in  $NaNO_2$  particles confined within porous alumina // *Physica status solidi (b)* . – 2009. – V.246. – Iss.10. – P.2346-2351.
52. Барышников С.В., Чарная Е.В., Милинский А.Ю., Стукова Е.В., Cheng Tien, Michel D. Диэлектрические свойства кристаллических бинарных смесей  $KNO_3$ - $AgNO_3$  в нанопористых силикатных матрицах // *ФТТ.* – 2010. – Т. 52. – №2. – С. 365-369.
53. Milinskiy A.Yu., Baryshnikov S.V., Charnaya E.V., Michel D. Phase transitions in  $(KNO_3)_{1-x}(NaNO_2)_x$  embedded into molecular sieves // *Rare Metals.* – 2009. – V. 28. – Spec. iss. – P.593-596.
54. Аврамов П.В., Якобсон Б.И., Scuseria G.E. Влияние дефектов углеродной сетки на электронную структуру полупроводниковых углеродных нанотрубок // *ФТТ.* – 2004. – Т.46. – Вып.6. – С.1132-1136. - Библиогр.: 16 назв.
55. Гуляев Ю.В., Сеницын Н.И., Торгашов Г.В. и др. Автоэлектронная эмиссия с углеродных нанотрубных и нанокластерных пленок // *Радиотехника и электроника.* – 2003. – Т.48. – N 11. – С.1399-1406. - Библиогр.: 42 назв.
56. Караева А.Р., Пешнев Б.В., Эстрин Р.И. и др. Адсорбционные свойства материалов, полученных на основе углеродных нановолокон // *Химия твердого топлива.* – 2004. – N 2. – С.27-34. – Библиогр.: 12 назв.
57. Михайлов А.А., Краснов А.А., Дюрягин Б.С., Гайдомако И.М. Ажурные композиционные волокнистые материалы с наноструктурными элементами // *Конструкции из композиционных материалов.* – 2003. – N 3. – С.29-39. – Библиогр.: 20 назв.

58. Александровский С.В., Донг Вон Ли. Новые способы синтеза наноструктурных тугоплавких соединений на основе титана // Цветные металлы. – 2005. – N 9. – С.57-62. – Библиогр.: 17 назв.
59. Алексеев Н.И. О механизме образования углеродных нанотрубок. I. Термодинамика образования капель расплава углерода в металлическом катализаторе // ЖТФ. – 2004. – Т.74. – вып.8. – С.45-50. – Библиогр.: 20 назв.
60. Алексеев Н.И. О механизме образования углеродных нанотрубок. II. Кинетика взрывной конденсации капель расплава углерода в металлическом катализаторе // ЖТФ. – 2004. – Т.74. – вып.8. – С.51-57. – Библиогр.: 6 назв.
61. Алексеева О.К., Нечаев Ю.С. Перспективы использования новых углеродных наноматериалов для автомобильного транспорта на водороде // Новые функциональные материалы и экология: Матер. науч.-практ. конф. материаловедч. обществ России, Звенигород, 26-29 нояб. 2002 г. – М., 2002. – С.77-78. – Библиогр.: 5 назв.
62. Алехин А.П. Структурная организация вещества на поверхности - путь в нанотехнологию // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – N 5-6. – С.118-122. – Библиогр.: 12 назв.
63. Алиев А.Э., Фридман А.А., Хабибуллаев П.К. Электропроводность бумаги на основе одностенных и многостенных углеродных нанотрубок // Радиотехника и магнетита // Неорг. Материалы. – 2004. – Т.40. – N 5. – С.593-599. – Библиогр.: 16 назв.
64. Алымов М.И., Тихомиров С.А. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов // Приборы. – 2005. – N 5(59). – С.36-40. – Библиогр.: 30 назв.
65. Гайслер С.В., Семенова О.И., Шарафутдинов Р.Г., Колесов Б.А. Анализ рамановских спектров аморфно-нанокристаллических пленок кремния // ФТТ. – 2004. – Т.46. – Вып.8. – С.1484-1488. – Библиогр.: 11 назв.

66. Андреев А.А., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Свойства, применение и особенности получения наноструктурных покрытий методами физического осаждения вещества в вакууме // Вестн. Машиностроения. – 2005. – N 9. – С.38-42. – Библиогр.: 15 назв.
67. Андриевский Р.А. Наноматериалы: Концепция и современные проблемы // Рос. хим. журнал. – 2002. – Т.46. – N 5. – С.50-56. – Библиогр.: 68 назв.
68. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы - состояние разработок и перспективы // Перспективные материалы. – 2001. – N 6. – С.5-11. – Библиогр.: 54 назв.
69. Андриевский Р.А. Направления современных исследований в области наночастиц // Порошковая металлургия. – 2003. – N 11/12(434). – С.96-101. – Библиогр.: 59 назв.
70. Андриевский Р.А. Термическая стабильность наноматериалов // Успехи химии. – 2002. – Т.71. – N 10. – С.967-981. – Библиогр.: 152 назв.
71. Антоненко С.В., Мальцев С.Н. Получение углеродных нанотрубок методом магнетронного распыления на постоянном токе // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – N 3. – С.150-152. – Библиогр.: 5 назв.
72. Аристов В.В. Исследования в области физики и технологии нанoeлектроники в ИПТМ РАН // Успехи соврем. радиоэлектроники. – 2004. – N 5-6. – С.129-132.
73. Аронин А.С., Абросимова Г.Е. Нанокристаллические металлические материалы // Наука – производству. – 2004. – N 12(80). – С.7-12. – Библиогр.: 22 назв.
74. Асеев А.Л. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника, 2005. – N 3. – С.2-11. – Библиогр.: 6 назв.
75. Гришин М.В., Далидчик Ф.И., Ковалевский С.А., Ковытин А.В. Атомное и электронное строение поверхностных наномасштабных структур графита // Хим. физика. – 2004. – Т.23. – N 7. – С.83-90. – Библиогр.: 14 назв.

76. Афонин С.М. Коррекция характеристик импульсных систем управления пьезодвигателями нано- и микроперемещений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – N 3. – С.27-32. – Библиогр.: 8 назв.
77. Афонин С.М. Особенности динамических и статических свойств системы автоматического управления пьезодвигателем наноперемещений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2000. – N 6. – С.29-31. – Библиогр.: 4 назв.
78. Баранский П.И., Венгер Е.Ф., Гайдар А.В. Специфика электронного транспорта в полупроводниковых наноструктурах // Перспективные материалы. – 2004. – N 2. – С.5-14. – Библиогр.: 47 назв.
79. Бачурин Д.В., Назаров А.А. Релаксация неравновесной структуры границ зерен в нанокристаллах // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т.97, N 2. – С.17-20. – Библиогр.: 17 назв.
80. Белоглазов И.Н., Сырков А.Г. Наноструктурированные металлы и материалы: актуальность проблематики и перспективность исследований // Цветные металлы. – 2005. – N 9. – С.4-5. – Библиогр.: 11 назв.
81. Белоненко М.Б., Лебедев Н.Г., Демушкина Е.В. Нелинейные волны в углеродных нанотрубках в условиях электрон-фононной связи // Изв. вузов. Физика. – 2005. – Т.48. – N 6. – С.76-81. – Библиогр.: 6 назв.
82. Бобков С.Г., Лунин Ю.Н. Способы снижения тока записи наноразмерных ячеек памяти MRAM // Электроника, микро- и наноэлектроника: Сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2001. – С.140-144. – Библиогр.: 3 назв.
83. Бобович Я.С. Нанофизика диэлектрических сред и ее место в оптоэлектронике. Ч.1 // Оптич. журнал. – 2001. – Т.68. – N 1. – С.6-17. – Библиогр.: 80 назв.
84. Бобринецкий И.И., Неволин В.К. Микромеханика углеродных нанотрубок на подложках // Микросистемная техника. – 2002. – N 4. – С.20-21. – Библиогр.: 4 назв.

85. Бобринецкий И.И., Неволин В.К., Строганов А.А. "Засвечивание" углеродных нанотрубок в атомно-силовом микроскопе // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – N 3. – С.83-85. – Библиогр.: 5 назв.
86. Бобринецкий И.И., Неволин В.К., Чаплыгин Ю.А. Логические ключи на основе пучков однослойных углеродных нанотрубок // Микросистемная техника. – 2004. – N 7. – С.12-14. – Библиогр.: 10 назв.
87. Богатиков О.А. Неорганические наночастицы в природе // Вестн. РАН. – 2003. – Т.73. – N 5. – С.426-428.
88. Божевольнов В.Б., Яфясов А.М., Коноров П.П. Эффекты самоорганизации при формировании твердофазных наноструктур на поверхности CdHgTe-материалов // Физ. мысль России. – 2003. – N 1. – С.6-13. – Библиогр.: 19 назв.
89. Борисенко В.Е. Нанoeлектроника - основа информационных систем XXI века // Сорос. образоват. журнал. – 1997. – Т.3. – N 5. – С.100-104.
90. Бречко Т. Упругие поля дефектов кристаллических и нанокристаллических структур // Изв. АН. Сер. физ. – 2003. – Т.67. – N 6. – С.830-835. – Библиогр.: 10 назв.
91. Брудный В.Н., Гриняев С.Н. Кремний-германиевые наноструктуры: электронные параметры и оптические характеристики // Изв. вузов. Физика. – 2004. – Т.47. – N 6. – С.3-7. – Библиогр.: 6 назв.
92. Бубнов Ю.З., Шилова О.А. Наноразмерные стекловидные пленки многофункционального назначения в технологии изготовления полупроводниковых газовых сенсоров // Технологии приборостроения. – 2003. – N 3(7). – С.60-71. – Библиогр.: 28 назв.
93. Булашевич К.А., Роткин В.В. Приборы на нанотрубках: микроскопическая модель // Письма в ЖЭТФ. – 2002. – Т.75. – вып.4. – С.239-244. – Библиогр.: 8 назв.
94. Бухина М.Ф., Зорина Н.М., Морозов Ю.Л. Частично закристаллизованный эластомер как модель нанокompозита // Ижн.-физ. журн. – 2005. – Т.78. – N 5. – С.19-23. – Библиогр.: 15 назв.

95. Быков В.А., Рябоконт В.Н. Инструменты нанотехнологии: состояние и перспективы развития // Успехи совр. радиоэлектроники. – 2004. – N 5-6. – С.123-128. – Библиогр.: 11 назв.
96. Быков Ю.А., Карпухин С.Д., Чепцов В.О. Твердость нанопленочных покрытий золота на подложках из Nb, Ni, Fe и W // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – N 6. – С.19-22. – Библиогр.: 5 назв.
97. Бычков К.С. Считывающие устройства для ЗУ на основе наноразмерных ячеек памяти // Электроника, микро- и наноэлектроника: Сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2001. – С.152-155. – Библиогр.: 5 назв.
98. Валиев К.А., Орликовский А.А. От микро- и наноэлектроники к твердотельным квантовым компьютерам // Успехи совр. радиоэлектроники. – 2004. – N 5-6. – С.106-117. – Библиогр.: 11 назв.
99. Ванадий-оксидные нанотрубки / Волков В.Л., Захарова Г.С., Волкова Е.Г. и др. // Материаловедение. – 2005. – N 1(94). – С.40-45. – Библиогр.: 15 назв.
100. Ванифатова Н.Г., Спиваков Б.Я. Разделение наночастиц методом капиллярного зонного электрофореза // Рос. хим. журнал. – 2005. – Т.49. – N 2. – С.16-21. – Библиогр.: 47 назв.
101. Введенский С., Захарченко А., Троицкий В. Измерение субмикронных размеров. Оптический микроскоп с некогерентным освещением // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. – N 1. – С.59-61. – Библиогр.: 3 назв.
102. Велихов Е.П. Наноэлектронные приборы и технологические процессы // Вестн. РАН. – 2003. – Т.73. – N 5. – С.395-399. – Библиогр.: 14 назв.
103. Венгер О.В., Жмурин А.В., Рыбин Д.А. Изменение маршрута проектирования БИС при переходе к нанотехнологиям // Информ. технологии. Приложение. – 2005. – N 5. – С.2-4. – Библиогр.: 8 назв.

104. Валах М.Я., Джаган В.Н., Красильник З.Ф. и др. Взаимосвязь энергии наностроек SiGe с их формой и размерами // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.1. – С.70-73. – Библиогр.: 6 назв.
105. Витязь П.А., Голубцова Е.С., Гречихин Л.И. Нанокерамические конструкционные материалы. Свойства и физика их формирования // Физ. мезомеханика. – 2004. – Т.7, N 5. – С.89-94. – Библиогр.: 8 назв.
106. Витязь П.А., Гречихин Л.И. Нанотехнология получения металлокерамики на основе титана // Физ. мезомеханика. – 2004. – Т.7, N 5. – С.81-87. – Библиогр.: 8 назв.
107. Влияние атомного состава оксидных наноконпозитов на основе SnO<sub>2</sub> на их структуру / Рембеза Е.С., Рембеза С.И., Домашевская Э.П. и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – N 7. – С.25-28. – Библиогр.: 5 назв.
108. Влияние полимеров на образование и сохранение высокотемпературных фаз в наночастицах диоксида циркония / Петрунин В.Ф., Попов В.В., Чжу Хунчжи и др. // Инж. физика. – 2003. – N 5. – С.59-61. – Библиогр.: 16 назв.
109. Влияние размера зерна на плотность объемных нанокристаллических материалов / Алымов М.И., Анкудинов А.Б., Агафонов К.Н. и др. // Металлы. – 2005. – N 3. – С.95-97. – Библиогр.: 18 назв.
110. Варюхин В.Н., Спусканюк В.З., Матросов Н.И. и др. Влияние размерного эффекта на особенности деформационного упрочнения в наноконпозите // Физика и техника высоких давлений. – 2001. – Т.11, N 3. – С.7-15. - Библиогр.: 15 назв.
111. Войтович А.П., Гончарова О.В., Калинов В.С. Развитая поверхность - фактор формирования отличительных свойств наноразмерных сред // Журн. прикл. спектроскопии. – 2005. – Т.72, N 3. – С.287-291. – Библиогр.: 18 назв.

112. Волков Ю.П., Байбурин В.Б., Коннов Н.П. Формирование кремниевых сферических наночастиц в расплавленном алюминии // ЖТФ. – 2004. – Т.74, вып.3. – С.78-80. – Библиогр.: 6 назв.
113. Вольдман Г.М., Малочкин О.В., Панов В.С. Закономерности спекания нанометрических порошков стабилизированного диоксида циркония // Цветные металлы. – 2004. – N 5. – С.64-66. – Библиогр.: 10 назв.
114. Бобринецкий И.И., Неволин В.К., Петрик В.И., Чаплыгин Ю.А. Вольт-амперные характеристики двухэлектродных элементов с углеродными нанотрубками // Микроэлектроника. – 2003. – Т.32, N 2. – С.102-104. – Библиогр.: 4 назв.
115. Гапоненко С.В. Оптические процессы в полупроводниковых нанокристаллитах (квантовых точках) // ФТП. – 1996. – Т.30, N 4. – С.577-619.
116. Гапонов С.В. Литография на длине волны 13 нм // Вестн. РАН. – 2003. – Т.73, N 5. – С.392-394.
117. Гапонов С.В. Экстремальная ультрафиолетовая литография - будущее нанoeлектроники // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – N 2. – С.2-4. – Библиогр.: 1 назв.
118. Гафнер Ю.Я., Гафнер С.Л., Энтель П. Наночастицы Ni из газовой среды: возникновение и структура // Физика металлов и металловедение. – 2005. – Т.100, N 1. – С.71-76. – Библиогр.: 20 назв.
119. Головань Л.А., Кашкаров П.К., Тимошенко В.Ю., Желтиков А.М. Генерация оптических гармоник в наноструктурах пористых полупроводников // Вестн. МГУ. Сер.3. Физика. Астрономия. – 2005. – N 2. – С.31-40. – Библиогр.: 32 назв.
120. Глухова О.Е., Жбанов А.И., Терентьев О.А. Теоретическое изучение упругих свойств однослойных углеродных нанотрубок // Вопр. прикл. физики. – 2002. – Вып.8. – С.39-41. – Библиогр.: 13 назв.
121. Головин Ю.И., Иволгин В.И., Рябко Р.И. Вязко-упругое восстановление различных материалов в области динамического наноконтакта // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30, вып.5. – С.64-69. – Библиогр.: 10 назв.

122. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Микро- и наноконтактное взаимодействие твердых тел // Природа. – 2003. – N 4. – С.60-68. – Библиогр.: 16 назв.
123. Голубок А.О., Платунов А.Е., Сапожников И.Д. Система управления сканирующим зондовым микроскопом // Науч. приборостроение. – 2003 – Т.13, N 3. – С.25-31. – Библиогр.: 6 назв.
124. Гончаров В.К., Петров С.А., Пузырев М.В. Формирование наноструктуры на поверхности пленки, осажденной из лазерно-эрозионной плазмы в вакууме // Инженерно-физ. журнал. – 2004. – Т.77, N 4. – С.83-85. – Библиогр.: 10 назв.
125. Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Об изменчивости упругих свойств многослойных углеродных нанотрубок // Письма в ЖТФ. – 2005. – Вып.1. – С.35-41. – Библиогр.: 7 назв.
126. Григорьев Е.И., Завьялов С.А., Чвалун С.Н. Поверхностные состояния на границе наночастица - полимерная матрица // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30, вып.8. – С.40-45. – Библиогр.: 22 назв.
127. Григорьева Л.Д. Кристаллогеометрическое описание морфологических особенностей и определение угла хиральности углеродных нанотрубок // Докл. АН. – 2004. – Т.396, N 1. – С.35-40. – Библиогр.: 5 назв.
128. Гузь И.А., Рущицкий Я.Я. Теоретическое описание одного механизма расслоения в волокнистых микро- и нанокомпозитах // Прикл. механика. – 2004. – Т.40, N 10. – С.78-87. – Библиогр.: 15 назв.
129. Гуляев А.М. От микроэлектроники к наноэлектронике. Проблема фликкер-шума // Вестн. МЭИ. – 2003. – N 4. – С.100-104. – Библиогр.: 29 назв.
130. Гуляев Ю.В. Углеродные нанотрубные структуры - новый материал для эмиссионной электроники // Вестн. РАН. – 2003. – Т.73, N 5. – С.289-291. – Библиогр.: 6 назв.
131. Гуткин М.Ю., Овидько И.А. Предел текучести и пластическая деформация нанокристаллических материалов // Успехи механики. – 2003. – Т.2, N 1. – С.68-125. – Библиогр.: 199 назв.

132. Далидчик Ф.И., Гришин М.В., Ковалевский С.А. Особенности электронного строения взаимодействующих нанокуглеродных частиц // Микросистемная техника. – 2004. – N 5. – С.29-33. – Библиогр.: 21 назв.
133. Даниленко В.В. Фазовая диаграмма нанокуглерода // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т.41, N 4. – С.110-116. – Библиогр.: 27 назв.
134. Васильев А.А., Керпелева С.Ю., Котов В.В. и др. Датчик локального силового и туннельного взаимодействий в сканирующем зондовом микроскопе // Науч. приборостроение. – 2005. – Т.15, N 1. – С.62-69. – Библиогр.: 13 назв.
135. Дедков Г.В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // УФН. – 2000. – Т.170, N 6. – С.585-618. – Библиогр.: 121 назв.
136. Дедков Г.В., Дедкова Е.Г. Тепловой нагрев и диссипативные потери механической энергии зонда сканирующего микроскопа в динамическом контакте с поверхностью // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30, вып.6. – С.52-61. – Библиогр.: 8 назв.
137. Дедков Г.В., Кясов А.А. Новые аспекты флуктуационно-электромагнитного взаимодействия движущихся нанозондов с поверхностью // Микросистемная техника. – 2004. – N 9. – С.16-21. – Библиогр.: 14 назв.
138. Дедков Г.В., Кясов А.А., Дедкова Е.Г. О бесконтактном трении и теплообмене в наноструктурах // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – N 6. – С.2-8. – Библиогр.: 19 назв.
139. Денисюк И.Ю., Каманина Н.В. Электростатическое осаждение тонких слоев наночастиц органического полупроводника и полупроводниковые структуры на их основе // Оптический журнал. – 2004. – Т.71, N 3. – С.89-92. – Библиогр.: 6 назв.
140. Деспотули А.Л., Андреева А.В. Создание новых типов тонкопленочных твердоэлектролитных суперконденсаторов для микросистемной

- техники и микро(нано)электроники. Ч.1 // Микросистемная техника. – 2003. – N 11. – С.2-10. – Библиогр.: 56 назв.
141. Деспотули А.Л., Андреева А.В. Создание новых типов тонкопленочных твердоэлектrolитных суперконденсаторов для микросистемной техники и микро(нано)электроники. Ч.2 // Микросистемная техника. – 2003. – N 12. – С.2-6. – Библиогр.: 56 назв.
142. Деспотули А.Л., Андреева А.В., Рамбабу Б. Наноионика суперионных проводников - основа создания новых приборов для МСТ // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – N 2. – С.5-13. – Библиогр.: 62 назв.
143. Дрозд В.Е. Молекулярное наслаивание - инструмент наноинженерии // Химия твердого тела. Химические проблемы создания новых материалов: Сб. ст. к 25-летию каф. химии твердого тела хим. ф-та СПбГУ. – СПб.: СПбГУ, 2003. – С.251-275. – Библиогр.: 26 назв.
144. Евдокимов Ю. Нуклеиновые кислоты, жидкие кристаллы и секреты наноконструирования // Наука и жизнь. – 2005. – N 4. – С.18-24.
145. Евдокимов Ю.М. Наноконструирование и двухцепочечные молекулы нуклеиновых кислот // Наука и технологии в промышленности. – 2005. – N 1. – С.13-17.
146. Евлюхин А.Б., Герке М.Н., Евлюхина Е.В. Теоретическая модель зондового излучения в ближнеполевой оптической микроскопии однослойной наноструктуры // Микросистемная техника. – 2004. – N 5. – С.13-19. – Библиогр.: 10 назв.
147. Егорова Е.М. Наночастицы металлов в растворах. Биохимический синтез и применение // Нанотехника. – 2004. – N 1. – С.15-26. – Библиогр.: 46 назв.
148. Ежовский Ю.К. Химическая сборка поверхностных наноструктур // Хим. физика. – 2005. – Т.24, N 4. – С.36-57. – Библиогр.: 64 назв.
149. Елецкий А.В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур // УФН. – 2004. – Т.174, N 11. – С.1191-1231. – Библиогр.: 173 назв.

150. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки // УФН. – 1997. – Т.167, N 9. – С.945-972.
151. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. – 2002. – Т.172, N 4. – С.401-438. – Библиогр.: 164 назв.
152. Ершов Б.Г. Формирование наночастиц металлов в водных растворах: атомы и кластеры, быстропротекающие реакции нуклеации // Микро-системная техника. – 2003. – N 12. – С.31-41. – Библиогр.: 40 назв.
153. Естественные длиннопериодические наноструктуры / Потеекаев А.И., Наумов И.И., Кулагина В.В. и др. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 260 с. – Библиогр.: с.231-256.
154. Жуков В.А. Теория вакуумного нанотриода. Ч.І: Объяснение эксперимента // Микроэлектроника. – 2005. – Т.34, N 2. – С.129-137. – Библиогр.: 10 назв.
155. Жуков В.А. Теория вакуумного нанотриода. Ч.ІІ: Возможность режима с отрицательной дифференциальной проводимостью // Микроэлектроника. – 2005. – Т.34, N 4. – С.266-273. – Библиогр.: 12 назв.
156. Запороцкова И.В., Лебедев Н.Г., Чернозатонский Л.А. Электронное строение углеродных нанотрубок, модифицированных атомами щелочных металлов // ФТТ. – 2004. – Т.46, вып.6. – С.1137-1142. – Библиогр.: 30 назв.
157. Звездин К.А., Хвальковский А.В. Магнитосопротивление плоского наномостика // ЖТФ. – 2004. – Т.74, вып.3. – С.37-43. – Библиогр.: 18 назв.
158. Звездин К.А., Хвальковский А.В. Магнитосопротивление плоского наномостика // ЖТФ. – 2004. – Т.74, вып.3. – С.37-43. – Библиогр.: 18 назв.
159. Звездин К.А., Хвальковский А.В. Фазовые превращения магнитной структуры в пленочных наномостиках // ФТТ. – 2005. – Т.47, вып.6. – С.1137-1146. – Библиогр.: 19 назв.

160. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов / Колобов Ю.Р., Валиев Р.З., Грабовецкая Г.П. и др. – Новосибирск: Наука, 2001. – 232 с. – Библиогр.: 359 назв.
161. Зиатдинов А.М. Строение и свойства нанографитов и их соединений // Рос. хим. журнал. – 2004. – Т.48, N 5. – С.5-11. – Библиогр.: 37 назв.
162. Знаменский Л.Г., Крымский В.В., Кулаков Б.А. Электроимпульсные нанотехнологии в литейных процессах: Моногр. – Челябинск: ЦНТИ, 2003. – 130 с. – Библиогр.: 73 назв.
163. Иванов Ю.А., Малышев К.В., Федоркова Н.В. Нанoeлектроника на базе многослойных гетероструктур // Изв. вузов. Машиностроение. – 2003. – N 5. – С.73-78. – Библиогр.: 6 назв.
164. Иванова В.С. Нанопорошки железа низкотемпературного водородного восстановления // Металлургия машиностроения. – 2004. – N 6. – С.40-51. – Библиогр.: 10 назв.
165. Иванова Е.А., Кривцов А.М., Морозов Н.Ф. Особенности расчета изгибной жесткости нанокристаллов // Докл. АН. – 2002. – Т.385, N 4. – С.494-496. – Библиогр.: 11 назв.
166. Иванова Н.А., Бакланов А.М., Онищук А.А. Образование в газовой фазе агрегатов железа и углеродных наноструктур с включениями железа // Хим. физика. – 2005. – Т.24, N 4. – С.84-94. – Библиогр.: 52 назв.
167. Иванов-Шиц А.К., Демьянец Л.Н. Материалы ионники твердого тела: от монокристаллов до наноструктур // Кристаллография. – 2003. – Т.48, N 6 (прилож.) – С.S170-S190. – Библиогр.: 69 назв.
168. Ивин В.В., Махвиладзе Т.М., Валиев К.А. Анализ практических применений внеосевых источников в оптической нанолитографии // Микроэлектроника. – 2004. – Т.33, N 4. – С.259-272. – Библиогр.: 9 назв.
169. Изгалиев А.Т., Симакин А.В., Шафеев Г.А. Образование сплава наночастиц Au и Ag при лазерном облучении смеси их коллоидных растворов // Квантовая электроника. – 2004. – Т.34, N 1. – С.47-50. – Библиогр.: 20 назв.

170. Изготовление изделий из функциональной нанокерамики методами сухого ультразвукового и коллекторного компактирования / Хасанов О.Л., Похолков Ю.П., Двилис Э.С., Соколов В.М. // Нанотехника. – 2004. – N 1. — С.54-57. – Библиогр.: 16 назв.
171. Инновационный подход к созданию космических систем на основе нанотехнологий / Ермак С., Квасников А., Стреж С., Трошин Е. // Радиоэлектроника и управление (электроника, связь, радиотехника, человек). – 2002. – N 7-9. – С.42-48. – Библиогр.: 8 назв.
172. Интегральная эмиссионная микро- и нанoeлектроника / Гаврилов С.А., Ильичев Э.А., Полторацкий Э.А., Рычков Г.С. // Электрон. пром-сть. Наука. Технологии. Изделия. – 2004. – N 3. – С.43-49. – Библиогр.: 13 назв.
173. Исследование катодolumинесценции наноотпечатков на монокристаллах оксида магния / Назарова Т.А., Назаров М.В., Сапарин Г.В. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. – N 2. – С.58-68. – Библиогр.: 29 назв.
174. Исследование микроструктуры углеродного наноматериала, полученного на железо-никелевом катализаторе / Новакова А.А., Киселева Т.Ю., Тарасов Б.П., Мурадян В.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2004. – N 3. – С.70-73. – Библиогр.: 16 назв.
175. Исследование начальных стадий роста нанокластеров карбида кремния на подложке кремния / Трушин Ю.В., Журкин Е.Е., Сафонов К.Л. и др. // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30, вып.15. – С.48-54. - Библиогр.: 19 назв.
176. Исследование процесса получения фрактальных наноразмерных пленочных структур / Серов И.Н., Марголин В.И., Потсар Н.А. и др. // Микроэлектроника. – 2004. – Т.33, N 5. – С.325-333. – Библиогр.: 12 назв.

177. Кадочников А.И., Стародубцев Ю.Н., Малюк В.П. К расчетной интерпретации семейства динамических петель гистерезиса магнитопровода из нанокристаллической ленты // Электричество. – 2004. – N 2. – С.49-54. – Библиогр.: 15 назв.
178. Казаченко В.П. Технологические методы формирования наноразмерных полимерных покрытий в вакууме // Нанотехника. – 2004. – N 1. – С.48-54. – Библиогр.: 25 назв.
179. Календин В.В. Нанометрия: проблемы и решения // Автометрия. – 2004. – Т.40. – N 2. – С.20-36. – Библиогр.: 21 назв.
180. Бочарова Т.А., Мартынович О.В., Шкуропат И.Г., Шокин А.Н. Кантилеверы - чувствительные элементы для сканирующей зондовой микроскопии // Электрон. промышленность. – 2004. – N 3. – С.64-70.
181. Карабасов Ю.С., Аксенов А.А., Астахов М.В. Наноматериалы и нанотехнологии в МИСиС // Цветные металлы. – 2005. – N 9. – С.6-9.
182. Карагусов В.И. Нанокриогенные технологии // Микросистемная техника. – 2004. – N 10. – С.15-23. – Библиогр.: 31 назв.
183. Чесноков Н.В., Микова Н.М., Наймушина Л.В., Кузнецов Б.Н. Каталитические свойства нанокатализаторов в реакциях с участием оксида углерода // Инженер. Технолог. Рабочий. – 2004. – N 4(40). – С.20-21.
184. Стрюк А.Л., Крюков А.И., Кучмий С.Я., Походенко В.Д. Квантовые размерные эффекты в фотонике полупроводниковых наночастиц // Теорет. и эксперимент. химия. – 2005. – Т.41, N 2. – С.67-87. – Библиогр.: 347 назв.
185. Головин Ю.И., Дуб С.Н., Иволгин В.И. и др. Кинетические особенности деформации твердых тел в нано- и микрообъемах // ФТТ. – 2005. – Т.47. – вып.6. – С.961-973. – Библиогр.: 39 назв.
186. Киселев М.И. Разработка нанотехнологий в МГТУ им. Н.Э. Баумана // Конверсия в машиностроении. – 2002. – N 1(50). – С.67-70. – Библиогр.: 4 назв.

187. Кислов А.Н., Мазуренко В.Г. Особенности колебательного спектра наночастиц альфа-Fe // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т.98. – N 4. – С.22-26. – Библиогр.: 18 назв.
188. Климов В.В. Спонтанное излучение атома в присутствии нанотел // УФН. – 2003. – Т.173. – N 9. – С.1008-1013. – Библиогр.: 39 назв.
189. Коваленко Л.В., Фолманис Г.Э., Вавилов Н.С. Биологически активные нанопорошки железа // Перспективн. материалы. – 2005. – N 2. – С.39-43. – Библиогр.: 11 назв.
190. Ковальчук М.В. Органические наноматериалы, наноструктуры и нанодиагностика // Вестн. РАН. – 2003. – Т.73. – N 5. – С.405-412. – Библиогр.: 14 назв.
191. Козлов Г.И. Образование углеродной паутины при синтезе одностенных нанотрубок в струе продуктов лазерной абляции, расширяющейся в электрическом поле // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т.29. – вып.18. – С.88-94. – Библиогр.: 6 назв.
192. Козырев С.В., Лещев Д.В., Шаклеина И.В. Об энергетической стабильности нанокластеров углерода // Физика твердого тела. – 2001. – Т.43. – вып.5. – С.926-929. – Библиогр.: 3 назв.
193. Крутиков В.А., Дидик А.А., Яковлев Г.И. и др. Композиционный материал с наноармированием // Альтернативная энергетика и экология. – 2005. – N 4(24). – С.36-41. – Библиогр.: 6 назв.
194. Валах М.Я., Джаган В.Н., Литвин П.М. и др. Компонентный состав и упругие напряжения в многослойных структурах с nanoостровками Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.1. – С.88-90. – Библиогр.: 17 назв.
195. Астраханцев Ю.Г., Корзунин Г.С., Лаврентьев А.Г. и др. Контроль качества сердечников из нанокристаллических сплавов, предназначенных для первичных преобразователей скважинного магнитометра – инклинометра // Дефектоскопия. – 2004. – N 4. – С.60-66. – Библиогр.: 7 назв.

196. Королева М.Ю., Юртов Е.В. Использование наноматериалов при переработке и захоронении отработавшего ядерного топлива // Хим. технология. – 2005. – N 5. – С.30-35. – Библиогр.: 24 назв.
197. Королева М.Ю., Юртов Е.В. Наноматериалы для ядерного топливного цикла // Хим. технология. – 2005. – N 4. – С.15-21. – Библиогр.: 19 назв.
198. Королева М.Ю., Юртов Е.В. Наноматериалы из карбида кремния для ядерных реакторов // Хим. технология. – 2005. – N 6. – С.33-39. – Библиогр.: 24 назв.
199. Косаковская З.Я., Чабан И.А. Электроперенос в пленках из ориентированных углеродных нанотрубок // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т.50. – N 9. – С.1148-1159. – Библиогр.: 26 назв.
200. Котенев В.А. Методы мультиплексной спектроскопии в исследовании многослойных наноструктур // Микроэлектроника. – 2004. – Т.33. – N 6. – С.433-444. – Библиогр.: 28 назв.
201. Котенев В.А. Нанотомография. Эллипсометрическая спектротомография поверхностных наноструктур металл - оксид // Защита металлов. – 2003. – Т.39. – N 4. – С.437-448. – Библиогр.: 37 назв.
202. Кошкин В.М., Слезов В.В. Легирование наночастиц // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30. – вып.9. – С.38-43. – Библиогр.: 9 назв.
203. Красинькова М.В., Паугурт А.П. О механизме образования фуллеренов и углеродных нанотрубок // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.31. – вып.8. – С.6-11. – Библиогр.: 12 назв.
204. Крестинин А.В. Однослойные углеродные нанотрубки: механизм образования и перспективы технологии производства на основе электродугового процесса // Рос. хим. журнал. – 2004. – Т.48. – N 5. – С.21-27. – Библиогр.: 19 назв.
205. Кривцов А.М., Морозов Н.Ф. Аномалии механических характеристик наноразмерных объектов // Доклады АН. – 2001. – Т.381. – N 3. – С.345-347. – Библиогр.: 7 назв.

206. Крушенко Г.Г. Применение нанопорошков химических соединений для улучшения качества металлоизделий // Технология машиностроения. – 2002. – N 3(15). – С.3-6.
207. Кузин А.Ю., Марютин В.Н., Календин В.В. Методы и средства измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне // Микросистемн. техника. – 2001. – N 4. – С.9-19. – Библиогр.: 41 назв.
208. Кулясова О.Б., Исламгалиев Р.К. Валиев Р.З. Об особенностях механических испытаний малых образцов из наноструктурных материалов // Физика металлов и металловедение. – 2005. – Т.100. – N 3. – С.83-90. – Библиогр.: 18 назв.
209. Курганский С.И., Борщ Н.А. Геометрическая и электронная структура кремниевых и кремниевометаллических наночастиц // Изв. АН. Сер. физич. – 2004. – Т.68, N 7. – С.1023-1025. – Библиогр.: 5 назв.
210. Левина В.В. Наноразмерные материалы и возможности их использования // Приборы. - 2005. - N 7(61). - С.30-35. - Библиогр.: 9 назв.
211. Лозовик Ю.Е., Попов А.М. Образование и рост углеродных наноструктур - фуллеренов, наночастиц нанотрубок и конусов // УФН. – 1997. – Т.167. – N 7. – С.751-774. – Библиогр.: 223 назв.
212. Лускинович П.Н., Иванов П.В., Волкова И.В. Нанотехнологии XXI века: Аналит. обзор. – М.: ВНТИЦ, 2001. – 20 с.
213. Лучинин В.В. Введение в индустрию наносистем // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – N 5. – С.2-8. – Библиогр.: 7 назв.
214. Любченко В.Е., Митягин А.Ю., Поморцев Л.А. Алмаз – перспективный материал для наноэлектроники // Инж. физика. – 2003. – N 5. – С.51-58. – Библиогр.: 24 назв.
215. Лякишев Н.П. Нанокристаллические структуры - новое направление развития конструкционных материалов // Вестн. РАН. – 2003. – Т.73. – N 5. – С.422-425. – Библиогр.: 14 назв.

216. Гуцин В.С., Ганьшина Е.А., Козлов А.А., Быков И.В. Магниторефрактивный эффект в нанокompозитах // Вестн. МГУ. Сер.3. Физика. Астрономия. – 2005. – N 1. – С.45-58. – Библиогр.: 35 назв.
217. Магомедов М.Н. О поверхностной энергии нанокристалла / Журн. физ. химии. - 2005. - Т.79, N 5. - С.829-838. - Библиогр.: 37 назв.
218. Магомедов М.Н. О поверхностном давлении для ограниченного нанокристалла // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.31. – вып.1. – С.24-34. – Библиогр.: 18 назв.
219. Магомедов М.Н. О постоянстве поверхностной энергии при плавлении нанокристалла // Теплофизика высоких температур. – 2004. – Т.42. – N 2. – С.227-235. – Библиогр.: 30 назв.
220. Макаров А.В., Коршунов Л.Г. Прочность и износостойкость нанокристаллических структур поверхностей трения сталей с мартенситной основой // Изв. вузов. Физика. – 2004. – Т.47. – N 8. – С.65-80. – Библиогр.: 32 назв.
221. Макарова Т.Л. Магнитные свойства углеродных структур (Обзор) // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т.38. – вып.6. – С.641-664. – Библиогр.: 134 назв.
222. Макеева Е.А., Румянцева М.Н., Гаськов А.М. Кинетика взаимодействия толстых пленок нанокристаллического SnO<sub>2</sub> с кислородом // Неорганич. материалы. – 2004. – Т.40. – N 2. – С.205-209. – Библиогр.: 17 назв.
223. Максименко С.А., Слепян Г.Я. Электродинамика углеродных нанотрубок // Радиотехника и электроника. – 2002. – Т.47. – N 3. – С.261-280. – Библиогр.: 86 назв.
224. Макушин М. Становление многорукого Бога. Обзор финансирования работ по нанотехнологии // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2003. – N 4(46). – С.70-74.

225. Малиновская Т.Д., Сачков В.И. Удельная теплоемкость нанокристаллических веществ // Изв. вузов. Физика. – 2003. – Т.46. – N 12. – С.84-86. – Библиогр.: 4 назв.
226. Записс К.В., Джумалиев А.С., Ушаков Н.М., Кособудский И.Д. Медьсодержащие нанокompозиты. Синтез и исследование состава // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30. – вып.11. – С.89-94. – Библиогр.: 14 назв.
227. Мелькер А.И., Корнилов Д.А. Молекулярно-динамическое исследование разрушения однослойных углеродных нанотрубок при растяжении // ФТТ. – 2005. – Т.47. – вып.6. – С.979-985. – Библиогр.: 10 назв.
228. Меретуков М.А. Кластеры в нанохимии и нанометаллургии (аналитический обзор) // Цветные металлы. – 2005. – N 9. – С.19-24. – Библиогр.: 24 назв.
229. Меретуков М.А. Кластеры золота // Цветные металлы. – 2005. – N 9. – С.24-29. – Библиогр.: 23 назв.
230. Меретуков М.А. Синтез и применение наноструктур золота // Цветные металлы. – 2005. – N 4. – С.78-83. – Библиогр.: 20 назв.
231. Метод механохимического синтеза для создания нанокристаллических Nb-Al сплавов / Портной В.К., Третьяков К.В., Логачева А.И. и др. // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т.97, N 2. – С.79-84. – Библиогр.: 12 назв.
232. Метрологическое обеспечение измерений в нанотехнологии / Горнев Е.С., Календин В.В., Новиков Ю.А. и др. // Изв. вузов. Матер. электрон. техники. – 2004. – N 2. – С.55-59. – Библиогр.: 4 назв.
233. Минкин В.И. Молекулярная электроника на пороге нового тысячелетия // Рос. хим. журнал. – 2000. – Т.44, N 6. – С.3-13. – Библиогр.: 50 назв.
234. Митин А.В., Шайдаров К.Я. Магнитные нанокристаллические металлические сплавы // Электротехника. – 2004. – N 4. – С.55-58. – Библиогр.: 9 назв.

235. Михеева О.П., Сидоров А.И. Ограничение излучения видимого и ближнего ИК диапазонов наночастицами фторида кальция // Оптический журнал. – 2003. – Т.70, N 12. – С.91-93. – Библиогр.: 10 назв.
236. Михеева О.П., Сидоров А.И. Оптическое ограничение 10–микронного излучения наночастицами хлорида серебра // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30. – вып.6. – С.16-19. – Библиогр.: 4 назв.
237. Модель регулярной наноструктуры / Демиденко В.С., Жоровков М.Ф., Зайцев Н.Л., Нечаев И.А. // Изв. вузов. Физ. – 2003. – Т.46. – N 8. – С.74-83. – Библиогр.: 11 назв.
238. Модель электронного строения нанокристаллического водорода / Демиденко В.С., Зайцев И.Л., Нявро А.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2004. – Т.47, N 5. – С.95-96. – Библиогр.: 8 назв.
239. Мокеров В.Г. Гетероструктурная СВЧ электроника – новые перспективы нанoeлектроники // Микросистемная техника. – 2004. – N 10. – С.13-15. – Библиогр.: 2 назв.
240. Морозов А.И., Сигов А.С. Новый тип доменных стенок – доменные стенки, порождаемые фрустрациями в многослойных магнитных наноструктурах (Обзор) // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.3. – С.385-400. – Библиогр.: 38 назв.
241. Морфология пиролитических углеродных нанотрубок с малым числом слоев / Раков Э.Г., Гришин Д.А., Гаврилов Ю.В. и др. // Журн. физ. химии. – 2004. – Т.78, N 12. – С.2222-2227. – Библиогр.: 21 назв.
242. Москаленко А.С., Яссиевич И.Н. Экситоны в нанокристаллах Si // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.8. – С.1465-1475. – Библиогр.: 50 назв.
243. Мулюков Р.Р., Юмагузин Ю.М. Работа выхода электронов из нанокристаллического вольфрама // Докл. АН. – 2004. – Т.399. – N 6. – С.760-761. – Библиогр.: 9 назв.
244. Наблюдение эффекта оптического выпрямления в наноуглеродных пленках / Михеев Г.М., Зонов Р.Г., Образцов А.Н., Свирко Ю.П. //

- Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30. – вып.17. – С.88-94. – Библиогр.: 10 назв.
245. Наноконпозиты аморфных металлических сплавов в диэлектрической матрице / Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В. Пономаренко А.Т. // Инж. физика. – 2003. – N 5. – С.44-50. – Библиогр.: 24 назв.
246. Наноконпозиты: исследования, производство и применение / Под ред. А.А.Берлина, И.Г.Ассовского. – М.: Торус Пресс, 2004. – 224 с.
247. Наноматериалы и нанотехнологии / Алферов Ж.И., Асеев А.Л., Гапонов С.В. и др. // Микросистемная техника. – 2003. – N 8. – С.3-13.
248. Нанометаллизация ультрадисперсного политетрафторэтилена / Губин С.П., Коробов М.С., Юрков Г.Ю. и др. // Докл. АН. – 2003. – Т.388. – N 4. – С.493-496. – Библиогр.: 12 назв.
249. Наноструктурированные пленки AlN и ZnO в электронной технике / Белянин А.Ф., Самойлович М.И., Ковальский К.А. и др. // Наука и технологии в промышленности. – 2005. – N 2. – С.46-57. – Библиогр.: 14 назв.
250. Наноструктурные композиты аморфных металлических сплавов в диэлектрической матрице / Калинин Ю.Е., Пономаренко А.Т., Ситников А.В., Стогней О.В. // Перспективные материалы. – 2004. – N 4. – С.5-11. – Библиогр.: 20 назв.
251. Наноструктурные материалы: получение и свойства: Матер. семинара "Наноструктурные материалы – 2000: Беларусь – Россия", Минск, Беларусь, 30-31 мая 2000 г. – Минск, 2000. – 168 с.
252. Наноструктурные углеродные материалы в тонкопленочной технологии / Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Житковский В.Д., Багдасарян А.С. // Инж. физика. – 2004. – N 1. – С.33-39. – Библиогр.: 25 назв.
253. Наносфероиды золота / Палажченко В.И., Моисеенко В.Г., Лосева О.В., Мудровский Е.А. // Докл. АН. – 2003. – Т.390. – N 6. – С.818-821. – Библиогр.: 6 назв.

254. Нанотрубки оксидов титана и ванадия: синтез и моделирование / Захарова Г.С. Еняшин А.Н., Ивановская В.В. и др. // Инж. физика. – 2003. – N 5. – С.19-41. – Библиогр.: 199 назв.
255. Неволин В.К. Новости нанотехнологий // Микросистемн. техника. – 2002. – N 2. – С.44-45.
256. Неволин В.К. Прогресс в области создания дискретной элементной базы нанoeлектроники // Изв. вузов. Электроника. – 2001. – N 5. – С.13-14. – Библиогр.: 5 назв.
257. Нелинейно-оптические нанокomпозиты на основе оксидных стекол / Сигаев В.Н., Саркисов П.Д., Сухов С.С. // Стекло и керамика. – 2003 – N 10. – С.3-6. – Библиогр.: 14 назв.
258. Нелинейный оптический отклик наночастиц серебра и меди в ближнем ультрафиолетовом спектральном диапазоне / Ганеев Р.А., Ряснянский А.И., Степанов А.Л., Усманов Т. // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.2. – С.341-346. – Библиогр.: 24 назв.
259. Новые возможности нанолитографии зондом атомно-силового микроскопа / Щеглов Д.В., Родякина Е.Е., Латышев А.В., Асеев А.Л. // Микросистемная техника. – 2004. – N 9. – С.8-15. – Библиогр.: 51 назв.
260. Новый наноматериал: металлсодержащий политетрафторэтилен / Коробов М.С., Юрков Г.Ю., Козинкин А.В. и др. // Неорг. материалы. – 2004. – Т.40. – N 1. – С.31-40. – Библиогр.: 19 назв.
261. О применение полимерных нанокomпозитов в качестве болометров / Варфоломеев А.Е., Волков А.В., Зарецкий Д.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30.– вып.16. – С.1-6. – Библиогр.: 7 назв.
262. Образование высокотемпературных фаз в наночастицах диоксида циркония / Петрунин В.Ф., Попов В.В., Чжу Хунчжи, Тимофеев А.А. // Инж. физика. – 2003. – N 4. – С.2-6. – Библиогр.: 11 назв.
263. Образование наночастиц меди и латуни при лазерной абляции в жидкости / Казакевич П.В., Воронов В.В., Симакин А.В., Шафеев Г.А. //

- Квантовая электроника. – 2004. – Т.34. – N 10. – С.951-956. – Библиогр.: 17 назв.
264. Обухов И.А. О возможности применения СТМ–АСМ литографии для создания новых типов квантовых приборов // Микросистемная техника. – 2003. – N 6. – С.34-37. – Библиогр.: 6 назв.
265. Огнев А.В., Воробьев Ю.Д., Чеботкевич Л.А. Магнитная анизотропия нанокристаллических Co / Cu / Co пленок // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т.97. – N 6. – С.47-52. – Библиогр.: 9 назв.
266. Определение среднего размера и оценка полидисперсности наночастиц золота по спектрам поглощения и рассеяния света / Богатырев В.А., Дыкман Л.А., Хлебцов Б.Н., Хлебцов Н.Г. // Оптика и спектроскопия. – 2004. – Т.96. – N 1. – С.139-147. – Библиогр.: 25 назв.
267. Особенности получения модифицированным золь-гель методом силикатных стекол, содержащих наноразмерные частицы соединений меди // Алексеенко А.А., Гурин В.С., Юмашев К.В. и др. // Перспективные материалы. – 2004. – N 1. – С.27-35. – Библиогр.: 34 назв.
268. Панин В.Е., Панин А.В. Проблемы мезомеханики прочности и пластичности наноструктурных материалов // Изв. вузов. Физика. – 2004. – Т.47. – N 8. – С.5-17. – Библиогр.: 24 назв.
269. Пентагональные нанотрубки, формирующиеся при электрокристаллизации меди / Викарчук А.А., Довженко О.А., Костин В.И., Ясников И.С. // Материаловедение. – 2005. – N 3(96). – С.42-47. – Библиогр.: 15 назв.
270. Петрунин В.Ф. Ультрадисперсные (нано-)материалы и нанотехнологии // Инж. физика. – 2001. – N 4. – С.20-27. – Библиогр.: 23 назв.
271. Плазмохимический способ получения ультрадисперсных (нано-) порошков оксидов металлов и перспективные направления их применения / Ларин В.К., Кондаков В.М., Малый Е.Н. и др. // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2003 – N 5. – С.59-64. – Библиогр.: 12 назв.

272. Поздняков В.А. Механизмы и кинетика формирования наноаморфных твердых тел // *Материаловедение*. – 2004. – N 6(87). – С.32-40. – Библиогр.: 23 назв.
273. Поздняков В.А. Микроструктурные механизмы зернограничной деформации нанокристаллических материалов // *Материаловедение*. – 2003. – N 3(72). – С.2-8. – Библиогр.: 24 назв.
274. Поздняков В.А. Особенности разрушения нанокристаллических материалов // *Изв. АН. Сер. физ.* – 2003. – Т.67. – N 6. – С.867-875. – Библиогр.: 28 назв.
275. Поздняков В.А. Размерные эффекты мартенситных превращений в нанокристаллических материалах // *Изв. РАН. Сер. физическая*. – 2005. – Т.69. – N 9. – С.1282-1291. – Библиогр.: 32 назв.
276. Поздняков В.А., Глезер А.М. Структурные механизмы разрушения нанокристаллических материалов // *ФТТ*. – 2005. – Т.47.– вып.5. – С.793-800. – Библиогр.: 29 назв.
277. Покропивный А.В., Покропивный В.В. Дислокационный механизм формирования нанотрубок // *Письма в ЖТФ*. – 2003. – Т.29. – вып.12. – С.21-24. – Библиогр.: 8 назв.
278. Покропивный В.В. Неуглеродные нанотрубки (Обзор). I. Методы синтеза // *Порошковая металлургия*. – 2001. – N 9/10. – С.50-63. – Библиогр.: 102 назв.
279. Получение и исследование атомной и магнитной структуры нанокристаллических кобальтовых покрытий на порошковые тефлоновые материалы / Исхаков Р.С., Чеканова Л.А., Мальцев В.К. и др. // *Перспективные материалы*. – 2003. – N 5. – С.78-83. – Библиогр.: 10 назв.
280. Получение и исследование наноразмерных пленок меди с фрактальной структурой / Серов И.Н., Лукьянов Г.Н., Марголин В.И. и др. // *Микро-системная техника*. – 2004. – N 1. – С.31-37. – Библиогр.: 18 назв.
281. Получение и структура пористой керамики из нанокристаллического диоксида циркония / Никитин Д.С., Жуков В.А., Перков В.В. и др. //

- Неорг. материалы. – 2004. – Т.40. – N 7. – С.869-872. – Библиогр.: 7 назв.
282. Получение нанокристаллических материалов с уникальными магнитными свойствами / Цепелев В.С., Белозеров В.Я., Влох А.Н. и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2002. – N 5. – С.13-16. – Библиогр.: 8 назв.
283. Получение наночастиц углерода с помощью электродугового разряда между коаксиальными электродами / Чупрасов В.В., Третьяк М.С., Торопов В.В. и др. // Инж.-физ. журнал. – 2004. – Т.77. – N 3. – С.152-154. – Библиогр.: 3 назв.
284. Попков А.Ф. Магнитная наноэлектроника // Электрон. промышленность. Наука. Технологии. Изделия. – 2004. – N 3. – С.38-42. – Библиогр.: 11 назв.
285. Попова Г.В. Молекулярная инженерия наноразмерных систем // Нанотехника. – 2004. – N 1. – С.47-48.
286. Попок В.Н., Степанов А.Л., Оджаев В.Б. Синтез наночастиц серебра в стеклах методом ионной имплантации и исследование их оптических свойств // Журн. прикл. спектроскопии. – 2005. – Т.72. – N 2. – С.218-223. – Библиогр.: 23 назв.
287. Применение ионной имплантации для синтеза наночастиц меди в оксиде цинка с целью создания новых нелинейно-оптических материалов / Степанов А.Л., Хайбуллин Р.И., Кан Н. и др. // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30. – вып.20. – С.8-16. – Библиогр.: 16 назв.
288. Применение сканирующей оптической микроскопии ближнего поля для изучения субмикро- и нанообъектов, а также распределения электромагнитного поля / Ежов А.А., Магницкий С.А., Музыченко Д.А., Панов В.И. // Научные технологии. – 2005. – Т.6. – N 1. – С.34-40. – Библиогр.: 28 назв.
289. Принц В.Я. Трехмерные самоформирующиеся наноструктуры на основе свободных напряженных гетеропленок // Изв. вузов. Физика. – 2003. – Т.46. – N 6. – С.35-43. – Библиогр.: 43 назв.

290. Принц В.Я., Селезнев В.А., Чеховский А.В. Самоформирующиеся полупроводниковые микро- и нанотрубки // Микросистемная техника. – 2003. – N 6. – С.29-34. – Библиогр.: 41 назв.
291. Прошин Ю.Н., Хусаинов М.Г. Многовариантные спиновые переключатели тока на базе наноструктур ферромагнетик – сверхпроводник // Научно-технические проблемы нанотехнологий. – 2004. – Т.5. – N 4. – С.65-74. – Библиогр.: 20 назв.
292. Пути получения упорядоченных гетероструктур Ge-Si с германиевыми нанокластерами предельно малых размеров / Болховитянов Ю.Б., Кривошапов С.Ц., Никифоров А.И. и др. // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.1. – С.67-69. – Библиогр.: 24 назв.
293. Путилов А.В. О концепции инновационного развития результатов работ в области наноматериалов и нанотехнологий // Микросистемная техника. – 2003. – N 10. – С.22-27.
294. Путилов А.В. О развитии работ в России в области наноматериалов и нанотехнологий // Микросистемная техника. – 2003. – N 9. – С.2-5.
295. Развитие в России работ в области нанотехнологий / Алфимов С.М., Быков В.А., Гребенников Е.П. и др. // Микросистемная техника. – 2004. – N 8. – С.2-8. – Библиогр.: 4 назв.
296. Раков Э.Г. Пиролитический синтез углеродных нанотрубок и нановолокон // Рос. хим. журнал. – 2004. – Т.48. – N 5. – С.12-20. – Библиогр.: 114 назв.
297. Резонансные явления в наноразмерных структурах / Серов И.Н., Марголин В.И., Жабров В.А. и др. // Инж. физика. – 2004. – N 1. – С.18-32. – Библиогр.: 95 назв.
298. Релаксация просветления в наночастицах сульфида свинца при различных уровнях возбуждения / Савицкий В.Г., Поснов Н.Н., Маляревич А.М. и др. // Журн. прикл. спектроскопии. – 2004. – Т.71. – N 1. – С.76-80. – Библиогр.: 17 назв.

299. Рентгеноэлектронное исследование металлоуглеродных наноструктур, полученных методом низкоэнергетического синтеза / Макарова Л.Г., Шабанова И.Н., Кузнецов А.П., Теребова Н.С. // Изв. АН. Сер. физ. – 2004. – Т.68. – N 5. – С.653-656. – Библиогр.: 10 назв.
300. Реутов В.Ф. О вкладе нанокластеров в радиационное упрочнение металлов // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т.96. – N 6. – С.92-99. – Библиогр.: 7 назв.
301. Рехвиашвили С.Ш. К вопросу о теплоемкости нанокристаллических веществ // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30. – вып.22. – С.65-69. – Библиогр.: 4 назв.
302. Рехвиашвили С.Ш. Статистическая теория трения при взаимодействии нанозонда с поверхностью твердого тела // Инж.-физ. журнал. – 2003. – Т.76. – N 4. – С.168-170. – Библиогр.: 10 назв.
303. Ринкевич А.Б., Ромашев Л.Н., Кузнецов Е.А. Электромагнитные волны в прямоугольном волноводе с металлической наноструктурой // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т.49. – N 1. – С.48-53. – Библиогр.: 22 назв.
304. Ролдугин В.И. Самоорганизация наночастиц на межфазных поверхностях // Успехи химии. – 2004. – Т.73. – N 2. – С.123-156. – Библиогр.: 502 назв.
305. Роль нано- и микроэлектромеханики в развитии нанотехнологии / Алевшин А.П., Быков В.А., Емельянов А.В., Полторацкий Э.А. // Электронная промышленность. – 2003. – N 1. – С.39-52. – Библиогр.: 3 назв.
306. Рост и структура nanoостровков Ge на атомарно-чистой поверхности окиси Si / Никифоров А.И., Ульянов В.В., Пчеляков О.П. и др. // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.1. – С.80-82. – Библиогр.: 7 назв.
307. Рынков Д.О., Чеча В.В., Щука А.А. Одноэлектронные приборы // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – N 4. – С.8-23. – Библиогр.: 61 назв.

308. Ряснянский А.И. Нерезонансная нелинейность наночастиц серебра // Журн. прикл. спектроскопии. – 2005. – Т.72. – N 5. – С.650-653. – Библиогр.: 16 назв.
309. Савин А.В., Савина О.И. Нелинейная динамика углеродных молекулярных решеток: солитонные плоские волны в графитовом слое и сверхзвуковые акустические солитоны в нанотрубках // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.2. – С.372-379. – Библиогр.: 9 назв.
310. Самсонов В.М. О проблеме фазового состояния наночастиц // Изв. РАН. Сер. физ. – 2005. – Т.69. – N 7. – С.1036-1038. – Библиогр.: 16 назв.
311. Самсонов В.М., Дронников В.В., Мальков О.А. Зависимость температуры плавления нанокристаллов от их размера // Журн. физ. химии. – 2004. – Т.78. – N 7. – С.1203-1207. – Библиогр.: 22 назв.
312. Сафронов Л.Н., Ильницкий М.А. Свойства дефектов в нанокристаллах кремния и свойства нанокристаллов с дефектами // Микросистемная техника. – 2003. – N 9. – С.22-26. – Библиогр.: 9 назв.
313. Связь химических свойств углеродных нанотрубок с их атомной и электронной структурами / Томилин Ф.Н., Аврамов П.В., Кузубов А.А. и др. // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.6. – С.1143-1146. – Библиогр.: 16 назв.
314. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете (обзор) // ЖТФ. – 2005. – Т.75. – вып.5. – С.1-13. – Библиогр.: 20 назв.
315. Синхротронные исследования особенностей электронно-энергетического спектра кремниевых наноструктур / Домашевская Э.П., Терехов В.А., Кашкаров В.М. и др. // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.2. – С.335-340. – Библиогр.: 10 назв.
316. Система моделирования наноэлектронных приборов – NANODEV / Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Игнатенко С.А. и др. // Микроэлектроника. – 2003. – Т.32. – N 2. – С.124-133. – Библиогр.: 33 назв.

317. Смирнов А. Нано-память // Магия ПК. – 2002. – N 7-8(52). – С.20-21.
318. Соединение в твердом состоянии нанокристаллических титановых сплавов / Лутфуллин Р.Я., Кайбышев О.А., Валиахметов О.Р. и др. // Перспективные материалы. – 2003. – N 4. – С.21-25. – Библиогр.: 13 назв.
319. Созаев В.А., Чернышова Р.А. Влияние нанозазоров на межфазную энергию тонких металлических пленок сплавов на границе с диэлектрической средой // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. регион. Естеств. науки. Прилож. – 2003. – N 1(1). – С.41-44. – Библиогр.: 5 назв.
320. Созаев В.А., Чернышова Р.А., Яганов Д.В. Межфазная энергия и энергетический барьер на границе металлическая наноструктура – диэлектрик // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2003. – N 4. – С.61-64. – Библиогр.: 23 назв.
321. Срок службы автокатодов на основе углеродных нанотрубок / Чесов Р.Г., Никольский К.Н., Батулин А.С. и др. // Микросистемная техника. – 2003. – N 5. – С.26-29. – Библиогр.: 12 назв.
322. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. – Екатеринбург: Уральск. ун-т, 2002. – 379 с. – Библиогр.: 257 назв.
323. Стекла с наночастицами сульфиды свинца для лазерной техники / Рачковская Г.Е., Захаревич Г.Б., Юмашев К.В. и др. // Стекло и керамика. – 2004. – N 10. – С.16-18. – Библиогр.: 6 назв.
324. Степанов А.Л., Попок В.Н. Влияние плотности ионного потока на формирование наночастиц металла в диэлектрике при имплантации // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т.29. – вып.23. – С.20-25. – Библиогр.: 15 назв.
325. Степанов Ю.Н., Алымов М.И. Расчет модуля Юнга нанокристаллических металлических образцов // Металлы. – 2004. – N 3. – С.65-69. – Библиогр.: 7 назв.

326. Структура и газочувствительные свойства нанокompозита Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> / Ивановская М.И., Котиков Д.А., Орлик Д.Р., Фалиа Г. // Перспективные материалы. – 2004. – N 1. – С.67-72. – Библиогр.: 17 назв.
327. Сухов С.В. Нанокompозитный материал с единичным показателем преломления // Квантовая электроника. – 2005. – Т.35. – N 8. – С.741-744. – Библиогр.: 23 назв.
328. Сырков А.Г. Новые пути и фундаментальные основы нанотехнологии металлов // Цветные металлы. – 2004. – N 4. – С.67-71. – Библиогр.: 17 назв.
329. Тарасов Б.П., Ефимов О.Н. Водород в углеродных наноструктурах // Наука – производству. – 2000. – N 10(35). – С.47-50.
330. Теплопроводность нанокompозита опал + эпоксидная смола / Богомолов В.Н., Картенко Н.Ф., Курдюков Д.А. и др. // ФТТ. – 2003. – Т.45. – N 5. – С.910-913. – Библиогр.: 11 назв.
331. Термоэлектрические свойства углеродных нанотрубных структур / Золотухин И.В., Голев И.М., Калинин Ю.Е., Иванов А.С. // Перспективные материалы. – 2004. – N 5. – С.23-27. – Библиогр.: 18 назв.
332. Тимофеев В.Б. Электронные корреляционные явления в полупроводниковых структурах низкой размерности и наноструктурах // УФН. – 2004. – Т.174. – N 10. – С.1109-1116. – Библиогр.: 20 назв.
333. Тодуа П.А., Календин В.В., Новиков Ю.А. Российские достижения в области нанометрологии // Вестн. техн. регулирования. – 2004. – N 6(7). – С.40-43.
334. Травкин Н.Н. Наноматериалы на основе хрома и молибдена, полученные термическим разложением металлоорганических соединений // Инж. физика. – 2004. – N 1. – С.40-42. – Библиогр.: 8 назв.
335. Трехмерные нанокompозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. Ч.1 / Самойлович М.И., Клещева С.М., Белянин А.Ф. и др. // Микросистемная техника. – 2004. – N 6. – С.3-7. – Библиогр.: 12 назв.

336. Трехмерные нанокompозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. Ч.2 / Самойлович М.И., Клещева С.М., Белянин А.Ф. и др. // Микросистемная техника. – 2004. – N 7. – С.2-11. – Библиогр.: 32 назв.
337. Трехмерные нанокompозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. Ч.3 / Самойлович М.И., Клещева С.М., Белянин А.Ф. и др. // Микросистемная техника. – 2004. – N 8. – С.9-17. – Библиогр.: 17 назв.
338. Углеродные нанотрубные структуры – новый материал для эмиссионной электроники / Гуляев Ю.В., Косаковская З.Я., Мусатов А.Л., Сеницын Н.И. // Радиотехника. – 2003. – N 8. – С.36-41. – Библиогр.: 15 назв.
339. Ульянова Т.М., Титова Л.В. Функциональный нанопористый материал на основе волокнистого оксида алюминия // Перспект. материалы. – 2005. – N 2. – С.28-33. – Библиогр.: 7 назв.
340. Уракаев Ф.Х., Болдырев В.В. Теоретическая оценка условий получения наноразмерных систем в механохимических реакторах // Журн. физ. химии. – 2005. – Т.79. – N 4. – С.662-672. – Библиогр.: 22 назв.
341. Уракаев Ф.Х., Шевченко В.С., Болдырев В.В. Теоретическое и экспериментальное изучение механосинтеза наночастиц методом разбавления конечным продуктом // Химия в интересах устойчив. развития. – 2005. – Т.13. – N 2. – С.325-341. – Библиогр.: 39 назв.
342. Устройства нанoeлектроники на основе углеродных нанотрубок и углеродных нанокластеров / Гуляев Ю.В., Сеницын Н.И., Жбанов А.И. и др. // Инж. физика. – 2004. – N 1. – С.2-17. – Библиогр.: 80 назв.
343. Ушаков Н.М., Запис К.В., Кособудский И.Д. Электрофизические и диэлектрические свойства железосодержащих нанокompозитов // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т.29. – вып.22. – С.29-32. – Библиогр.: 7 назв.
344. Федосюк В.М. Наноразмерные магнитные структуры // Успехи совр. радиоэлектроники. – 2002. – N 5. – С.3-16. – Библиогр.: 38 назв.

345. Федосюк В.М., Точицкий Т.А., Шарко С.А. Многослойные нанопроволоки спин-клапанного типа // Перспективные материалы. – 2002. – N 4. – С.74-78. – Библиогр.: 16 назв.
346. Федосюк В.М., Шарко С.А. Технология получения, структура, магнитные и магниторезистивные свойства нанопроволок. Ч.1. Наноразмерные магнитные структуры и их магнитосопротивление // Успехи совр. радиоэлектроники. – 2005. – N 8. – С.46-57. – Библиогр.: 80 назв.
347. Федосюк В.М., Шарко С.А. Технология получения, структура, магнитные и магниторезистивные свойства нанопроволок. Ч.2. Электроосажденные нанокластерные сплавы // Успехи совр. радиоэлектроники. – 2005. – N 8. – С.58-70. – Библиогр.: 33 назв.
348. Фемтосекундная релаксационная динамика фотовозбужденных нанокристаллитов TiO<sub>2</sub> в водных суспензиях / Собенников А.С., Антипин С.А., Гостев Ф.Е. и др. // Хим. физика. – 2005. – Т.24. – N 4. – С.9-13. – Библиогр.: 13 назв.
349. Физико-химические аспекты формирования нанокompозитных структур. Ч.1 / Слепцов В.В., Диесперова И.И., Бизюков А.А., Дмитриев С.Н. // Микросистемн. техника. – 2002. – N 1. – С.16-27. – Библиогр.: 58 назв.
350. Физико-химические аспекты формирования нанокompозитных структур. Ч.2 / Слепцов В.В., Диесперова И.И., Бизюков А.А., Дмитриев С.Н. // Микросистемн. техника. – 2002. – N 2. – С.28-34. – Библиогр.: 15 назв.
351. Фомин Л.Ф. Моделирование пульсирующих колебаний гибких микрообъектов для целей нанотехнологий // Нано- и микросистемная техника. – 2005. – N 1. – С.31-34. – Библиогр.: 10 назв.
352. Формирование nanoостровков и нанопроволок Ge на сингулярных и вицинальных поверхностях Si (111) до образования смачивающего слоя / Тийс С.А., Талочкин А.Б., Романюк К.Н., Ольшанецкий Б.З. // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.1. – С.83-87. – Библиогр.: 18 назв.

353. Фотолюминесценция GeSi / Si (001) самоорганизующихся наноструктур различной формы / Востоков Н.В., Красильник З.Ф., Лобанов Д.Н. и др. // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.1. – С.63-66. – Библиогр.: 10 назв.
354. Фотолюминесценция Si / Ge наноструктур, выращенных при низких температурах молекулярно-пучковой эпитаксии / Бурбаев Т.М., Курбатов В.А., Погосов А.О. и др. // ФТТ. – 2004. – Т.46. – вып.1. – С.74-76. – Библиогр.: 9 назв.
355. Фролов Г.И. Магнитные свойства нанокристаллических пленок 3d-металлов // ЖТФ. – 2004. – Т.74. – вып.7. – С.102-109. – Библиогр.: 33 назв.
356. Харламов А.И., Кириллова Н.В., Каверина С.Н. Полые наноструктуры карбида кремния // Теорет. и эксперим. химия. – 2002. – Т.38. – N 4. – С.232-237. – Библиогр.: 10 назв.
357. Хлебцов Н.Г., Трачук Л.А., Мельников А.Г. Влияние размера, формы и структуры металлических наночастиц на зависимость их оптических свойств от показателя преломления дисперсионной среды // Оптика и спектроскопия. – 2005. – Т.98, N 1. – С.83-90. – Библиогр.: 52 назв.
358. Цирлина Г.А. Электроосажденные нанокристаллические оксиды – многофункциональные материалы // Нанотехника. – 2004. – N 1. – С.27-30. – Библиогр.: 12 назв.
359. Чернавский П.А. Размерные эффекты в реакциях окисления и восстановления наночастиц кобальта // Журн. физ. химии. – 2004. – Т.78. – N 8. – С.1416-1421. – Библиогр.: 14 назв.
360. Шадров В.Г., Немцевич Л.В. Нанокристаллические магнитные материалы // Физика и химия обработки материалов. – 2002. – N 5. – С.50-61. – Библиогр.: 101 назв.
361. Шевченко В.Я. О терминологии: наночастицы, наносистемы, наноконпозицы, нанотехнологии // Микросистемная техника. – 2004. – N 9. – С.2-4. – Библиогр.: 4 назв.

362. Шевченко В.Я., Мадисон А.Е. Строение нанодисперсных частиц. I. Обобщенная кристаллография наночастиц и магические числа // Физика и химия стекла. – 2002. – Т.28. – N 1. – С.60-65. – Библиогр.: 32 назв.
363. Шевченко В.Я., Мадисон А.Е. Строение нанодисперсных частиц. II. Магические числа наночастиц диоксида циркония // Физика и химия стекла. – 2002. – Т.28. – N 1. – С.66-73. – Библиогр.: 23 назв.
364. Шека Е.Ф. Квантовая нанотехнология и квантовая химия // Рос. хим. журнал. – 2002. – Т.46. – N 5. – С.15-21. – Библиогр.: 50 назв.
365. Шпак А.П., Шевченко А.Б., Мельник А.Б. Влияние типа пространственной структуры наночастиц никеля на их техническое намагничивание // ЖТФ. – 2004. – Т.74. – вып.3. – С.81-82. – Библиогр.: 5 назв.
366. Шпак А.П., Шевченко А.Б., Мельник А.Б. Влияние типа пространственной структуры наночастиц никеля на их техническое намагничивание // ЖТФ. – 2004. – Т.74. – вып.3. – С.81-82. – Библиогр.: 5 назв.
367. Электронная структура новых графитоподобных нанотрубок нитрида бора / Еняшин А.Н., Ивановская В.В., Макурин Ю.Н., Ивановский А.Л. // Докл. АН. – 2004. – Т.395. – N 1. – С.64-68. – Библиогр.: 11 назв.
368. Электрохимическое поведение электродов, содержащих одностенные углеродные нанотрубки / Кривенко А.Г., Матюшенко В.И., Стенина Е.В. и др. // Электрохимия. – 2003. – Т.39. – N 10. – С.1273-1277. – Библиогр.: 16 назв.
369. Элементы на основе многослойных магниторезистивных структур / Касаткин С.И., Муравьев А.М., Плотникова Н.В. и др. // Датчики и системы. – 2004. – N 5(60). – С.2-27. – Библиогр.: 12 назв.
370. Эмиттеры из углеродных нанотрубок для планарной эмиссионной вакуумной микро- и наноэлектроники / Гаврилов С.А., Ильичев Э.А., Полторацкий Э.А. и др. // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т.30. – вып.14. – С.75-81. – Библиогр.: 9 назв.
371. Эффективная плотность и транспортные свойства компактированных углеродных нанотрубок и нановолокон / Золотухин И.В., Голев И.М.,

- Маркова А.Е. и др. // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.31. – вып.4. – С.54-57.  
– Библиогр.: 10 назв.
372. Эффективные потенциалы взаимодействия между нанообъектами / Самсонов В.М., Базулев А.Н., Муравьев С.Д., Дронников В.В. // Журн. физ. химии. – 2004. – Т.78. – N 7. – С.1197-1202. – Библиогр.: 17 назв.
373. Эффекты дальнего действия в микро- и наноразмерных структурах / Серов И.Н., Марголин В.И., Жабрев В.А. и др. // Инж. физика. – 2005. – N 1. – С.50-67. – Библиогр.: 77 назв.
374. Si/Ge наноструктуры для применений в оптоэлектронике / Егоров В.А., Цырлин Г.Э., Тонких А.А. и др. // ФТТ. – 2004. – Т.46.– вып.1. – С.53-59. – Библиогр.: 13 назв.
375. Christenson H.K. Confinement effects on freezing and melting//J. Phys.: Cond. Matter. – 2001. – V.13. – P.95-133.
376. Borisov B.F., Charnaya E.V., Plotnikov P.G., Hoffmann W.-D., Michel D., Kumzerov Yu.A., Tien C., Wur C.-S.. Solidification and melting of mercury in a porous glass as studied by NMR and acoustic techniques // Phys. Rev. B. – 1998. – V.58. – P.5329-5336.
377. Charnaya E.V., Tien C., Lin K.J., Kumzerov Yu.A., Wur C.-S. Superconductivity of gallium in various confined geometries // Phys. Rev. B. – 1998. – V.58. – P.467.
378. Pankova S.V., Poborchii V.V., Solov'ev V.G. The giant dielectric constant of opal containing sodium nitrate nanoparticles // J. Phys.: Cond. Matter. – 1996. – V.8. – P.1203.
379. Fokin A.V., Kumzerov Yu.A., Okuneva N.M., Naberezhnov A.A., Yakhrushev S.B., Golosovsky I.V., Kurbakov A.I.. Temperature Evolution of Sodium Nitrite Structure in a Restricted Geometry // Phys. Rev. Lett. – 2002. – V.89. – P.175503 -175511.
380. Vakhrushev S.B., Kumzerov Yu.A., Fokin A., Naberezhnov A.A., Zalar B., Lebar A., Blinc R..  $^{23}\text{Na}$  spin-lattice relaxation of sodium nitrite in confined geometry // Phys. Rev. B. – 2004. – V.70. – P.132102-132105.

381. Bursian E. V., Girsberg Ya. G. Information about the phonon spectrum of ferroelectric obtained by limitation of Crystal size // *J. Phys.* – 1972. – V.33. – P.62-69.
382. Berreman D. W. Infrared Absorption at Longitudinal Optic Frequency in Cubic Crystal Films // *Phys. Rev.* – 1963. – V.130. – P.2193-2199.
383. Брыксин В.В., Фирсов Ю.А. Взаимодействие электрона с поверхностными фононами в пластине ионного кристалла // *ФТТ.* – 1971. – Т.13. – С.496-503.
384. Englman R. and Ruppin R. Optical lattice vibrations in finite ionic crystals: III // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1968. – V.1. – P.1515-1531.
385. Achar B.N.N. and Barsch G.R. Surface Modes of Vibration in a Semi-Infinite Rocksalt Crystal // *Phys. Rev.* – 1969. – V.188. – P.1361-1366.
386. Achar B.N.N. and Barsch G.R. Scattering-Matrix Method in Lattice Dynamics // *Phys. Rev.* – 1969. V.188. P.1356-1361.
387. Maradudin A., Wallis R. Lattice-Dynamical Calculation of the Surface Specific Heat of a Crystal at Low Temperatures // *Phys. Rev.* – 1966. – V.148. – P.945–961.
388. Burton J. Configuration, Energy, and Heat Capacity of Small Spherical Clusters of Atoms // *J. Chem. Phys.* – 1970. – V.52. – P.345-352.
389. Nonnenmacher Th. Quantum size effect on the specific heat of small particles // *Physics Letters A.* – 1975. – V.51. – P.213-214.
390. Montroll E. Size Effect in Low Temperature Heat Capacities // *J. Chem. Phys.* – 1950. – V.18. – P. 183-185.
391. Морохов И.Д., Петин В.И., Трусов Л.П., Петрунин В.Ф. Структура и свойства малых металлических частиц // *УФН.* – 1981. – Т.133. – С.653-692.
392. Mochizuki S. and Ruppin R. Substrate effects on infrared absorption in dielectric microcrystals // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 1991. – V3. – P.10037-10041.

393. Mochizuki S. and Ruppin R. Optical spectra of free silver clusters and microcrystal produced by the gas evaporation technique: transition from atom to microcrystal // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 1993. – V.5. – P.135-144
394. Mochizuki S., Nakata H. and Ruppin R. Optical spectra of free and supported CuCl microcrystals produced by thermal evaporation in a helium gas stream // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 1994. – V.6. – P.1269-1278.
395. Mochizuki S., Sasaki M. and Ruppin R. An optical study on vapour, microcrystal beam and film // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 1998. – V.10. – P.2347-2361.
396. Фридкин В.М. Критический размер в сегнетоэлектрических наноструктурах // *УФН.* – 2006. – Т.176. – С.203-212.
397. Tilley D.R., Zeks B. Landau theory of phase transitions in thick films//*Solid State Commun.* – 1984. – V.49. – P.823-828.
398. Струков Б.А., Давитадзе С.Т. Фазовые переходы в наноразмерных сегнетоэлектриках // Сборник докладов Международной научной конференции "Актуальные проблемы физики твердого тела". ФТТ. – г.Минск, 2005. – Т.1. – С.11-13
399. Wang C.L, Zhong W.L., Zhang P.L. The Curie temperature of ultra-thin ferroelectric films / *J. Phys.: Condens. Matter.* – 1992. – V.4. – P.4743-4749.
400. Cottam M.G., Tilley D.R., Zeks B. Theory of surface modes in ferroelectrics // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1984. – V.17. – P.1793-1823.
401. Scott J.F., Ming-Sheng Zhang, Bruce Goldfrey R., Araujo C., McMillan L. Raman spectroscopy of submicron KNO<sub>3</sub> films // *Phys. Rev. B.* – 1987. – V.35. – P.4044-4051.
402. Glinchuk M.D., Morozovska A.N. The internal electric field originating from the mismatch effect and its influence on ferroelectric thin film properties // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2004. – V.16. – P.3517-3531.
403. Ghosez Ph., Rabe K.M. Microscopic model of ferroelectricity in stress-free PbTiO<sub>3</sub> ultrathin films // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – V.76. – P.2767-2769.

404. Meyer B., Vanderbilt D. Ab initio study of BaTiO<sub>3</sub> and PbTiO<sub>3</sub> surfaces in external electric fields // Phys. Rev. B. – 2001. – V.63. – P.205426-205436.
405. Tybell T., Ahn C.H., Triscone J.M. Ferroelectricity in thin perovskite films // Appl. Phys. Lett. – 1999. – V.75. – P.856-858.
406. Блинов Л.М., Фридкин В.М., Палто С.П., Буне А.В., Даубен П.А., Дюшарм С. Двумерные сегнетоэлектрики (Обзоры актуальных проблем) // УФН. – 2000. – Т.170. – С.247-253.
407. Гусев А.И. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных материалах и соединениях//УФН. – 1998. – Т.168. – С.55-83.
408. Henglein A. Physicochemical properties of small metal particles in solution: "microelectrode" reactions, chemisorption, composite metal particles, and the atom-to-metal transition // J. Phys. Chem. – 1993. – V 97. – P.5457-5471.
409. Hellweg T., Langevin D. The dynamics in dodecane/C<sub>10</sub>E<sub>5</sub>/water microemulsions determined by time resolved scattering techniques // Physica A. – 1999. – V.264. – P.370-387.
410. Блинов А.М. Лэнгмюровские пленки // Успехи физ. наук. – 1988. – Т.155. – С.443-480.
411. Арслан В.В. Полимерные слои и пленки Ленгмюра-Блоджетт // Успехи физ. наук. – 1994. – Т.63. – С.3-43.
412. Colvin V.L., Goldstein A.N., Alivisatos A.P. Semiconductor nanocrystals covalently bound to metal surfaces with self-assembled monolayers // J. Am. Chem. Soc. – 1992. V.114. P.5221-5230.
413. Chumanov G., Sokolov K., Gregory B.W., Cotton T.M. Colloidal Metal Films as a Substrate for Surface-Enhanced Spectroscopy // J. Phys. Chem. – 1995. – V.99. – P.9466-9471.
414. Jang J., Meldrum F.C., Fendler J.H. Epitaxial Growth of Size-Quantized Cadmium Sulfide Crystals Under Arachidic Acid Monolayers // J. Phys. Chem. – 1995. –V.99. – P.5500-5504.

415. Помогайло А.Д. Гибридные полимер-неорганические нанокомпозиты // Успехи химии. – 2000. – Т.69. – С. 60-90.
416. Богомолов В. И. Жидкости в ультратонких каналах // УФН. – 1978. – Т.124. – С.171-182.
417. Романовский Б.В., Макшина Е.В.. Нанокомпозиты как функциональные материалы // Соросовский образовательный журнал. – 2004. – Т.8. – С.50–55.
418. Fenelonov V.B., Romannikov V.N., Derevyankin A.Yu. About Mesopore Surface Area and Size Calculations for Hexagonal Mesophases (Types of MCM-41, FSM-16, ets) // Micropor. Mesopor. Mater. – 1999. – V.28. – P.57-72.
419. Wang L., Fan J., Tian B., Yang H., Yu C., Tu B., Zhao D. Synthesis and characterization of small pore thick-walled SBA-16 templated by oligomeric surfactant with ultra-long hydrophilic chains // Microporous and Mesoporous Materials. – 2004. – V.67 – P.135-141.
420. Jun S., Joo S.H., Ryoo R., Kruk M., Jaroniec M., Liu Z., Ohsuma T., and Terasaki O. Synthesis of New, Nanoporous Carbon with Hexagonally Ordered Mesostructure // J. Am. Chem. Soc. – 2000. – V.122. – P.10712-10713.
421. Cheng C.-F., Lin Y.-C., Cheng H.-H., Chen Y.-C. The effect and model of silica concentrations on physical properties and particle sizes of three-dimensional SBA-16 nanoporous materials // Chemical Physics Letters. – 2003. – V.382. – P.496–501
422. Morishige K., Tateishi N., Fukuma S. Capillary Condensation of Nitrogen in MCM-48 and SBA-16 // J. Phys. Chem. B. – 2003. – V.107. – P.5177-5181.
423. Аблицова А.С., Агемян В.Ф., Серов А.Ю. Оптические спектры микрокристаллов слоистого полупроводника  $PbI_2$ , выращенных в стеклянных матрицах // ФТП. – 1998. – Т.32. – С.151-154.

424. Парфеньева Л.С., Смирнов И.А., Фокин А.В., Мисиорек Х., Муха Я., Ежовский А. Рассеяние фононов на границах малых кристаллов, помещенных в диэлектрическую матрицу пористого стекла // ФТТ. – 2003. – Т.45. – С.359-363.
425. Богомолов В.Н., Сорокин Л.М., Курдюков Д.А., Павлова Т.М., Хатчисон Дж. Сравнительное изучение с помощью просвечивающей электронной микроскопии трехмерной решетки из нанокластеров теллура, полученной различными способами в опаловой матрице // Физика твердого тела. – 1997. – Т.39. – С.2090-2095.
426. Chen T.S., Alldredge G.P, de Wette F.W., Allen R.E. Surface and Pseudo-surface Modes in Ionic Crystals // Phys. Rev. Lett. – 1971. – V.26. – P.1543–1546.
427. Goodman R.M., Farrell H.H., Somorjai G.A. Mean Displacement of Surface Atoms in Palladium and Lead Single Crystals//The Journal of Chemical Physics. – 1968. – V.48. – P.1046-1051
428. Morabito J.M., Steiger R.F., Somorjai G.A. Studies of the Mean Displacement of Surface Atoms in the (100) and (110) Faces of Silver Single Crystals at Low Temperatures // Phys. Rev. – 1969. – V.179. – P.638–644.
429. Novotny V., Meincke P.M. Thermodynamic Lattice and Electronic Properties of Small Particles // Phys. Rev. B. – 1973. – V.8 – P.4186–4199.
430. Самсонов В.М. О проблеме фазового состояния наночастиц // Изв. РАН. Сер. физ. – 2005. – Т.69. – С.1039-1042.
431. Шамшур Д.В., Черняев А.В., Фокин А.В., Романов С.Г. Электропроводность и сверхпроводимость упорядоченного нанокompозита индий-опал // ФТТ. – 2005. – Т.47. – С.1927-1936.
432. Clark T.D. Electromagnetic Properties of Point-Contact Josephson-Junction Arrays // Phys. Rev. B. – 1973. – V.8. – P.137–162.
433. Charnaya E.V., Tien C., Lin K.J., Wur Yu C.S., Kumzerov A. Superconductivity of gallium in various confined geometries // Phys. Rev. B. – 1998. – V.58. – P.467–472.

434. Watson J.H.P. Transition Temperature of Superconducting Indium, Thallium, and Lead Grains // *Phys. Rev. B.* – 1970. – V.2. – P.1282–1286.
435. Богомолов В.Н., Журавлев В.В., Задорожний А.И., Колла Е.В., Кумзеров Ю.А. Вольт-амперные характеристики регулярной системы слабосвязанных сверхпроводящих частиц // *Письма в ЖЭТФ.* – 1982. – Т.36. – С.298-300.
436. Watson J.H. Critical Magnetic Field and Transition Temperature of Synthetic High-Field Superconductors // *Phys. Rev.* – 1966. – V.148. – P.223-230.
437. Zhong W.L., Qu B.D., Zhang P.L., Wang Y.G. Thickness dependence of the dielectric susceptibility of ferroelectric thin films // *Phys. Rev. B.* – 1994. – V.50. – P.12375–12380.
438. Давитадзе С.Т., Кравчун С.Н., Струков Б.А., Тараскин С.А., Гольцман Б.М., Шульман С.Г. Исследование тепловых свойств тонких пленок методом зондового периодического нагрева // *ФТТ.* – 2000. – Т.42. – С.111-113.
439. Павлов С.В., Акимов М.Л. Изоморфные фазовые переходы в тонких пленках сегнетоэлектриков // *Кристаллография.* – 1999. – Т.44. – С.333-335.
440. Strukov B.A., Davitadze S.T., Kravchun S.N., Lemanov V.V., Goltsman B.M., Shulman S.G. Experimental study of heat properties of  $Ba_{(1-x)}Sr_{(x)}TiO_3$  thin films on the substrate // *NATO Science Series, Ser.III.* – 2000. – V.77. – P.279-284.
441. Prasertchoung S., Nagarajan V., Ma Z., Ramesh R., Cross J.S., Tsukada M. Polarization switching of submicron ferroelectric capacitors using an atomic force microscope // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – V.84. – P.3130-3132.
442. Qu H, Yao W., Garcia T., Zhang J., Sorokin A. V., Ducharme S., Dowben P.A., Fridkin V. Nanoscale polarization manipulation and conductance switching in ultrathin films of a ferroelectric copolymer // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – V.82. – P.4322-4324.

443. Gonzalo J.A. Equation of State for the Cooperative Transition of Triglycine Sulfate near  $T_c$  // *Phys. Rev. B.* – 1970. – V.1. – P.3125-3132.
444. El-kabbany F., Badawy W., El-khwas E.H., Tahr N.H. Dielectric and pyroelectric properties of  $\text{KNO}_3$  thin-layers // *Journal of materials science.* – 1988. – V.23. – P.776-781.
445. Balagurov B.Ya. On the Conductivity of Composites with Two-Dimensional Periodic Structure // *J E T P.* – 2001. – V.93. – P.586-595.
446. Manteufel R.D., Todreas N.E. Analytic Formulas for the Effective Conductivity of a Square or Hexagonal Array of Parallel Tubes // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 1994. – V.37. – P.647-655.
447. Ragulya A.V. Rate-Controlled Synthesis and Sintering of Nanocrystalline Barium Titanate Powder // *Nanostructured Mater.* – 1998. – V.10. – P.349-353.
448. Глинчук М.Д., Морозовская А.Н.. Радиоспектроскопия и диэлектрические спектры наноматериалов // *ФТТ.* – 2003. – Т.45. – С.1510-1518.
449. Zhong W.L., Wang Y.G., Zhang P.L., Qu B.D. Phenomenological study of the size effect on phase transitions in ferroelectric particles // *Phys. Rev. B.* – 1994. – V.50. – P.698–703.
450. Pandey L., Hughes D.G. Interpretation of the temperature dependence of the quadrupole spin-lattice relaxation of  $^{23}\text{Na}$  in  $\text{NaNO}_2$  // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 1992. – V.4. – P.6889-6898.
451. Sen S., Stebbins J.F. Na-ion transport in borate and germanate glasses and liquids: A  $^{23}\text{Na}$  and  $^{11}\text{B}$  NMR spin-lattice-relaxation study // *Phys. Rev. B.* – 1997. – V.55. – P.3512-3520.
452. Charnaya E.V., Tien C., Lin K.J., Kumzerov Yu.A., Wur C.-S. X-ray studies of the melting and freezing phase transitions for gallium in a porous glass // *Phys. Rev. B.* – 1998. – V.58. – P.011089-011093.
453. Ma W., Zhang M., Lu Z.. A Study of Size Effects in  $\text{PbTiO}_3$  Nanocrystals by Raman Spectroscopy // *Phys. Stat. Sol.* – 1998. – V.166. – P.811-815.

**Елена Владимировна Стукова,**  
*доц. кафедры ТиЭФ АмГУ, канд. физ.-мат. наук*

**Сергей Васильевич Барышников,**  
*проф. кафедры ТиЭФ АмГУ, д-р физ.-мат. наук*

**Алексей Юрьевич Милинский,**  
*ст. преп. кафедры ТиЭФ, канд. физ.-мат. наук*

**Физика малых частиц и наноструктурных материалов. Учебное пособие.**

---

Подписано к печати 10.12.10. Формат 60X84/16. Усл. печ. л. 8,83. Тираж 100.  
Заказ 183.