




В. Лучинин
д.т.н., проф. кафедры микроэлектроники,
директор Центра микроэлектроники и диагностики
Санкт-Петербургского государственного
электротехнического университета

НАНОИНДУСТРИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ



Цель данной работы – анализ влияния быстро прогрессирующей области науки и техники, основанной на использовании новых нетрадиционных свойств и функциональных возможностей материалов, процессов и систем при переходе к наномасштабам, на возникновение потенциальных рисков и угроз, а также оценка перспективных направлений активного использования наноиндустрии для их предупреждения, ослабления и устранения, т.е. уменьшения вероятности перехода опасности из возможности в действительность.

Более глубокое познание и, безусловно, использование возможностей материального мира на микро- и – особенно – наноразмерных уровнях (когда фактически становится безразличной исходная принадлежность атома или молекулы к объекту органической или неорганической природы) создает предпосылки к синтезу искусственных, ранее не известных в природе систем не просто по составу и структуре, но и, в первую очередь, по свойствам, а, следовательно, функциональным возможностям [1]. *Процесс эволюции ускоряется, а возникающее многообразие не всегда подвержено естественному отбору временем, причем, это относится не только к материальной, но и к интеллектуальной продукции. В этой силе и опасности любого нового направления, особенно междисциплинарного.* Поскольку в этом пока еще "карлике" просматриваются очертания "гиганта", целесообразно на начальном этапе развития индустрии с приставкой "нано" оценить возможное положительное или отрицательное влияние наноиндустрии на безопасность как "состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз" [2].

ИСТОЧНИКИ НАНОУГРОЗ

Базисом наноиндустрии являются *нанотехнологии* – совокупность научно обоснованных действий, обеспечивающих практическое материальное воплощение системы знаний, основанной на описании, объяснении и предсказании свойств материальных объектов с нанометрическими характеристическими размерами или систем более высокого метрического уровня, упорядоченных или самоупорядоченных на основе наноразмерных элементов.

Продукция нанотехнологий – *наноматериалы и наносистемы* [3].

Наноматериалы – вещества и композиции веществ, представляющие собой искусственно или естественно упорядоченную или неупорядоченную систему базовых элементов с нанометрическими характеристическими размерами и особым проявлением физического и (или) химического взаимодействий при кооперации наноразмерных элементов, обеспечивающей возникновение у материалов и систем совокупности ранее неизвестных механических, химических, электрофизических, оптических, теплофизических и

Таблица 1. Угрозы и риски, порождаемые развитием нанотехнологий

Вид	Проявление
Геополитические риски	Реализация теории "асимметричного ответа" малых стран за счет локального применения биологического или информационного оружия для создания хаоса
Государственная безопасность	Избирательное информационное или электромагнитное воздействия на структуры государственного и военного управления Локальный скрытый медико-биологический контроль за группами людей Изменение стратегии сбора информации и контроля эфира за счет использования коммерческих бытовых информационных сетей на основе элементной базы нового поколения
Военная безопасность	Совершенствование термоядерного оружия малой мощности и сверхточного миниатюрного оружия высокой поражающей силы на основе наноматериалов с импульсным энерговыделением Развитие селективного триггерного или генетического избирательного оружия Развитие радиоэлектронных систем супервысоких частот (гигагерцы – терагерцы)
Экологическая и медицинская безопасность	Проникновение в природную среду наночастиц, стимулирующих вредные или фатальные воздействия на человека и другие биологические объекты
Глобальные социально-экономические риски	Снижение спроса на углеводородное сырье в связи с появлением альтернативных источников энергии Падение спроса на традиционные виды металлических руд, включая редкие металлы, за счет вытеснения их композитами на основе углерода, кремния и полимеров

других свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов.

Наносистемы – материальные объекты в виде упорядоченных или самоупорядоченных интегрированных элементов с нанометрическими характеристическими размерами, кооперация которых обеспечивает возникновение у объекта новых свойств, проявляющихся в виде квантово-размерных, синергетически-кооперативных, коллективных, "гигантских" эффектов, явлений и процессов, связанных с проявлением наномасштабных факторов.

В основе продукции наноиндустрии лежит использование новых, ранее не известных свойств и функциональных возможностей материальных систем при переходе к наномасштабам, определяемых особенностями процессов переноса и распределения зарядов, энергии, массы и информации при наноструктурировании.

Следует предположить, что наиболее значимыми причинами появления вышеуказанных особенностей в условиях "наномира" являются:

- энергетическая, полевая и "вещественная" неравновесность поверхности, охватывающая значительные объемы наночастиц и наноконпозиций;
- повышение роли различных видов размерных эффектов из-за значительной площади границ раздела в условиях наноконпозиций;
- проявление в условиях больших коллективов энергетически активных наночастиц нетрадиционных механизмов упорядочения, переноса энергии и заряда;
- малые характеристические размеры частиц и особый характер их упорядочения, обеспечивающие энергетическую и пространственную доступность транспорта заряда, энергии и конформационных изменений.

Наиболее характерными проявлениями "наномира" даже по сравнению с объектами с микроскопическими характеристическими размерами следует признать:

- высокую "полевую" (электрическую, магнитную) активность и "каталитическую" (химическую) избирательность поверхности ансамблей на основе наночастиц;
- появление нетрадиционных видов симметрии, особых видов сопряжения границ раздела и конформаций, в том числе, с динамически перестраиваемой структурой;
- особый характер протекания процессов передачи энергии, заряда и конформационных изменений, отличающихся низким энергопотреблением, высокой скоростью и носящих признаки кооперативного синергетического процесса;
- доминирование над процессами искусственного упорядочения явлений самоупорядочения и самоорганизации, отражающих проявление эффектов матричного копирования и особенностей синтеза в условиях, далеких от равновесных.

В качестве возможных причин возникновения наногроз следует особо выделить:

- малые геометрические размеры наночастиц и, как следствие, их высокую проникающую способность, реакционную и адсорбционную активность при отсутствии у человека, животных и растений эволюционно выработанных защитных механизмов противодействия;
- многообразии структуры и состава наночастиц и наноконпозиций и, как следствие, сложность их идентификации и количественной характеристики;
- развитие междисциплинарных исследований, стимулирующих создание конвергентных систем, основанных на искусственной интеграции объектов органической (в том числе, живой) и неорганической природы в отсутствие надежной информации о механизмах их взаимодействия и патогенных проявлениях при аккумуляции;
- экономически стимулированное резкое ускорение технологической эволюции в области процессов нанотехнологии, наноматериалов и производства продукции на их основе в отсутствие необходимой нанотехнологической культуры у



Таблица 2. Состояние критических направлений развития наноиндустрии в Российской Федерации

Технология, инструментальная база	Состояние
Информационные нанотехнологии	Разрыв между топологическими нормами отечественных и зарубежных ИМС широкого применения до 10 раз. Зарубежные страны: 0,09; 0,065; 0,045; 0,032...0,022 мкм; Россия: 0,5; 0,35...0,18 (0,13) мкм
Бионанотехнологии	Массовое производство микро- и наночипов для медико-биологической диагностики и атомно-молекулярной инженерии отсутствует. Методики биочиповой диагностики не утверждены
Химические нанотехнологии	Уровень внедрения разработок в области нанокатализаторов и наночипов не соответствует потребностям страны
Энергетические нанотехнологии	Имеются отдельные частные разработки, направленные на создание высокоэффективных миниатюрных источников энергии
Нанотехнологическая и наноаналитическая базы	Отсутствует скоординированная программа работ по технологическому, аналитическому и метрологическому оборудованию для наноиндустрии

разработчиков, производителей, органов сертификации и санитарно-эпидемиологического контроля;

- новизна продукции наноиндустрии при возможной высокой экономической эффективности финансовых вложений, создающей у определенной группы, как правило, "молодых" небольших компаний соблазн достижения быстрого результата без оценки риска и последствий;
- малые массогабаритные и энергетические показатели ряда нанотехнологических процессов и возможность их "скрытой" реализации, стимулирующие возникновение тенденций к использованию нанотехнологий и наноматериалов для реализации преднамеренных террористических проявлений.

Изложенные ранее представления о возможной роли наноиндустрии в возникновении искусственных и естественных наногроз позволяют сделать заключение – проблема из частной выходит на системный уровень, и термины с приставкой "нано" прочно входят в лексикон не только научно-технической и журналистской элиты, но и представителей силовых ведомств.

НАНОУГРОЗЫ И РИСКИ

Совокупность угроз и рисков, порождаемых развитием, применением и распространением нанотехнологий обобщена в табл.1.

В связи с развитием нанотехнологий следует особо выделить направления возникновения *военно-технических* угроз [4–6]:

- новые типы обычного оружия повышенной точности и поражающей силы;
- боевые автономные миниатюрные системы наземного, воздушного и космического базирования, в том числе распределенные (типа "рой");
- сверхскоростные информационные распределенные системы;
- ультрасверхвысокочастотные радиоэлектронные средства обнаружения и связи;
- распределенные сенсорные сети (типа "умная пыль") специального назначения;
- имплантируемые микро- и наносистемы, предназначенные для управления, изменения потенциальных возможностей и "манипулирования" человеческим организмом;

- биологическое и химическое оружие триггерного и генетически избирательного действия.

РОЛЬ НАНОИНДУСТРИИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

В процессе становления наноиндустрии можно определить ряд особенностей "нанотехнологического бизнеса" как инновационного интеллектуальноемкого и экономически эффективного направления, затрагивающего, в том числе, и геополитические особенности развития государств:

- нанотехнологии основаны на фундаментальных знаниях и имеют в качестве принципиального ограничения кадровый потенциал;
- нанотехнологии построены на новых знаниях и, как правило, требуют защиты интеллектуальной собственности;
- развитие нанотехнологических исследований требует значительных экономических вложений;
- выход на рынок нанотехнологий требует чрезвычайно значительных "импульсных" экономических вложений;
- нанотехнологический капитал – рискованный, отдача медленная.



Рис. 1 Основные направления обеспечения безопасности жизнедеятельности человека

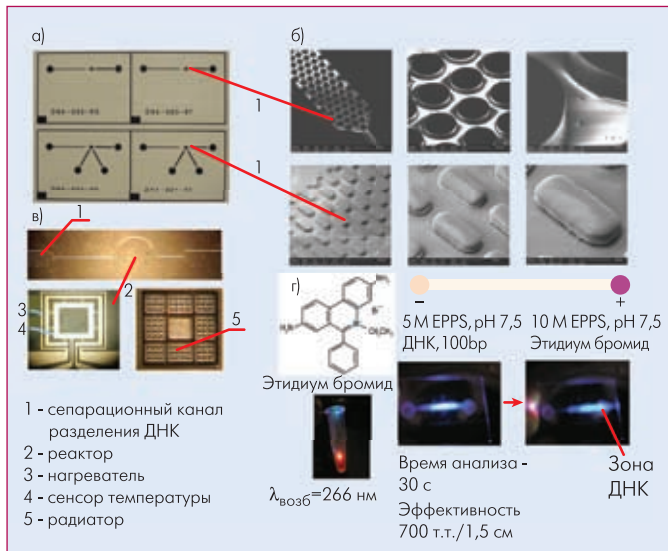


Рис.2 Генетический анализ на микрочипе: а – топология микрочипа, б – 30-микрорельеф в канале сепарации, в – интегральный ПЦР-реактор, г – лиминесцентная картина динамики анализа

Основной геополитической особенностью нанобизнеса является селекция государств по их возможностям, исходя из следующих критериев:

- образовательный капитал (уровень) [7],
- финансовый капитал (экономический потенциал),
- природный капитал (ресурсы).

Не претендуя на полноту, представим состояние развития основных областей наноиндустрии в Российской Федерации (табл.2)

Особого внимания заслуживают проблемы обеспечения медицинской, биологической, экологической, продовольственной безопасности, т.е. безопасности жизнедеятельности человека (рис.1) как носителя генетического, исторического, культурного и технологического наследий.

Фактически первым научно-обоснованным нормативным документом, определяющим химическую и биологическую безопасность продукции, полученной с использованием нанотехнологий или содержащей наноматериалы, является "Концепция токсикологических исследований, методологии оценки риска, методов идентификации и количественного определения наноматериалов", утвержденная Постановлением главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 31 октября 2007 года № 79.

Следует выделить ряд особенностей, отличающих требования к нанопродукции от требований к традиционным веществам, материалам и процессам. Это "доза-эффект" и "химический состав – эффект". Кроме того, следует особо учитывать отсутствие у организма эволюционно сформированной системы распознавания и иммунного ответа на наночастицы, а также устойчивость наночастиц к биотрансформациям. Это может приводить к их аккумуляции в продуктах растительного, животного происхождения и передаче по пищевой цепи с накоплением в организме человека. Следует также обратить

внимание на информацию о том, что токсичность наноматериалов проявляется, в первую очередь, в виде окислительного стресса в клетках мозга, повреждения клеточных мембран и ДНК. Последнее подтверждает особую роль, которую могут играть в будущем для генетического анализа наноаналитические чипы (рис.2) как экономически эффективные системы для массового скрининга населения [8].

Проведенный анализ позволяет выделить совокупность факторов, определяющих риски человека, животных, растений и окружающей среды в связи с развитием наноиндустрии. К ним относятся:

- продукция наноиндустрии в виде наноматериалов различной структуры и состава;
- обычная продукция, полученная с использованием наноматериалов в качестве основных и вспомогательных компонентов технологического процесса;
- промышленные отходы и выбросы при производстве продукции наноиндустрии;
- промышленные отходы и выбросы при производстве обычной продукции, в качестве исходных материалов и полуфабрикатов которой используется продукция наноиндустрии;
- наноматериалы и наносистемы, используемые в качестве инструментальных, диагностических и лекарственных средств при оказании медицинских услуг и проведении исследований;
- одежда, обувь, упаковка, продукты, созданные с применением наноматериалов и процессов нанотехнологии;
- пищевая цепочка: вода, растения, животные – человек;
- ингаляционный путь: воздушная среда, растения, животные – человек.

Характеризуя современное состояние информационной безопасности на микро- и наноуровнях [9], следует обратить внимание на три основные тенденции:

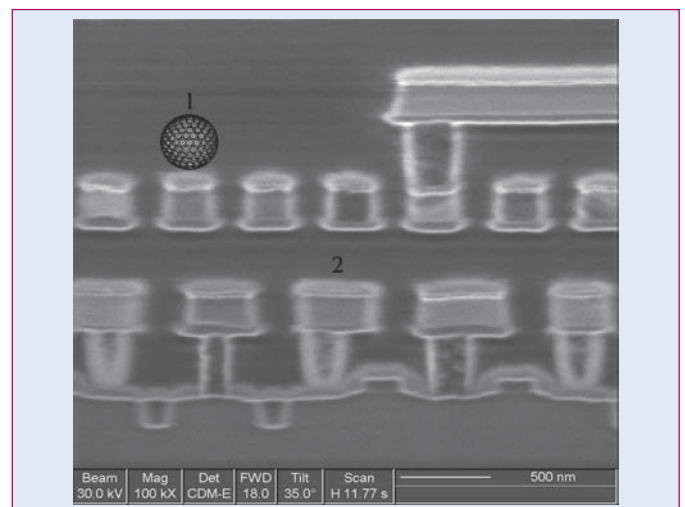


Рис.3 Сопоставление размеров модели вируса оспы (1) и фрагмента сечения "кристалла-чипа" (2) современной интегральной схемы с наноразмерными топологическими нормами

- Перенесение центра тяжести технического и технологического противостояния на наноуровень (*за рубежом чрезвычайно высокие темпы разработки и промышленного освоения электронной компонентной базы новых поколений*):
 - наноразмерные топологические нормы в массовом производстве ИМС, резкое увеличение функциональных возможностей сверхинтегрированных систем, реализуемых в микрообъемах;
 - интеграция электронных цифровых, СВЧ и оптических систем на кристалле.
- Резкое обострение борьбы за "эфир" как глобальную коммуникационную среду (*радиоканал как универсальная беспроводная гибкая распределенная система сбора, передачи информации и управления*):
 - расширение функциональных возможностей радиотелефонов;
 - развитие технологий радиочипов, интегрированных с компьютерной техникой;
 - развитие технологии радиоидентификаторов.
- Ориентация на междисциплинарные информационные технологии [10]:
 - использование конвергентной бионеорганической элементной базы на основе интеграции наноразмерных объектов живой и неживой природы, уже имеющих соизмеримые размеры (рис.3);
 - использование вступающих в синергетическое электромагнитное взаимодействие сверхбольших массивов наноразмерных элементов неорганической природы с возникновением у кооперации свойств обработки и

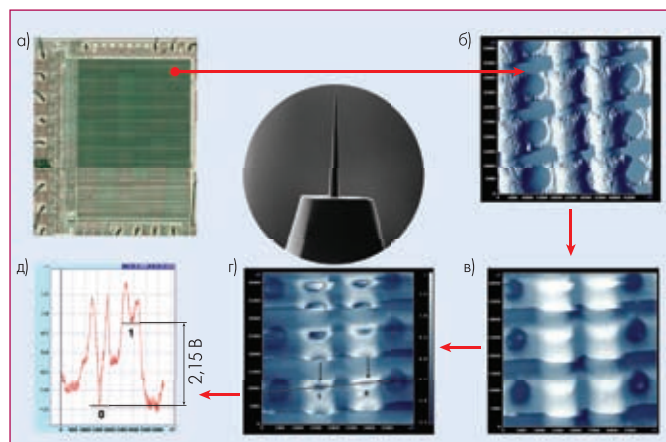


Рис.4 Атомно-зондовая наноразмерная криптография ячеек памяти на поверхности кристалла интегральной схемы: а – кристалл памяти (оптическая микроскопия), б – фрагмент кристалла памяти (атомно-зондовая микроскопия), в – электрический потенциал в ячейках памяти без записи информации, г – электрический потенциал в ячейках памяти после записи информации, д – распределение электрического потенциала (логические 0 и 1) по линии сканирования атомного зонда

хранения информации, типичных для биосред (адаптивность, рефлексия, обучение).

Развитие методов динамической электрической наноразмерной криптографии на кристалле интегральной схемы для считывания информации о логическом состоянии ячейки памяти (0 или 1) с нанометровым пространственным разрешением с помощью АСМ иллюстрирует рис.4.

Несмотря на то, что продукция nanoиндустрии, как правило, имеет двойное назначение, выделим приоритетные проекты, реализация которых ориентирована, в первую оче-

Приоритетные проекты в области nanoиндустрии для сферы обеспечения безопасности

НАНОМАТЕРИАЛЫ
Наноконпозиционные материалы с особой устойчивостью к экстремальным факторам для термически, химически и радиационно стойких конструкций
Наноконпозиционные материалы, обладающие "интеллектуальными" свойствами, включая адаптивность и память
Специальные наноконпозиционные адаптивные материалы с низкой эффективной отражающей или сверхвысокой поглощающей способностью в СВЧ и оптическом диапазонах длин волн
Специальные нанодисперсные материалы с максимально эффективным энергопоглощением и энерговыделением, в том числе, импульсным
Биологически активные наночастицы для наноизбирательной биомаркировки, диагностики, фармакотерапии и генной инженерии
НАНОТЕХНОЛОГИИ
Машиностроительные технологии для механической, термомеханической и корпускулярной обработки с наноточностью
Зондовые, пучковые и корпускулярно-полевые технологии нанослоевого синтеза, наноразмерного нанесения, удаления и модифицирования вещества
Биомедицинские технологии наноизбирательной диагностики, фармакотерапии, генной инженерии и сверхлокальной инвазивной хирургии
НАНОДИАГНОСТИКА
Экспресс-методы и средства регистрации электрических, оптических, магнитных, акустических и других полей наноразмерных объектов
Средства и методы метрологического обеспечения процессов производства, контроля и исследований наноразмерных объектов, нано- и пикоколичеств вещества
Специальные экспресс – методы и средства обнаружения и идентификации нано- и пикоколичеств био- и взрывоопасных веществ
НАНОСИСТЕМЫ (НАНОУСТРОЙСТВА)
Нанохимические компоненты (сорбенты, катализаторы, насосы, реакторы) для высокоэффективной очистки, избирательного сверхскоростного высокопроизводительного синтеза, атомно-молекулярной инженерии
Нанозлектронные компоненты (элементная база) для сверхинтегрированных сверхмощных устройств наноэлектроники, сверхскоростных систем генерации, хранения, передачи и обработки информации
Нанооптические компоненты (элементная база – излучатели, фотоприемники, преобразователи) для энергетически эффективной светотехники, систем сверхскоростной "сверхплотной" высокопомехозащищенной регистрации, передачи и обработки информации
Компоненты нано- и микросистемной техники (электрохимические, оптомеханические, теплофизические, флюидные, биотехнические, биологические) для сверхминиатюрных высокочувствительных сенсорных, сверхточных исполнительных и микроэнергопотребляющих робототехнических устройств
Нано- и микроразмерные устройства для генерации, поглощения и аккумуляции электрической, световой, тепловой и механической энергии

Таблица 3. Направления и методы обеспечения безопасности в наноиндустрии

Тенденции	Методы	
	активные	пассивные
<p>Распределенность выполняемых функций по массиву</p> <p>Уменьшение массо-габаритных показателей систем при увеличении их количества</p> <p>Повышение скрытности систем за счет "маскировки" и использования средств противодействия</p> <p>Увеличение скорости обработки информации и уменьшение роли субъективного фактора (человека) в принятии решений</p>	<p>Сенсорные активные поля с боевыми автономными системами</p> <p>Поверхности с активной защитой</p> <p>Сверхминиатюрное оружие для противодействия мини- и микроразмерным объектам</p> <p>Средства электромагнитного и акустического воздействия</p>	<p>Системный мониторинг среды</p> <p>Инкапсуляция объектов</p> <p>Маскирующие защитные покрытия</p> <p>Информационные помехозащищенные распределенные системы</p>

редь, на обеспечение безопасности государства, жизнедеятельности человека и особо опасных производственных объектов.

Общие тенденции в создании системы обеспечения безопасности различного функционального назначения с учетом внедрения в практику продукции наноиндустрии иллюстрирует табл.3.

Не отрицая важности экономических критериев при оценке эффективности наноиндустрии в формировании промышленного и социального секторов экономики, особо выделим ее роль как фактора обеспечения безопасности, обороноспособности и технологической независимости государства.

Наиболее актуальными вопросами при этом остаются:

- наличие угрозы;
- источник угрозы;
- степень угрозы;
- момент наступления угрозы;
- способ выявления угрозы;
- способ предотвращения угрозы;
- способ адекватного ответа на угрозу.

С учетом новизны и интеллектуальной закрытости рассматриваемой области ответы на данные вопросы могут быть даны лишь при возможности реального, на уровне "знаний-умений", анализа внешней информации, а также при наличии собственной научной и технологической базы и соответствующего кадрового потенциала.

На этапе перехода от "микро" к "нано", требующего огромного научного задела, экономического потенциала и высокообразованного кадрового обеспечения в качестве стимулирующего фактора в отношениях между различными государствами или фирмами на мировом рынке товаров и услуг будет являться фактор абсолютного превосходства над конкурентом. К данной ситуации уже сейчас применим известный афоризм: *"Имей, что знаешь"*. В то же время, отсутствие научного и образовательного базисов и, безусловно, экономического потенциала для создания или приобретения современного оборудования дает повод использовать другой афоризм: *"Знай, что имеешь"*.

К сожалению, в условиях современной России последний афоризм достаточно долго доминировал над первым, и реальность данной угрозы вполне очевидна, поскольку время не работает на нас.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лучинин В.В.** Индустрия наносистем. Системный подход. Дополнение №3 к книге Ч. Пул, Ф. Оуэнс. Нанотехнологии. 3 изд-е. – М.: Техносфера, 2007, с. 346–375.
2. Закон Российской Федерации "О безопасности" (в редакции Указа Президента Российской Федерации от 24.12.1993 г. № 2288).
3. **Лучинин В.В.** Введение в индустрию наносистем. – Нано- и микросистемная техника, 2007, №8 (85), с. 2–7.
4. **Альтман Ю.** Военные нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2006. – 421 с.
5. **Ratner D., Ratner M.** Nanotechnology and Homeland Security/PRENTICE HALL, 2004. – 145 p.
6. **Телец В., Алфимов С., Иванов А., Митин Ю., Борисов А., Истомина Е.** Прикладные аспекты нанотехнологий. – Наноиндустрия, 2007, № 2, с. 16–23.
7. **Лучинин В.В.** Наноиндустрия и "человеческий капитал". – Наноиндустрия, 2007, № 6, с. 2–8.
8. **Зимица Т.М., Лучинин В.В.** От сенсоров к микроаналитическим системам. Дополнение к книге Б. Эггинс. Химические и биологические сенсоры. – М.: Техносфера, 2005, с. 302–324.
9. **Лучинин В.В.** Проблемы обеспечения информационной безопасности на микро- и наноуровнях. – Петербургский журнал электроники, 2006, № 3, с. 3–9.
10. **Лучинин В.В., Мальцев П.П.** Биомолекулы как базис информационных систем будущего. – Информационные технологии, 1997, № 5, с. 36–41.

НОВЫЕ КНИГИ

Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения - 2008 год
Сборник под редакцией д.т.н., профессора **П.П. Мальцева**. – М.: Техносфера, 2008. – 416 с., ISBN 978-5-94836-180-2

Издание является продолжением серии публикаций издательства "Техносфера" по мировым достижениям в области нанотехнологий. Книга включает материалы, опубликованные в 2006-2008 гг. в журнале "Нано- и микросистемная техника" и сгруппированные по разделам: наноматериалы, наноэлектроника, нанодатчики и наноустройства, диагностика наноструктур и наноматериалов, нанобиотехнология, применение нанотехнологий в медицине.

В иллюстрированном издании представлены примеры реализации и применения технологии формирования наноструктур, методов исследования наноматериалов, метрологического обеспечения и основ технологии наносистемной техники.

По просьбе читателей в книгу введен раздел АНГЛО-РУССКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ ПО МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКЕ.

Сборник представляет интерес для ученых, инженеров и преподавателей высшей школы, аспирантов и студентов, специализирующихся в области нанотехнологий, наноматериалов, наноэлектроники, микро- и наносистемной техники.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319 Москва, а/я 91
По тел./факсу: (495) 956-3346, 234-0110
E-mail: nig@technosphera.ru; sales@technosphera.ru