

ПЕРСПЕКТИВЫ КОММЕРЦИАЛИЗАЦИИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ЭКОНОМИКИ*

МАТЮШЕНКО И. Ю.

кандидат технических наук

Харьков

К началу XXI века мировое сообщество признало, что нанотехнологии в некоторых отношениях значительно отличаются от других «волн» технологического прогресса. Прежде всего, нанотехнология связана с существенной сменой парадигм развития, поэтому она создает не только новые товары, но и новые потребности или рынки, одновременно обещая существенно сократить стоимость товаров и повысить их качество.

По данным The Global Technology Revolution 2020, In-Depth Analyses 2006, нанотехнологии названы одной из четырех основных технологий будущего наряду с биотехнологиями, информационными технологиями и технологиями материалов (в перечне 16-ти самых перспективных технологий 2020 года).

Многие запатентованные идеи нанотехнологии могут иметь множество приложений, что создает сложности для инвесторов. Возможно, уже в ближайшем будущем, инвесторы и юристы смогут выработать новую модель развития бизнеса, соответствующую особенностям нанотехнологических инноваций и желаниям инвесторов расширить рамки возможного применения и коммерциализации (например, разделив права интеллектуальной собственности в этой области на «ядро» идеи и возможные приложения, позволяющие создавать новые продукты). Коммерциализация всегда является опасным и рискованным бизнесом, так как новые товары подразумевают «совместимость» наноустройств с макроокружением, организацию крупномасштабного производства и получение необходимых разрешений соответствующих государственных структур.

Выработка разумной стратегии при коммерциализации нанотехнологий основана на следующих принципах: ясное представление о научно-технических возможностях нанотехнологий, уверенность в революционной природе новых технологий и неизбежности их быстрого развития, точное знание существующей структуры рынка, его потребностей и ожиданий.

Поэтому проблема определения наиболее перспективных направлений вложения средств в нанотехнологические разработки является актуальной для всех ведущих стран мира, являющихся сегодня технологическими лидерами.

1. Особенности рынка нанотехнологий

Сегодня на рынке нанотехнологий присутствуют три субъекта [1, с. 188 – 190]:

1) *Исследовательские лаборатории университетов, национальные лаборатории (например, в США),*

государственные программы национальных агентств и министерств, междисциплинарные центры – занимаются исследованием фундаментального поведения наноструктур, то есть созданием фундамента, на основе которого могут получиться коммерческие продукты или возникнуть даже целые новые интересные области, для которых необходимы огромные средства. Кроме того, нанонаучные исследования в большинстве случаев требуют глубоких научных знаний уровня минимум кандидата наук. Поэтому существует проблема защиты от «утечки мозгов», когда передовые исследователи, сделавшие ценное коммерческое открытие, стоят перед выбором: основать новую компанию, запатентовать открытие, сделать его общедоступным или доверит своему институту;

2) *Большие корпорации* с возможностью исследования, разработки, производства, маркетинга и распределения (например, Merck, IBM, Dow, Kraft, 3M, Hewlett Packard, Agilent, Lucent Technologies, Cisco, Sony, Siemens, Hitachi и др.) и работающие, в основном, с эволюционными технологиями. Многие из них уже внедряют нанотехнологии в существующие продукты, и они будут заинтересованы в том, чтобы производство и распределение было дорогим, что позволит им сыграть на эффекте масштаба. Проблемой этих компаний является медленный и громоздкий процесс одобрения, принятия и коммерциализации новых продуктов;

3) *Новые развивающиеся компании (стартапы)*, которые при перспективе прибыли 50/50 могут добиться успеха именно с революционными технологиями.

Пока что большинство сфер применения нанонауки приходится на бытовую, медицинскую, информационную, энергетическую и сельскохозяйственную отрасли. Это значит, что большая часть прибыли, скорее всего, окажется в руках основных промышленных гигантов, уже присутствующих на рынках. Инвестиции в новые компании среднего размера и развивающиеся фирмы с акцентом на нанотехнологиях окупятся, скорее всего, в сфере биотехнологий из-за того, что новые и молодые компании имеют свои продукты, процессы, ноу-хау и интеллектуальную собственность. Они становятся очень привлекательными кандидатами на поглощение другими компаниями и в общем случае покупаются большими игроками рынка. Это приносит выгоду обеим сторонам. Инвесторам и разработчикам малых компаний это экономически выгодно: продукты разрабатываются быстро и эффективно, а при их доставке собственно на рынок используются влияние, каналы и схемы распределения больших игроков.

Нанотехнологии улучшают многие эволюционные и революционные технологии, в тоже время бизнес нанотехнологий отличается от технологического и Интернет-бизнеса несколькими ключевыми моментами:

* Начало. Продолжение см. в следующем номере

1) Нанотехнологии построены на *защищенной интеллектуальной собственности*, которую можно запатентовать и которую может быть трудно скопировать. Время, требуемое на дублирование продукта или процесса, часто измеряется годами, а не месяцами, и конкурент должен выбрать достаточно отличающийся подход или лицензировать существующий патент. Для нанотехнологий характерны действительно революционные изобретения, защитив которые можно будет заставить платить любого, кто хочет его использовать – даже наибольшие, развитые компании. Это может создать серьезный барьер при выходе на рынок и снизить шансы того, что компания будет задавлена ценовой политикой хорошо подготовленных конкурентов;

2) В сфере нанотехнологий *нет процесса адаптации продукта*, убеждающего потребителя, что нужно пользоваться более быстрым компьютером с наночипом или принимать наномедицименты. Инженерам и врачам, возможно, потребуются дополнительное обучение; машинные цеха и сборочные конвейеры нужно будет переоборудовать, но это в целом не повлияет на спрос на новые продукты, когда они станут доступны;

3) *Длительный процесс разработки продукта* бьет и по производителю, и по конкуренту. Он не только создает ограждающий барьер, но и означает, что продукты должны иметь больше времени для выхода на рынок. Инвесторам, которые привыкли к ожидаемой окупаемости инвестиций в два-три года, будет сложно иметь дело с более длительными и малопредсказуемыми исследованиями и разработками. Это, вероятно, для достижения коммерческого успеха вызовет необходимость решать вопросы интеграции систем и производства;

4) Идеи новых компаний далеко не всегда приходят от людей, имеющих данные предпринимателей. Часто это люди – ученые и инженеры, и их необходимо окружить сильными командами менеджеров, способных управлять деньгами, людьми, связями. *Потребуется команды по продажам и разработке продуктов, исследовательские команды*, за которыми нужно вести тщательное наблюдение, чтобы они не превысили бюджет и разрабатывали прибыльные продукты. Предприниматели, идущие на риск, и другие вкладчики в акционерный капитал могут не понимать науки, стоящей за новыми продуктами, но они должны понимать бизнес и людей. В нанотехнологических фирмах гораздо сложнее устранить или обойти решения учредителей, владеющих интеллектуальной собственностью (хотя существуют способы, не позволяющие им передавать идеи другим предприятиям);

5) Нанотехнологические компании, после того, как они изобретают продукт или процесс, могут попытаться производить его, лицензировать или продать права (или всю компанию). Делая ставку на лицензирование и сбор гонораров (но не акционируясь), эти деньги можно будет вкладывать в родственные исследования, позволяющие компании разносторонне развиваться. То есть этот подход заключается в *создании движения капитала с минимальными накладными расходами*. Если поток капитала достаточный, то компании не нужно становиться открытой или продаваться инвесторам для получения денег (это альтернативная стратегия ликвидности). Данная стратегия позволяет выделять огромные суммы на текущие операции, поскольку отчеты,

проверки, регистрация и другие атрибуты открытой компании могут высасывать слишком много времени и ресурсов;

6) В прошлом, например американские компании, занимающиеся высокими технологиями, старались обходиться без государственной поддержки и полагались почти исключительно на частный капитал и ресурсы. Сегодня понимание того, что нанотехнологии действительно глобальны и могут преобразовать все сферы жизни общества, привело к пониманию, что *без сильной государственной поддержки на ранних этапах* ни одна страна не сможет удержать лидирующее положение в науке, которая может изменить все. В США активно работают государственные программы в виде грантов, начальных капиталов и инвестиций на пером этапе, например такие, как Small Business Innovation Research (SBIR), Small Business Technology Transfer (STTR), которые могут предоставить ресурсы, достаточные для открытия бизнеса (в частности некоторые ресурсы Национальной нанотехнологической инициативы (NNI));

7) Кроме проблемы недостаточного финансирования существует и проблема *избыточного финансирования*, когда компания необоснованно завышает расходы, подрыывая капитал и снижая окупаемость. В нанотехнологических компаниях этого можно избежать, согласовав вначале с инвестором *вехи проекта*, подготовив подробный бюджет и делая бизнес насколько возможно малым и насколько необходимо большим. Однако создание вех проекта может быть сложным для инвестора в настолько технической области, как нанотехнологии. Сегодня быстро расширяется практика привлечения ведущих специалистов из исследовательских институтов в качестве консультантов больших промышленных фирм на контрактной основе. Это приводит к более строгому анализу новой концепции, идеи и лучшему пониманию сути – действительно ли она так хороша, чтобы это было правдой. Хотя такие консультации и дороги, они помогают сберечь миллионы вложенных долларов. Некоторые институты, занимающиеся нанотехнологиями, также учреждают программы партнерства университет-промышленность, которые идеально подходят для описанной схемы и позволяют обучить инвестора (который приносит свой опыт ведения бизнеса, управления риском и заключения сделок) основным аспектам, позволяющим контролировать техническую сторону дела.

С точки зрения коммерциализации *инновационные фирмы* (старт-апы) в сфере нанотехнологий целесообразно разделить на шесть больших групп, в соответствии с областью научных интересов и приложений: наноматериалы и их обработка; нанобиотехнологии; наноэлектроника; нанофотоника; инструментальная база нанотехнологий; нанопроекты в области программного обеспечения (табл. 1) [2, с. 91 – 92].

Задача заключается не в том, чтобы построить бизнес, подходящий для нанотехнологий, а в том, чтобы создать нанотехнологии, подходящие для бизнеса.

Кроме того, к особенностям, характерным для «молодых» технологий, следует отнести [3, с. 52]:

– необходимость разработки точной *измерительной аппаратуры*, систематизированной *программы испытаний* и согласованных *стандартов* на количественные и качественные характеристики для нарастающего числа новых материалов с новыми свойствами;

Направления коммерциализации нанотехнологий с точки зрения инновационных фирм

| № | Область научных интересов и приложений | Достигнутые успехи | Перспективные направления |
|----|---|---|---|
| 1. | Наноматериалы | Множество материалов уже выпускается коммерчески, так как новые материалы значительно превосходят существующие по важнейшим характеристикам (прочность, сопротивление нагрузкам и «царапанию», высокие коэффициенты электро- и теплопроводности, износостойкости и т. д.) | – Расширение производства; – Развитие методов обработки или применения новых материалов исходя из необычных свойств и возможностей |
| 2. | Нанобиотехнологии | Применения нанотехнологий к биологическим системам: новые методы терапии, направленная доставка лекарств в организме, диагностические датчики и т. п.) | Принципиально новые направления, связанные с молекулярной биологией: детектирование и изучение генов, белков, фрагментов ДНК, отдельных молекул и т. д.) |
| 3. | Наноэлектроника | Создано множество устройств с совершенно новыми функциональными особенностями, которые значительно превосходят существующие по цене и важнейшим техническим характеристикам: очень низкое энергопотребление (наноВатт), исключительную плотность монтажа (1 трлн элементов/см ²) и сверхвысокое быстродействие (частота переключения 1 ТГц). | – Логические элементы с большим числом состояний; – Многоцветные фотоизлучающие диоды с высоким квантовым выходом; – Энергонезависимые запоминающие устройства; – Лазеры на квантовых точках; – Датчики универсального типа и т. п. |
| 4. | Нанофотоника | Использование нанотехнологий и наноматериалов для выпуска оптических устройств с высокой степенью интеграции, работающих на парциальных волнах, а также применение таких устройств в сочетании с коммерчески производимыми МОП-структурами. Новые устройства позволяют объединить электронные и фотонные компоненты в одном чипе за счет достаточно сложных технологических операций. | Скорое появление на рынке дешевых и высокоэффективных оптоэлектронных устройств разного типа: – преобразователи длин волн; – перестраиваемые фильтры; – устройства совмещения поляризации пучков; – перестраиваемые мультиплексоры; – оптические приемопередатчики и т. п. |
| 5. | Контрольно-измерительная аппаратура для нанонауки | Приборы и инструменты, позволяющие изучать химический состав и строение вещества в необходимом диапазоне (значительно ниже 100 нм) – микроскопическая техника: сканирующие и трансмиссионные электронные микроскопы, атомно-силовые микроскопы и т. п. | Новейшая техника:– нанолитография;– атомные зондовые микроскопы, позволяющие изучать трехмерную структуру и атомарный состав твердых тел и пленок. |
| 6. | Нанософтвза (nanosoftware) | Хеминформатика (cheminformatics), связанная с моделированием и расчетом новых материалов | – Биоинформатика (bioinformatics) – специализированная разработка средств изучения и тестирования новых биотехнологических препаратов; – Разработка архитектуры электронных и фотонных устройств; – Методы моделирования и автоматической обработки данных по электронным структурам, квантовое моделирование; – Автоматическое управление приборами и микроскопами, программы по обработке данных, получаемых на приборах нового типа в нанотехнологических исследованиях |

– решение проблемы *безопасности использования* материалов и изделий неизвестных ранее видов. Например, стало ясно, что наночастицы могут беспрепятственно проникать через все защитные системы человеческого организма, включая кожу и стенки сосудов кровеносной системы. Сегодня стоит вопрос об изучении возможности токсичного воздействия разнообразных наночастиц на организм и окружающую среду в целом, а также законодательного оформления и выработки общественной позиции.

2. Перспективные направления коммерциализации нанотехнологий

Сегодня нанотехнологии используются в производстве как минимум 80 групп потребительских товаров и свыше 600 видов сырьевых материалов, комплектующих изделий и промышленного оборудования. На полученную с применением нанотехнологий продукцию приходится около 0,01% мирового ВВП, а к 2015-у году этот показатель может составить уже 0,5 – 0,7%. Крупнейшими потребителями нанотоваров являются компании по

охране окружающей среды (56% общего объема рынка), электроники (20,8%) и энергетики (14,1%) [4, с. 20 – 22].

Современные приложения нанотехнологий, направленные на решение глобальных проблем, представлены в табл. 2 [5, с. 51 – 52].

Насколько необычны структура и свойства наноструктур, настолько же разнообразны и захватывающи возможности их использования в самых разных сферах деятельности человека. В самом общем виде возможности применения наноструктур представлены в табл. 3 [6, с. 276 – 277].

Среди наиболее впечатляющих результатов в области наноматериалов и нанотехнологий можно отметить следующее:

- возрастание прочности и твердости наноструктурированных металлов, что используется, например, при обработке внутренней поверхности труб парогенераторов на атомных станциях;

- добавка нанопорошков в ракетное топливо увеличивает скорость горения топлива, а на основе интеркалированного графита создаются новые взрывчатые вещества с объемным горением;

- фильтры на основе микро- и наномембран резко повышают скорость фильтрации дрожжей при производстве пива, а фильтры из нановолокон и нанотрубок высокоэффективны при очистке воды от бактериофагов (вирусов);

- жидкости, содержащие наночастицы металлов, обладают многократно более высокой теплопроводностью, что позволяет их эффективно использовать в качестве теплоносителей в системах охлаждения;

- покрытия из наноструктурированных материалов характеризуются способностью к самоочищению под действием солнечного излучения, что открывает перспективы производства самоочищающихся строительных материалов и текстиля;

- нанокompозиты твердых веществ обладают повышенной способностью для аккумуляции водорода и высокой проводимостью ионов, что важно для миниатюризации батарей, источников электропитания и для прогнозируемого развития водородной энергетики;

- фармакинетика такого массового лекарства, как аспирин, значительно улучшается в результате его наноструктурирования при механохимической обработке. Для разработки новых эффективных лекарственных средств с бактерицидными и противовирусными средствами успешно используются наночастицы серебра на поверхности цеолитов. Положительные результаты получены при применении магнитных наночастиц при очистке крови от токсинов;

- использование квантовых точек в качестве люминесцирующих наномаркеров биологических объектов позволяет исследовать процессы метаболизма и идентифицировать на ранних стадиях образование раковых клеток.

Массовому применению пока препятствуют главным образом отсутствие удобных высокопроизводительных технологий получения и рассортировки наноструктур и, как следствие, высокая стоимость. В тоже время, в ряде областей это не является решающим фактором. Так, для производства наноэлектроники

Таблица 2

Современные приложения нанотехнологий и глобальные проблемы

| № | Глобальная проблема | Приложения нанотехнологий |
|----|--|--|
| 1. | Депопуляция и старение человечества | 1. Целевая доставка лекарств и протеинов. 2. Биополимеры и заживление биологических тканей. 3. Клиническая и медицинская диагностика. 4. Создание искусственных мускулов, костей, имплантация живых органов. 5. Биомеханика, геномика, биоинформатика и биоинструментарий. 6. Фармацевтика на наноуровне. 7. Регистрация и идентификация канцерогенных тканей, патогенов и биологически вредных агентов. |
| 2. | Недостаток продовольствия | 1. Безопасность в сельском хозяйстве и при производстве пищи. 2. Разработка новых высокопродуктивных сортов растений, животных и др. |
| 3. | Экологические проблемы, защита окружающей среды | 1. Устройства контроля окружающей среды. |
| 4. | Новая энергетика и исчерпание природных ресурсов | 1. Топливные элементы и устройства для хранения энергии. 2. Солнечные элементы. |
| 5. | Переход к новому технологическому укладу | 1. Элементы наноэлектроники и нанопотоники – полупроводниковые транзисторы и лазеры, фотодетекторы, сенсоры и т. д. 2. Устройства сверхплотной записи информации. 3. Телекоммуникационные, информационные и вычислительные технологии, суперкомпьютеры; плоские экраны, видеопроекторы и мониторы компьютеров 4. Молекулярные электронные устройства, в том числе переключатели и электронные схемы на молекулярном уровне; нанолитография и наноимпринтинг. 5. Устройство микро- и наномеханики, в том числе актуаторы и трансдукторы, молекулярные моторы и наномоторы, нанороботы. 6. Нанохимия и катализ, в том числе управление горением, нанесение покрытий, электрохимия; 7. Авиационные, космические и оборонные приложения; 8. Средства обеспечения безопасности и борьбы с терроризмом. |

Возможные применения наноструктур в различных сферах деятельности

| № | Изделия | Характерные свойства и область применения |
|-----|--|---|
| 1. | Новые высокопрочные конструкционные материалы на основе нанотрубок (фуллеренов, нановолокон) как основного несущего компонента или наполнителя в композиционных материалах | Конструкционные материалы с рекордными значениями прочности на сжатие, растяжение и изгиб (от 10 до 100 ГПа), что в десятки раз выше, чем у высокопрочных сталей при плотности в 6 раз меньше. Упрочнение наночастицами автомобильных покрышек, полимеров, лакокрасочных покрытий, стекла, бетона |
| 2. | Ультратвердые покрытия (на уровне твердости алмаза и выше) | Инструмент, трущиеся пары, износостойкие материалы |
| 3. | Смазочные составы и присадки к маслам | Для работы в экстремальных условиях и повышения служебных характеристик пар трения |
| 4. | Контейнеры водородного топлива | Элементы химических источников тока, в частности литиевых батарей |
| 5. | Наносенсоры | Для регистрации различных физических и химических воздействий |
| 6. | Контрастирующее вещество | Для магнитно-резонансной томографии на основе парамагнитных атомов, помещенных в фуллереновый каркас. Они менее токсичны, чем обычно применяемые хелатные комплексы, и позволяют получать более четкие изображения |
| 7. | Зонды | Для сканирующей микроскопии, атомных манипуляторов, наномеханических накопителей информации |
| 8. | Нанопроводники, нанорезисторы, нанотранзисторы, нанооптические элементы | Нанооптоэлектроника нового поколения |
| 9. | Защитные экраны | Защита от электромагнитного излучения, высоких температур, технологий «стелс» (невидимые для радаров поверхности) |
| 10. | Наноконтейнеры | Для доставки и индивидуальной дозировки лекарств, диагностических средств |
| 11. | Острия | Для создания крупногабаритных плоскпанельных дисплеев высоких четкости и яркости |
| 12. | Сверхпрочные канаты | Для запуска и удержания спутников на геостационарной орбите |

ки, фотонных приборов, сенсоров не нужно большое количество материала. Кроме того, возможности применения новых продуктов и технологий в оборонной промышленности, национальной безопасности, медицине слабо зависят от их стоимости.

Рассмотрим более подробно перспективы использования нанотехнологий и их продуктов в соответствии со сферами научных интересов и приложений (см. табл. 1).

Принципиально новые свойства наноматериалов связаны в первую очередь с квантованием энергетического спектра квазичастиц в нанобъектах и структурах пониженной размерности, что наиболее ярко проявляется в фундаментальном изменении свойств полупроводников, магнетиков, органических и углеродных материалов, молекулярных ансамблей. Многие из кардинально отличных свойств наноматериалов по отношению к объемным материалам того же химического состава обусловлены эффектами многократного увеличения доли поверхности нанозерен и нанокластеров (до сотен квадратных метров на грамм). С этим связаны новые свойства многих конструкционных и неограниченных наноматериалов.

В табл. 4 представлены основные перспективные направления применения наноматериалов [7, с. 20 – 33; 8, с. 99 – 108].

Основные функциональные свойства различных материалов, которые можно улучшить за счет применения наноматериалов и нанотехнологий, представлены в табл. 5 [8, с. 160].

Следует отметить, что в нанотехнологиях пока (в силу молодости новой науки!) используются в основном

лишь химически однородные типы материалов или структур. В дальнейшем могут стать чрезвычайно перспективными изучение и использование различных сочетаний разнородных наноматериалов, позволяющее получить большое число новых материалов зачастую с неожиданными свойствами. Так, возможны бинарные сочетания различных нанобъектов при создании композиционных материалов: нульмерных (нанокластеры, нанокристаллы), одномерных (нанотрубки, нанопроволоки), двумерных (тонкие пленки, тонкие островные структуры), трехмерных (аэрогели, полимеры). Всего возможны 28 типов композиционных материалов [9, с. 219].

Краткий обзор мировых компаний-производителей наноматериалов в 2009 году представлен в табл. 6 [10, с. 33 – 34].

Большинство компаний представляют собой предприятия среднего уровня и производят продукцию для так называемых узких рыночных ниш. Их производственные мощности ограничиваются рыночными требованиями, причем возможность производить существенные промышленные объемы нанопродукции (в масштабе тонн) имеет лишь небольшое число компаний.

Типы нанопродукции, производимые крупнейшими компаниями, распределяются следующим образом: наночастицы (54%), нанотрубки (19%), фуллерены (7%), пористые материалы (7%), квантовые точки (6%), нановолокна (3%), нанопровода (2%), дендримеры (2%) [10, с. 36].

Большую часть от производства наноматериалов составляют углеродные нанотрубки, а также металлические и металло-оксидные порошки. На втором месте – смешанные металлические оксиды, неоксидные материалы и силикаты. Такие органические частицы,

как дендримеры, пока занимают незначительную часть от общего объема нанопроизводства, хотя в этой области ведется активная работа.

В промышленности в основном используют одинарные или многостенные углеродные нанотрубки. На сегодняшний день в мире существует всего несколько (не более 50 компаний) производителей этих нанотрубок, и их производственная способность составляет от нескольких десятков грамм до нескольких сотен килограмм углеродных нанотрубок в год. Общемировая годовая производственная емкость для одинарных нанотрубок составляет 10 – 15 тонн, а для многостенных нанотрубок – 100 – 120 тонн. Основными производителями нанотрубок обоих типов являются США, Китай и Япония.

В табл. 7 представлено настоящее и будущее в применении наночастиц [10, с. 54 – 56].

Сегодня все более широкое распространение в коммерческом использовании находят продукты, уменьшающие трение в трущихся парах. В последние

годы установлено, что при глубокой неравновесности и нелинейности термодинамического процесса при трении возможна самоорганизация и образование особых наноразмерных структур с уникальными трибологическими свойствами. То есть, появилась возможность работы при более совершенной системе, чем трение при граничной смазке. Нанотрибология изучает указанные физико-химические процессы в пределах наноразмеров. В результате проведенных исследований трение теперь представляется не только как разрушительное явление природы – оно в определенных условиях может быть реализовано как самоорганизующийся созидательный процесс, позволяющий разработать новые, ранее неизвестные методы восстановления деталей и технического сервиса машин. К ним, в частности относятся: технология финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО), методы ускоренной приработки (обкатки) деталей машин и оборудования, безразборное восстановление агрегатов и узлов техники при непре-

Таблица 4

Перспективные направления применения наноматериалов

| № | Структура | Вид | Основные физические явления | Применение | Сектор рынка |
|----|---------------------------------|---|---|--|--|
| 1. | Полупроводниковые наноструктуры | Квантовые ямы – системы, в которых имеется размерное квантование движения носителей заряда в одном направлении | – Размерное квантование электронного спектра; – Квантовый эффект Холла; – При специальном приложении – очень высокая подвижность электронов. | – Высокочастотные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов; – Полупроводниковые гетеролазеры и светодиоды от ближнего ИК-диапазона до голубого света; – Лазеры, фотоприемники, модуляторы ИК-диапазона. | Электроника, информационно-коммуникационные технологии (ИКТ), микроэлектроника |
| | | Квантовые проволоки – системы, в которых движение носителей заряда квантовано в двух направлениях | – Квантование проводимости; – Управление их кристаллографической ориентацией; – Сильно коррелированный электронный транспорт | – Перспективный материал для построения полупроводниковых электронных и оптоэлектронных устройств | ИКТ, микроэлектроника |
| | | Квантовые точки – нанообъекты, в которых движение носителей заряда квантовано в трех направлениях | – Одноэлектронные и однофотонные явления | – Лазеры и светодиоды в ближнем ИК-диапазоне; – Фотоприемники для среднего ИК-диапазона; – Однофотонные приемники; – Однофотонные генераторы; – Одноэлектронные транзисторы. | – " – |
| | | Структуры с туннельно-прозрачными барьерами – системы квантовых ям и сверхрешетки | – Резонансное туннелирование; – Формирование мимозонного спектра в сверхрешетках – периодических системах квантовых ям, разделенных барьерами; – Нелинейные электрические и оптические явления в сверхрешетках. | – Резонансно-туннельные диоды (генераторы и смесители в гига- и терагерцовом диапазоне); – Мощные генераторы и смесители на сверхрешетках; – Каскадные лазеры среднего и дальнего ИК-диапазонов | – " – |
| | | Фотонные кристаллы – системы, в которых имеется зонный спектр для фотонов | – Отсутствие пропускания (полное отражение) света в определенном диапазоне частот; – Резонансные фотонные состояния. | – Эффективные лазеры с низкими пороговыми токами; – Системы управления световыми потоками | – " – |

| | | | | | |
|--|--|---|--|---|---|
| 2. | Фуллерено-подобные материалы | <p>Фуллерены – образованы молекулами C_{2n}, имеющими форму сфер или эллипсов и содержащими фрагменты с пятикратной симметрией, несвойственной неорганическим соединениям в природе. <i>Наполненные фуллерены</i> – молекулами газов, органическими и неорганическими молекулами, атомами металлов.</p> | <p>– Размер молекул главного представителя фуллеренов C_{60} составляет 1 нм (возможны многослойные «луковичные» структуры);</p> <p>– Молекула C_{60} признана органической и <i>является связующим звеном между органикой и неорганикой</i>;</p> <p>– Обладают химической стойкостью, высокой прочностью, жесткостью, ударной вязкостью, теплопроводностью и электропроводностью.</p> | <p>– Могут быть диэлектриками, полупроводниками;</p> <p>– Могут обладать металлической и высокотемпературной сверхпроводимостью;</p> <p>– Уникальный материал для электрических проводов, сверхпроводящих соединений и устройств молекулярной электроники;</p> <p>– Благоприятствуют химической сборке элементов различных схем;</p> <p>– Используются при создании средств молекулярной оптоэлектроники, резистов нового поколения;</p> <p>– Перенос и адресная доставка веществ</p> | – " – Энергетика, медицина |
| | | <p>Углеродные нанотрубки – образованы из свернутых по различным направлениям графитовых плоскостей. <i>Наполненные нанотрубки</i> – в том числе фуллеренами меньшего диаметра. <i>Графен</i> – нанотрубка, развернутая в двумерный лист.</p> | <p>– Однослойные и многослойные, имеют разветвления и изгибы;</p> <p>– По прочности значительно превосходят железо и близки к алмазу, а по массе легче пластика;</p> <p>– Могут быть металлами, полуметаллами и полупроводниками;</p> <p>– Графен стабилен, очень гибок, прочен и проводит электрический ток</p> | <p>– Игольчатые щупы сканирующих зондовых микроскопов;</p> <p>– Дисплеи с полевой эмиссией;</p> <p>– Высокопрочные композиционные материалы;</p> <p>– Наномеханизмы со схемами из коротких нанотрубок, полученные путем сборки;</p> <p>– Перенос и адресная доставка веществ (лекарств, водорода и др.);</p> <p>– Графен – перспективная основа гибких наноэлектронных устройств.</p> | – " – Энергетика, медицина |
| | | <p>Нанопена – материал в виде мельчайшей сетки (пены) из нанотрубок</p> | Обладает магнитными свойствами, высокой поглощающей способностью к ИК-излучению | Обнаружение и уничтожение различных опухолей (отслеживание томографом и более интенсивный ИК-нагрев больных тканей) | Медицина |
| | | <p>Нанотрава – состоит из вискероидов – нитевидных кристаллов</p> | Уникальный комплекс свойств | Плетенные материалы или вата | Медицина, строительные материалы |
| | | <p>Аэрогель – класс дисперсных сред, гель, в котором жидкая фаза полностью замещена газообразной</p> | Древовидная сеть из объединенных в кластеры наночастиц, которая при низкой плотности (1 кг/м^3) обладает высокой твердостью, прозрачностью, жаропрочностью. | Пористый и прочный материал, в котором поры могут занимать до 90 – 99% всего объема вещества. | Медицина, строительные материалы |
| | | <p>Дендриды – полимерная структура, состоящая из молекул, имеющих древовидную форму</p> | Разветвленную структуру можно заполнять различными веществами, создавая объекты с соответствующими свойствами. | – Адресная доставка лекарств к пораженным клеткам организма; <p>– Сборка наноэлектронных систем с помощью сканирующей зондовой микроскопии.</p> | Медицина |
| | | 3. | Магнитные наноструктуры | <p><i>Многослойные структуры</i> из сверхтонких ферромагнитных и диамагнитных слоев</p> | Эффект гигантского магнитосопротивления |
| <p><i>Искусственные кристаллы</i>, содержащие магнитные кластеры Mn_{12}, Fe_3</p> | Туннелирование магнитного момента в сверхмалых ферромагнитных частицах | | | – Возможность квантовых переходов между магнитными равновесными состояниями в кластерах; | ИКТ, микроэлектроника |
| 4. | Двумерные многослойные структуры | <i>Искусственные одномерные кристаллы из пленок нанометровой толщины</i> | Обеспечивают наиболее сильное отражение электромагнитных волн | – Для управления излучением в зависимости от материала слоев; | Микроэлектроника, приборы |
| | | | | – Рентгеновские зеркала – для фокусировки излучения синхротронов или рентгеновских трубок на исследуемый объект | |

| | | | | | |
|----|--------------------------------------|------------------------------|---|---|--------------------------------|
| 5. | Молекулярные наноструктуры | <i>Полимеры</i> | Диэлектрические, оптические и люминесцентные свойства | Широко используют в технике и электронике | ИКТ, микроэлектроника, бионика |
| | | <i>Молекулярные ансамбли</i> | Чувствительность и избирательность к внешним воздействиям (свет, атмосфера, вибрация) | – Клеточный транспорт, фотосинтез; – Сенсоры; – Интерфейс между неорганическими материалами | |
| | | <i>Единичные молекулы</i> | Инжекция носителей и туннельный ток в отдельных молекулах | – Молекулярные наномашин и наномоторы; – Динамические молекулярные переключатели; – Транспортировщики энергии; – Устройства распознавания, хранения информации | |
| 6. | Конструкционные наноматериалы | <i>Новые типы материалов</i> | Сочетание высокой прочности и пластичности | – Керамические и композиционные изделия точной формы; – Твердые сплавы для режущих инструментов; – Защитные термо- и коррозионно-стойкие покрытия; – Полимерные композиты повышенной прочности и низкой воспламеняемости | Все отрасли |

Таблица 5

Свойства материалов, улучшаемые за счет применения наноматериалов и нанотехнологий

| № | Свойства | Металлы | Полупроводники | Керамика | Полимеры |
|----|----------------|---------|----------------|----------|----------|
| 1. | Адсорбционные | – | – | – | + |
| 2. | Каталитические | + | – | + | + |
| 3. | Магнитные | + | + | + | – |
| 4. | Механические | + | – | + | + |
| 5. | Оптические | + | + | – | – |
| 6. | Термические | + | + | + | + |
| 7. | Электрические | + | + | – | – |

Таблица 6

Компании по производству наноматериалов в мире в 2009 году

| № | Регион | Страна | Число зарегистрированных компаний по нанотехнологиям | Число компаний, производящих наноматериалы | Число компаний, производящих наночастицы | Производимая продукция |
|----|----------------------------------|-------------------------|--|--|--|--|
| 1. | Северная Америка | США и Канада | 260 | 98 | 19 | Оксиды (Ti, Zn, Ce, Al, Zr, Y, Cu, Mg, Si); люминесцентные квантовые точки; нановолокна, нанотрубки, фуллерены; сплавы MoS ₂ , WS ₂ ; глины, карбиды, нитриды; металлы (Al, Ni, Cu); титанаты (Ba, Sr) |
| 2. | Азия | Китай | 25 | 20 | 10 | Оксиды (Zn, Ti, Ce); нанотрубки; глины, нитриды, карбиды, алмаз |
| | | Япония | 42 | 14 | 3 | Оксиды (Zn, Zr); нанотрубки, фуллерены; серебро |
| | | Корея | 18 | 9 | 7 | Оксиды ITO, ATO, Ce, Ti; металлы Ag и Pd; сплавы WS ₂ и WC/Co; углеродные нанотрубки |
| | | Тайвань | 10 | 3 | 2 | Металлы Ag и Au; оксиды Ti и Zn |
| 3. | Европа и Соединенное Королевство | Германия | 79 | 31 | 5 | Металл Ag; оксиды; керамики, кварц, цеолиты; нанотрубки; диоксид титана |
| | | Франция | 17 | 4 | 2 | Нанотрубки, окись алюминия |
| | | Соединенное Королевство | 63 | 14 | 3 | Нанотрубки; металлы (Al, Cu, Co, Ag, W, Mo); оксиды (ZnO, CuO, ZrO ₂ , Y ₂ O ₃) керамики (SiN, SiC, AlN); сплавы |
| | | Швеция | 7 | 2 | 1 | Коллоидный кварц |
| | | Словакия | 1 | 1 | 1 | Графитные материалы, нанотрубки |
| 4. | Океания | Бельгия | 2 | 1 | 1 | Нанотрубки |
| | | Австралия | 18 | 9 | 2 | (Zn, Al, Ce) |
| 5. | Другие | Израиль | 22 | 9 | 3 | Порошки металлов и оксидов металлов; сплавы Ag Ag/Pd Ag/Pt Ag Au Ni Cu Fe Co Ba |
| | | Кипр | 1 | 1 | 1 | Нанотрубки |

Настоящее и будущее в применении наночастиц

| № | Область применения | В разработке | На рынке | Хорошо изучено |
|----|--------------------------------|---|--|---|
| 1. | Медицина, здравоохранение | <ul style="list-style-type: none"> – Нанокристаллические лекарства для легкого рассасывания; – Вдыхаемый инсулин; – Наносферы для вдыхаемых лекарств; – Стимуляторы роста костей; – Использование квантовых точек для обнаружения вирусов; – Антираковое лечение; – Покрытия для имплантатов (например, гидроксипатит) | <ul style="list-style-type: none"> – Кремы и лосьоны от загара, использующие ZnO и TiO₂; – Молекулярное маркирование: квантовые точки, CdSe; – Средства доставки лекарств с малой растворимостью в воде | <ul style="list-style-type: none"> – Фунгицид на основе ZnO; – Au для биомаркировки и обнаружения; – Агенты контрастного отображения магнитного резонанса, использующие сверхпарамагнетический оксид железа |
| 2. | Производство продуктов питания | Контролируемая доставка гербицидов и пестицидов | – | Добавки в почву на основе железа |
| 3. | Охрана окружающей среды | – | <ul style="list-style-type: none"> – Алюминиевые волокна для очистки воды; – Самоочищающееся стекло с использованием нанопокровов на основе TiO₂; – Фотокаталитические средства очистки воды на основе TiO₂; – Неотражающие покрытия | |
| 4. | Энергетика | Никелевые и металлические гидриды для батарей | Экологически чистые катализаторы, двуокись церия в дизельных двигателях | Катализаторы для двигателей внутреннего сгорания |
| 5. | Материалы и проектирование | <ul style="list-style-type: none"> – Материалы для создания покрытий: WC, TaC TiC, Co; – Свечи зажигания на основе нанометаллов и керамических порошков; – Нанопористые кварцевые аэрогелевые высокоэффективные диэлектрики; – Химические датчики; – Ультрафильтры | <ul style="list-style-type: none"> – Износоустойчивые покрытия на основе Al, YZr₂O₃; – Укрепленные наноглиной полимерные композиты; – Смазывающие гидравлические добавки: CuMoS₂; – Пигменты; – Улучшенные покрытия, устойчивые к царапинам; – Самоочищающееся стекло на основе TiO₂; – Компоненты ракетного топлива на основе Al | <ul style="list-style-type: none"> – Структурное улучшение полимеров и композитов; – Термические спреевые покрытия, основанные на TiO₂, TiSSo и т. д.; – Чернила на металлических порошках: проводящие, магнетические и пр. |
| 6. | Электроника | <ul style="list-style-type: none"> – Магнитные наночастицы для создания запоминающих устройств высокой плотности хранения информации; – Защита от электромагнитных помех с использованием проводящих и магнитных материалов; – Электронные схемы на основе Cu, Al; – Технологии отображения с использованием устройств автоэлектронной эмиссии на основе проводящих оксидов | <ul style="list-style-type: none"> – Феррожидкости на основе магнитных материалов; – Оптикоэлектронные устройства: коммутаторы на основе керамики, легированной редкоземельными элементами; – Проводящие покрытия и ткани на основе керамики, легированной редкоземельными элементами | <ul style="list-style-type: none"> – Управляющие микропроцессоры на основе алюминия и двуокиси церия; – Покрытия и сопутствующие материалы для волокон на основе Si |
| 7. | Товары широкого потребления | | Устройства для борьбы с подделками | <ul style="list-style-type: none"> – Упаковка с использованием силикатов; – Лыжная смазка; – Белье; – Стекланные покрытия для противоослепляющих и незапотевающих зеркал на основе TiO₂; – Спортивные товары: теннисные мячи и ракетки на основе наноглины; – Кафель, покрытый алюминием и другими материалами; – Керамическая сантехника |

рывной обработке и др. В табл. 8 представлены обобщенные данные дисперсных материалов, обеспечивающих улучшение характеристик покрытий [8, с. 259].

В перспективе возможность нанесения покрытий (например, методом ФАБО) на стальные и чугунные детали позволит осуществить полную замену деталей из цветных сплавов. Применение композиционных материалов позволило произвести на ряде машин замену подшипников качения опорами скольжения и добиться значительно более высокого межремонтного ресурса и более высокого качества восстановленных деталей.

Наноматериалы находят все более широкое применение в различных препаратах *автохимии*: ремонтно-эксплуатационных добавках к топливу и смазочным материалам (для безразборного восстановления агрегатов и узлов техники в процессе их непрерывной эксплуатации), шампунях и полиролях.

Использование принципов, по которым живая природа выстраивает чрезвычайно эффективные наноструктуры, может оказаться исключительно полезным в создании высокоэффективных катализаторов, высококачественных полимеров, мембранных структур с управляемой селективной проницаемостью, новых ле-

карственных средств и методов диагностики болезней, наномашин и нанороботов, наноэлектроники и многого другого. По этим причинам темпы развития биотехнологий, темпы инвестирования в них, объемов сбыта в этой сфере растут даже быстрее, чем в среднем для нанотехнологии. В табл. 9 представлена краткая сводка направлений развития и сфер применения нанобиотехнологии [11, с. 441 – 442].

Очень ярко проявляются практические результаты нанотехнологии в области электроники. В табл. 10 представлены основные показатели, характеризующие мировой рынок электронной промышленности [8, с. 209 – 211].

При этом среднегодовые темпы роста рынка электронной промышленности и связанных с ней других отраслей составляют более 7% в год.

Наиболее реально ожидаемое и самое эффективное практическое применение нанотехнологии должны получить в области *накопления и хранения информации*, поскольку компьютерная память основана на том, что бит (единица информации) задается состоянием среды (магнитной, электрической, оптической), в которой записывается информация. На поверхности можно реали-

Таблица 8

Обобщенные данные дисперсных материалов, обеспечивающих улучшение характеристик покрытий

| № | Свойства покрытия | Дисперсные материалы |
|-----|--|--|
| 1. | Твердость и износостойкость | Al ₂ O ₃ , WC, ZrO ₂ , TiC, HfB ₂ , ZrB ₂ , B ₄ C, BN, B, Cr ₃ B ₂ , ZrC, ThO ₂ , CeO ₂ , TaC, WS ₂ , алмаз |
| 2. | Износостойкость в условиях сухого трения и повышенных температур | Al ₂ O ₃ , TiB ₂ , SiC, C |
| 3. | Жаростойкость | Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , C, B, B ₄ C, ZrO ₂ |
| 4. | Коррозионная стойкость | Аморфный бор, каолин, ZrB ₂ , Al ₂ O ₃ , SiC |
| 5. | Антифрикционность | Аморфный бор, CuF ₂ , WC, MoS ₂ , BN, BaSO ₄ , ПВХ, ПЭ |
| 6. | Термостойкость | Окислы, карбиды |
| 7. | Пористость | Карбонильный никель |
| 8. | Самосмазывание | Фторированный графит, графит, MoS ₂ , BN, WS ₂ , CaF ₂ , слюда |
| 9. | Теплопроводность | Политетрафторэтилен |
| 10. | Эрозионная стойкость | Карбиды |
| 11. | Прочность | Al ₂ O ₃ , SiC |
| 12. | Сопrotивление схватыванию | Аморфный бор |

Таблица 9

Основные направления развития нанобиотехнологии

| № | Отрасль | Конкретные примеры |
|----|-------------------------------|--|
| 1. | Медицина | Доставка лекарственных препаратов и генов внутрь клетки, использование ферментов и микроорганизмов при производстве сложных лекарств, синтез новых антибиотиков, диагностика и микро/нанохирургия, разработка биосовместимых поверхностей контакта и материалов для протезирования и имплантации |
| 2. | Генная инженерия | Секвенирование и модификация ДНК |
| 3. | Сельское хозяйство | Получение новых штаммов микроорганизмов, новые методы селекции растений и животных (включая клонирование) |
| 4. | Пищевая промышленность | Создание новых методов переработки и хранения пищевых продуктов, синтез белка с одноклеточными организмами |
| 5. | Химическая промышленность | Новые эффективные катализаторы, мембранные технологии |
| 6. | Контроль за окружающей средой | Совершенствование методов тестирования и мониторинга, средств детектирования и борьбы с химическим и биологическим оружием, технологии переработки и утилизации отходов |
| 7. | Энергетика | Новые виды топлива, способы его получения, хранения и использования |
| 8. | Наноэлектроника | Сенсорика, биочипы, информационные технологии |
| 9. | Материаловедение | Выщелачивание руд, биосинтез, биоразложение |

Таблиця 10

Показатели, характеризующие мировой рынок электроники

| № | Отрасль | Объем рынка, трлн долл. США |
|----|--|-----------------------------|
| 1. | Отрасли промышленности, связанные с электроникой | 15,0 |
| 2. | Электронное оборудование | Более 1,0 |
| 3. | Полупроводниковые компоненты | 0,205 |
| 4. | Полупроводниковое производственное оборудование | 0,03 |
| 5. | Материалы для производства полупроводников | 0,02 |

зовать ситуацию, при которой 1 бит будет записан в виде скопления, например, 100 или 10 атомов. Вследствие действия различных факторов (геометрических и физических) вместе с уменьшением размеров (повышением компактности) устройств значительно уменьшается и продолжительность протекания разнообразных процессов в конкретной системе, то есть возрастает ее потенциальное быстродействие (в современных компьютерах быстродействие составляет около 1 нс, а при применении ряда наноструктур открывается потенциальная возможность сокращения времени на несколько порядков!). При дальнейшем сокращении размеров в поведении электронов начинают преобладать свойства волны, а не частицы. Вступают в действие законы квантовой динамики, на смену битам приходят квантовые биты.

Существует несколько здравых коммерческих причин, заставляющих все больше снижать геометрические размеры устройств и представленных в табл. 11 [12, с. 12 – 14].

Эти факторы заставляют производителей полупроводниковых устройств инвестировать значительные средства в разработку новых технологий и совершенствование производственного оборудования, что дает возможность переходить от одного поколения ИС к другому каждые 2 – 3 года. И как следствие этого, за последние сорок лет произошло резкое снижение себе-стоимости каждого отдельного транзистора в составе монолитного чипа: если в 1968 году он стоил порядка 2 долл. США,

то в 2008 году – уже менее нанодоллара! В табл. 12 приведен Международный сетевой график технологии полупроводников (ITRS), справочного документа, разработанного совместными усилиями ученых разных стран, где представлены пятнадцатилетние перспективы развития полупроводниковой промышленности [12, С. 12].

Таблиця 12

Международный сетевой график технологии полупроводников (ITRS)

| Год производства | 2001 | 2004 | 2007 | 2010 | 2013 | 2016 |
|---------------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| Размер технологического узла, нм | 130 | 90 | 65 | 45 | 32 | 22 |
| Энергия на одно переключение, фемтоДж | н. д. | 0,137 | - | 0,015 | 0,007 | 0,002 |

Микросистемная техника (МСТ) – одно из наиболее динамично развивающихся в настоящее время междисциплинарных научно-технических направлений, определяющее новую революцию в области систем, реализуемых на микроуровне. Целью этого направления является создание в ограниченном объеме твердого тела или на его поверхности микросистем, представляющих собой упорядоченные композиции областей с заданным составом, структурой и геометрией, статическая или динамическая совокупность которых обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования, передачи энергии и движения в интеграции с процессами восприятия, обработки, трансляции и хранения информации при выполнении запрограммированных операций и действий в требуемых условиях эксплуатации с заданными функциональными, энергетическими, временными и надежностными показателями [13, с. 62]. Примерами традиционных изделий МСТ могут быть: головки для накопителей на жестких дисках и для струйных принтеров, кардиопейсмейкеры, «ин-витро» диагностические приборы, слуховые аппараты, датчики давления, химические сенсоры, акселерометры, гироскопы, микроспектрометры и т. д.

Таблиця 11

Коммерческие причины, заставляющие снижать размеры устройств

| № | Способ | Выгода для производителя |
|----|--|--|
| 1. | Уменьшение размеров транзисторов | Заданное количество транзисторов может разместиться на меньшей площади, что дает возможность сократить физические размеры чипа. Как следствие, из одной подложки может быть произведено большее количество чипов при условии одновременного формирования всех чипов на подложке. Это ведет к увеличению прибыли компаний, выпускающих полупроводниковые устройства |
| 2. | Размещение на одном чипе того же самого размера большего количества транзисторов | При этом на кристалле того же размера, как и раньше, производитель может разместить большее количество узлов разной функциональности, что позволяет изготавливать более сложные информационные системы (ИС) и продавать их по более высокой цене. |
| 3. | Использование подложек большей площади | Чем больше диаметр подложки (2002 г. – 6 дюймов, 2006 г. – 8 дюймов, 2009 г. – 12 дюймов, 2012 г. – 18 дюймов), тем дороже их обработка, что связано с необходимостью разработки или модификации оборудования и большим количеством химикатов для обработки. Однако такой переход на подложки большего диаметра дает возможность производителям повышать свой доход, позволяя значительно увеличивать выпуск полупроводниковых устройств |

Иницирующим фактором в развитии МСТ стало появление микро-электромеханических систем (MEMS – microelectromechanical systems), в которых гальванические связи находятся в тесном взаимодействии с механическими, а также наноэлектромеханических систем (NEMS – nanoelectromechanical systems), при производстве которых используются обе технологические парадигмы «из большего – меньшее» и «из малого – большое» (при этом в значительной степени основываются на нанохимии). Примеры NEMS: микрокантилеверы с интегрированным острым наконечником нанометрового размера для сканирующей туннельной и атомносиловой микроскопии (СТМ и АСМ); DPN-литография для размещения молекул; нанопроволоки; биологические (на основе ДНК) моторы; биосенсоры; молекулярные приводы, основанные на присоединении молекулы бензола к внешним стенкам углеродных нанотрубок; приборы на пленках нанометровой толщины (например, магнитные головки для чтения или магнитные носители и др. [14, с. 40 – 41].

Структура и динамика рынка «перспективных» изделий МСТ, использующих достижения нанотехнологий, представлена в табл. 13, а микросистемы нового поколения – в табл. 14 [13, с. 63 – 66].

Страны, которые в современных условиях фактически определяют научно-технический прогресс, используют по отношению к направлению «микросистемная и наносистемная техника» термин «критические технологии», тем самым придавая программам исследования и разработок статус «национальных», «приоритетных».

В центре исследований, проводимых учеными в энергетической сфере, сегодня стоят проблемы генерирования (преобразования, производства) энергии, ее накопление, передача, а также сохранение. Наиболее

Таблица 13

Структура и динамика рынка изделий МСТ, использующих нанотехнологии

| № | Изделия | Объем рынка в 1996 г. | | Объем рынка в 2002 г. | |
|--------|--|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | | млн штук | млн долл. | млн штук | млн долл. |
| 1. | Системы подачи лекарственных средств | 1 | 10 | 100 | 1000 |
| 2. | Оптические переключатели | 1 | 50 | 40 | 1000 |
| 3. | Лаборатория на чипе: ДНК, жидкостная хроматография высокого разрешения | 0 | 0 | 100 | 1000 |
| 4. | Магнитооптические головки | 0,01 | 1 | 100 | 500 |
| 5. | Проекционные световые затворы | 0,1 | 10 | 1 | ЭСО |
| 6. | Катушки индуктивности на чипе | 20 | 10 | 600 | 100 |
| 7. | Микрореле | – | 0,1 | 50 | 100 |
| 8. | Микро-электродвигатели | 0,1 | 5 | 2 | 80 |
| 9. | Инклинометры (угломеры) | 1 | 10 | 20 | 70 |
| 10. | Впрыскивающие сопла | 10 | 10 | 30 | 30 |
| 11. | Сенсоры для предупреждения столкновения | 0,01 | 0,5 | 2 | 20 |
| 12. | Электронные насосы | 0,001 | 0,1 | 0,05 | 5 |
| Всего: | | 107 | | 4200 | |

Таблица 14

Микросистемы для техники нового поколения

| № | Направления разработок | Назначение | |
|----|---|---|---|
| | | общегражданское | специальное |
| 1. | Сенсоры и трансдютеры | Миниатюрные системы ориентации, навигации и управления | |
| | | Автомобильный и железнодорожный транспорт | Аэрокосмические и ракетноартиллерийские системы |
| | | Акселерометры, миниатюрные автономные системы навигации, совмещенные с космическими GPS-системами, модули контроля положения антенных фазированных решеток, системы катапультирования и индивидуального наведения | |
| 2. | Миниатюрные управляемые радио и оптоэлектронные компоненты, микропривод и микромашины | Миниатюрная управляемая элементная база | |
| | | Гражданское приборостроение | Специальное приборостроение |
| | | Миниатюрные управляемые конденсаторы, резисторы, зеркала, модуляторы, элементы микропривода, микротурбины, микродвигатели, микрогенераторы | |
| 3. | Аналитикотехнологические микросистемы | Миниатюрные аналитикодиагностические чипы и микрохимические реакторы | |
| | | Биотехнология, медицина, нефтехимия, пищевая промышленность | Химическая защита, обнаружение, исследование и утилизация особо опасных веществ |
| 4. | Микро и наноинструмент | Микро и наноманипуляторы, микротехнологические устройства | |
| | | Медицина, микробиология, наноэлектроника | Медицина, наноэлектронные системы специального назначения |
| 5. | Миниатюрные робототехнические системы | Миниатюрные автономные управляемые самодвижущиеся системы | |
| | | Минироботы для диагностики в медицине, ядерной энергетике, химической промышленности | Минироботы для разведки и боевых действий |

ІННОВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ
ЕКОНОМІКА

перспективными направлениями в сфере преобразования и генерации энергии являются *фотовольтаики* (солнечные элементы), *преобразование водорода* (топливные элементы), *термоэлектричество* (термоэлектрические устройства), совершенствование *углеводородной энергетики* (катализаторы, добавки). По данным *The Global Technology Revolution 2020, In-Depth Analyses 2006*, только дешевая солнечная энергетика включена международными экспертами в перечень 16 самых перспективных технологий 2020 года.

В табл. 15 перечислены некоторые наиболее известные мировые нанотехнологические разработки для фотовольтаики, направленные на решение проблем создания и совершенствования новых высокоэффективных материалов и новых устройств, снижения стоимости солнечных батарей и повышения их КПД [8, с. 188 – 190].

В сфере *распределения, передачи, аккумулярования и хранения энергии* наиболее перспективными возможностями применения наноматериалов и нанотехнологий являются высокоэффективные проводящие системы (провода, трансформаторы и другие устройства), а также перезаряжаемые аккумуляторы и суперконденсаторы. В *энергосбережении* наиболее значимые и высокоэффективные сферы применения нанотехнологий открываются при производстве материалов и устройств для улучшения теплоизоляции (аэрогели, умные стекла), более эффективного и экономичного освещения (светодиоды на основе полимерной органики OLED), использования традиционного углеводородного топлива (катализаторы), а также создании более легких материалов в машиностроении и транспорте. ■

Таблица 15

Мировые нанотехнологические разработки для фотовольтаики

| № | Наименование | Основные наноматериалы | Положительный эффект |
|-----|--|--|--|
| 1. | Гибкие органические солнечные батареи | Фуллерены (C60) и гетероструктуры C60 / pSi | Высокая поглощательная способность в коротковолновой области солнечного спектра |
| 2. | Солнечные батареи | Неорганические и органические материалы с нанослоевой и кластернофрактальной структурой | Накопление и энергоперенос |
| 3. | Органические фотоэлементы солнечных батарей | Полимернофуллереновые наноструктуры | Транспорт носителей заряда осуществляется сетью нанокристаллов и органических молекул |
| 4. | Солнечные батареи | Квантовые точки | Улучшение КПД до 42% (теоретически – до 86%) за счет генерации трех электронов на один падающий фотон |
| 5. | Многослойные гетероструктуры: – InGaAs/AlGaAs, InAs/InGaSb; – GeSi | – квантовые ямы; – квантовые точки | Промышленная технология производства фотоприемных модулей ИКдиапазона |
| 6. | Мультикаскадные фотоэлектрические преобразователи | Наногетероструктуры | КПД до 35% при 1000кратном концентрировании наземного солнечного излучения (в два раза дешевле существующих) для концентраторных энергоустановок |
| 7. | Солнечные батареи | Керамические наноматериалы из слоев диоксида титана и кремния толщиной 50 – 100 нм каждый | На треть повышают выработку электроэнергии без увеличения площади солнечных элементов |
| 8. | Солнечные батареи | Металлические наноматериалы (Ag, Cu, Co, Mn, Mg, Zn, Mo, Fe), их оксиды и гидроксиды | Дешевизна батарей, использование физических явлений в этих материалах |
| 9. | Трехмерные солнечные элементы | Углеродные нанотрубки | Повышение коэффициента поглощения солнечной энергии кремниевыми батареями с 67, 4% до 96, 21% |
| 10. | Солнечные батареи | Решетки наноантенн диаметром 2 – 4 мкм | Преобразование в электричество 92% световой энергии (против 80% существующих). Работают ночью за счет утилизации ИК-диапазона (тепла Земли, электронных и других источников) |
| 11. | Солнечные батареи | Поликристаллический кремний (cSi), высокочистые кремнийсодержащие материалы | Устройства для микроэлектроники и фотоэлементы |
| 12. | Солнечные элементы | Аморфный кремний (a Si) | Уменьшение толщины солнечных батарей при повышении эффективности более 10% |
| 13. | Аэрогели | Объединенные в кластеры наночастицы (до 5 нм) и с полостями (до 100 нм), занимающими до 99% объема | Для солнечных коллекторов, обладают необходимой механической прочностью |
| 14. | Солнечные источники энергии | Наноструктуры, сенсбилизированные специальным поглощающим красителем | Потенциал недорогого производства |