

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

УДК 539.2:620.9.004.18

Нанотехнологии для энергосбережения: прогноз наиболее значимых областей исследования

В. В. Сычёв

ВЛАДИМИР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ СЫЧЁВ — кандидат технических наук, научный редактор журнала «Наука и технологии России».

119899 Москва, Ленинские горы, Научный парк МГУ, владение 1, стр. 75г., тел. 8(495) 930-88-50,
E-mail: vsychev@strf.ru, www.strf.ru.

Постановка задачи

Противодействие энергетическому кризису возможно и необходимо выстраивать в разных направлениях. Однако для России одна из самых актуальных и действенных мер – реализация потенциала энергосбережения. Потенциал энергосбережения в нашей стране практически равен объему экспортируемой из России нефти и почти в 10 раз больше, чем вся энергия, вырабатываемая АЭС. Повышение эффективности использования энергии до уровня развитых стран и создание условий для перевода экономики страны на энергосберегающий путь развития — все это позволит избежать дефицита электроэнергии во всех отраслях хозяйства, а также обеспечит экономический рост. Макроэкономический эффект от снижения удельной энергоёмкости ВВП на 1% оценивается ростом национального дохода на 0,4% (<http://lnweb18.worldbank.org/ESSD/envext.nsf/46ByDocName/NationalStrategyStudiesProgramCompletedNationalStrategyStudiesNSS>). На то, чтобы экономить энергию, требуется в среднем в 2-3 раза меньше инвестиций, чем на производство эквивалентного количества энергии.

Повышение энергоэффективности лежит не только в плоскости политической и законодательной. Оно возможно лишь при создании и использовании новых технологических решений. Вот почему в рамках Федеральной целевой программы, возглавляемой федеральным агентством «Роснаука», выделено приоритетное направление «Энергосберегающие технологии». Оно включает такие области исследований:

- водородная энергетика;
- биотопливо и переработка биомассы;
- малая энергетика и энергосберегающие технологии для ЖКХ;
- энергосбережение с помощью новых технологий и агрегатов;
- новые технологии и энергетическое оборудование.

Надо отметить, что аналогичные задачи ставит перед собой и Европейский союз. И хотя энергоэффектив-

ность экономики европейских стран выше, чем в России, в среднем в четыре раза, она еще далека от оптимума. Не говоря уже о том, что большинство европейских стран энергозависимы. Согласно Energy Balances of OECD countries 2003—2004 (2006 Edition), коэффициент самообеспеченности энергоресурсами в Германии составляет 0,3908, во Франции — 0,4994, в Италии — 0,1634, в Великобритании — 0,9637 (в России — 1,8100). Европейские страны обеспокоены своей энергозависимостью и потому строят свою государственную и научно-техническую политику так, чтобы увеличить коэффициент самообеспеченности энергией. Кстати, успех этих программ в Европе будет иметь для России свои неприятные последствия, такие как снижение экспорта ископаемого топлива.

Тем интереснее было бы изучить европейские приоритеты в области энергетики и энергосбережения. Особенно в той части, которая в России только начинает формироваться, — в области нанотехнологий. Их роль во многих случаях может оказаться решающей.

Дорожная карта энергоэффективности

Планирование научно-технической деятельности и научных исследований в западных странах сегодня во многом опирается на прогнозы, или форсайт (foresight — предвидение). Форсайтом занимаются различные группы экспертов, государственные и негосударственные. Их данные структурируются в виде так называемых «дорожных карт», что, по сути, означает «план действий». Но, в отличие от плана действий, дорожные карты можно представить в наглядной форме, в виде схем, показывающих кратчайший маршрут к достижению цели, а также альтернативные обходные пути.

На основании прогнозов европейские эксперты выбрали десять проблем, представляющих части энергетического сектора, в которых нанотехнологии могут сыграть важную роль. Для составления дорожных карт было выделено четыре проблемы (рис.1).

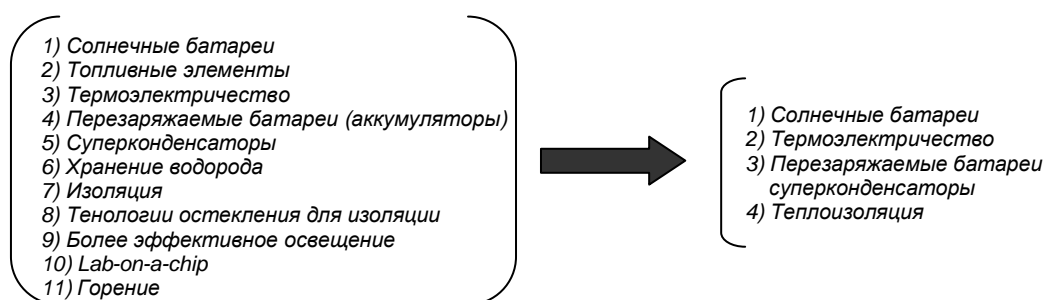


Рис.1.

Солнечные батареи

Материалы, свойства, применения

Фотовольтаика — единственная технология прямого превращения энергии солнечного света в электричество. Солнечные батареи состоят из полупроводникового диода, помещенного между двух проводящих слоев. Когда свет поглощается в полупроводнике, в нем генерируются электроны и дырки, которые диффундируют к электрическим контактам, создавая тем самым электрический ток.

Теоретически могут быть использованы все части видимого спектра, от близкого к инфракрасному до ультрафиолетового, однако это зависит от типа и конфигурации используемых материалов. В некоторых случаях солнечные батареи уже конкурентоспособны, например — в домах в удаленной местности. Однако их дальнейшее внедрение тормозит высокая стоимость и невысокий КПД. Улучшение этих показателей — главное условие развития солнечных батарей. Нанотехнологии могут решить обе проблемы.

Уменьшить стоимость солнечных батарей можно, если использовать более дешевые материалы и более дешевые процессы производства. А чтобы увеличить эффективность батарей, необходимо улучшить их способность поглощать и превращать в электричество как можно больше падающего света. Используя наночастицы, можно увеличить отношение площади поверхности батареи к объему, в результате чего КПД возрастет.

Кремниевые солнечные батареи, на долю которых сегодня приходится 90% рынка фотовольтаических элементов, бывают двух типов: монокристаллические и поликристаллические. Первые имеют наибольший КПД (для коммерческих продуктов обычно 15%, а в лабораторных условиях — до 25%), но, как уже было отмечено выше, такие батареи дороги, так как в них используется сверхчистый полупроводник. Поликристаллические батареи дешевле, но из-за нерегулярностей кристаллической структуры их КПД заметно ниже.

В настоящее время в стадии разработки находится множество различных альтернативных органических и неорганических материалов, кратко описанных ниже.

Аморфные/тонкие пленки. Активные покрытия в виде тонких пленок могут быть нанесены на различные

субстраты, жесткие и гибкие. Сегодня наиболее широко используется аморфный кремний. Солнечные батареи на его основе дешевле кремниекристаллических, поскольку расходуется значительно меньше материала. Однако их КПД сравнительно мал, всего 8%. При производстве тонких пленок используются и другие материалы: диселенид меди и индия и теллурид кадмия. В 2003 г. доля тонкопленочных солнечных батарей в общем объеме производства составляла приблизительно 6%.

Солнечные батареи, сенсibilизированные красителями. Эти батареи конвертируют солнечный свет с помощью механизма, сходного с фотосинтезом растений. Они могут быть изготовлены из дешевых материалов невысокой чистоты с помощью сравнительно дешевых производственных технологий. Свободные электроны образуются при поглощении света молекулой красителя и последовательном их переносе в наноструктурированный оксид титана. КПД таких батарей сравнительно низок — 10% в экспериментальных образцах. Еще одна проблема — трудоемкость производства, поскольку перенос электрона требует наличия электролита. Тем не менее, стоимость таких батарей примерно на 60% меньше, чем кремниевых, поэтому их рыночная доля, возможно, вырастет.

Полимерные батареи. В полимерных батареях в качестве тонких пленок используют некоторые органические полимеры (например, полифениленвинилен), имеющие свойства полупроводников. У них низкая себестоимость, однако низок и КПД. К тому же они чувствительны к воздуху и влажности.

Многослойные солнечные батареи — это батареи, имеющие многослойную структуру. Она формируется из слоев различных полупроводниковых материалов с различной шириной энергетической зоны, последовательно растущих на одном субстрате. В трехслойной батарее уже достигнут КПД 34%. Такие батареи на гетероструктурах сравнительно дороги, однако они могут найти применение, например, в энергетических системах спутников.

Квантовые колодцы, углеродные нанотрубки и фуллерены, нанонити и дендримеры также привлекают к себе внимание как материалы для солнечных батарей. Однако еще слишком рано делать предсказания

о будущем этих технологий применительно к солнечным элементам.

Нанотехнологии пока слабо используются в производстве солнечных батарей. Однако они будут играть все возрастающую роль в будущем в:

- разработке тонких пленок, слоев и поверхностей,
- использовании наночастиц для увеличения рабочей поверхности,
- использовании нанокристаллических материалов,
- создании новых материалов.

Тонкие пленки, слои и поверхности — наиболее интенсивно используемые в производстве солнечных батарей материалы, за которыми следуют нанокристаллические материалы и наночастицы. Эти материалы и технологии станут лидирующими в следующие десять лет наряду с солнечными батареями, сенсibilизированными красителями. Сегодня приложения нанотехнологий в области солнечных батарей находятся на стадии фундаментальных исследований, за исключением тонких пленок и батарей на основе красителей и электролитов, находящихся на стадии первых коммерческих приложений.

Временные рамки для развития технологии

Характеризация материалов, их дизайн и производство станут основной областью исследований вплоть до 2015 г. Цель таких исследований — увеличить фотовольтаический КПД и надежность работы батарей.

К 2010 г. практически все батареи должны выйти на стадию первых коммерческих приложений, а тонкопленочные солнечные батареи — на широкий рынок. К 2015 г. за ними последуют батареи с нанокристаллическими материалами. Ожидается, что батареи на красителях и электролитах, которые уже вышли на рынок в 2005 г. в виде мелкомасштабных приложений, к 2015 г. еще не станут широко используемыми.

Квантовые солнечные батареи в 2015 г. будут в стадии разработки, однако они обладают очень высоким теоретическим КПД (около 86%), а также возможностью поглощать свет выделенных длин волн. Поэтому высокий интерес к квантовым солнечным батареям сохранится. Общая картина развития солнечных батарей к 2015 г. представлена на рис. 2.

Проблемы и барьеры

Как уже было упомянуто выше, основные задачи для развития солнечных батарей — уменьшение их себестоимости и увеличение эффективности (КПД). Кроме того, необходимо увеличить надежность и время жизни этих устройств. В ближайшее время увеличение КПД и уменьшение стоимости, возможно, будут развиваться как две независимые ветви исследований.

Основные исследовательские усилия в ближайшие десять лет должны быть сконцентрированы на решении следующих проблем:

- создание материалов, способных к поглощению большего количества падающего света за счет интеграции в одной батарее набора фотоакцепторов с различной шириной запрещенной зоны или различными спектрами поглощения (квантовые сетки, новые красители, многослойные ультратонкие нанокристаллические материалы — хорошие кандидаты для достижения этой цели);
- максимизация переноса заряда. Для тонкопленочных и многослойных батарей необходима высокая регулярность кристаллической структуры, которую можно получить, используя нанокристаллические материалы. В батареях на основе красителей или полимеров перенос заряда от фотоакцептора к электроду требует электролита. В батареях на основе наночастиц также требуется электролит или наночастицы должны быть расположены достаточно близко друг к другу для прямого переноса заряда;

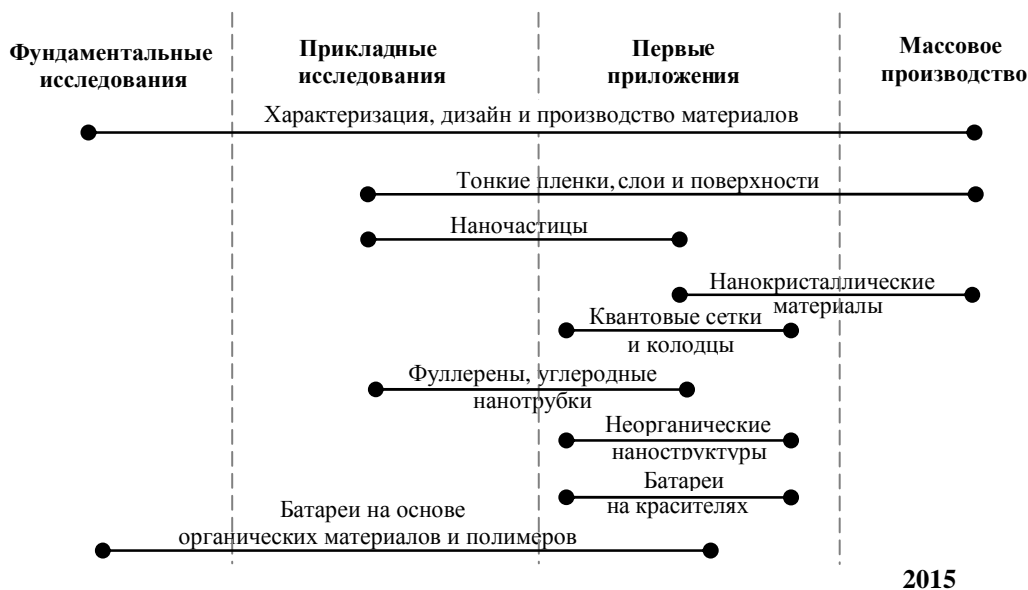


Рис. 2. Стадии развития солнечных батарей на основе нанотехнологий к 2015 г.



Рис. 3.

— гарантия большого времени жизни (надежности) батарей за счет правильной интеграции фотоакцептора, структур переноса заряда и электродов в одном приборе;

— гарантия того, что технологические приемы производства батарей могут быть легко реализованы в промышленных масштабах.

Для гибких солнечных батарей существуют проблемы нанесения пленки на подложку. Высокотемпературные методы хорошо воспроизводимы, но разрушают полимерную основу, а альтернативные низкотемпературные технологии (CVD, газофазная конденсация из пара или аэрозоля) все еще имеют недостатки, которые необходимо преодолеть.

Батареи на основе красителей и электролитов хотя и не способны конкурировать по эффективности с многослойными солнечными батареями, но гораздо более дешевы и легче наносятся на гибкую подложку. Основное направление исследований для них — улучшение устойчивости к окружающей среде (изменениям температуры, влажности и т.д.). Получение и использование новых молекул красителей — другая задача исследований.

На рис. 3 обобщены исследовательские задачи, которые необходимо решить для дальнейшего развития и применения солнечных батарей.

Термоэлектричество

Материалы, свойства, применения

Термоэлектричество — это превращение тепловой энергии в электрическую или наоборот, известное также

как эффект Пельтье-Зеебека. Простейший термоэлектрический (ТЭ) прибор — термопара — состоит из двух материалов, обладающих разной теплопроводностью, которые соединены между собой. Если две части этого соединения находятся при разной температуре, то от одного материала к другому течет электрический ток. И, наоборот, протекание тока через такое соединение приводит к его охлаждению. Такие приборы могут работать как вторичные генераторы, использующие тепло, выделяемое другими генераторами, а также в системах охлаждения.

Хороший термоэлектрический материал должен обладать высокой термосилой (коэффициент Зеебека) для получения достаточного напряжения, высокой электропроводностью для уменьшения необратимых тепловых потерь (джоулево тепло) и низкой теплопроводностью для уменьшения тепловых потерь в соединении. Зависимость эффективности прибора от свойств материала выражается безразмерным параметром — добротностью ZT (T — рабочая температура, число Z пропорционально коэффициенту Зеебека). Наиболее эффективный термоэлектрический материал — полупроводники, обладающие одновременно высокой электропроводностью и низкой теплопроводностью. В настоящее время лучшие термоэлектрические материалы имеют добротность, близкую к единице. Это число рассматривается как необходимый минимум для практического использования материала.

Термоэлектрические материалы используются уже давно, и в целом они надежны. Но из-за невысокого КПД,

обусловленного сравнительно низкой добротностью, использование таких материалов ограничено. Поскольку добротность материалов изменяется с температурой, разные материалы могут быть использованы при разных рабочих температурах. Некоторые материалы хороши для производства энергии при высоких температурах (так как их добротность высока только при таких значениях T), другие — для генерации при средних температурах, третьи — в холодильных установках (высокая добротность при комнатной температуре).

Примеры таких материалов — сплавы висмут-сурьма для холодильных установок, сплавы теллурида свинца для среднетемпературных генераторов, арсенид кобальта (минерал скутеррит) и сплавы кремний-германий для высокотемпературных генераторов.

В ближайшее время нанотехнологии станут чрезвычайно важными для создания технических устройств, работающих на принципе термоэлектричества, поскольку наноструктурированные системы могут обладать очень высокой термоэлектрической добротностью, достигающей значений 3—4. Кристаллические решетки в таких наноматериалах, часто в виде тонких или ультратонких слоев, могут влиять на перенос тепла и/или электронов, одновременно оптимизируя тепло- и электропроводность. Однако в основном использование наноматериалов приводит к уменьшению теплопроводности и слабому изменению электропроводности.

Наиболее удобны для использования в термоэлектрических приложениях тонкие пленки, наночастицы,

суперрешетки. Также могут найти свое применение нанопровода, квантовые колодцы и сетки, неорганические нанотрубки и нанокompозиты, позволяющие уменьшить теплопроводность.

Сегодня рынок термоэлектрических материалов ограничен, однако, вероятно, в ближайшем будущем для них откроются большие коммерческие перспективы. Вот основные области, в которых сосредоточены научные интересы:

- использование «бросового» тепла для производства электрической энергии;
- устройства, в которых необходимо местное охлаждение;
- производство электрической энергии вне систем централизованного энергоснабжения.

В качестве возможных приложений названы:

- термоэлектрические генераторы, трансформирующие тепло, выделяющееся в двигателе автомобиля, в электрическую энергию;
- микроприборы, использующие небольшие количества термоэлектрического материала, нанесенного на поверхность микропроцессора, для его локального охлаждения;
- микрогенераторы и генераторы в космических приложениях.

Временные рамки для развития технологии

Современный рынок термоэлектрических материалов очень узок, а технологии, выделенные экспертами, на-

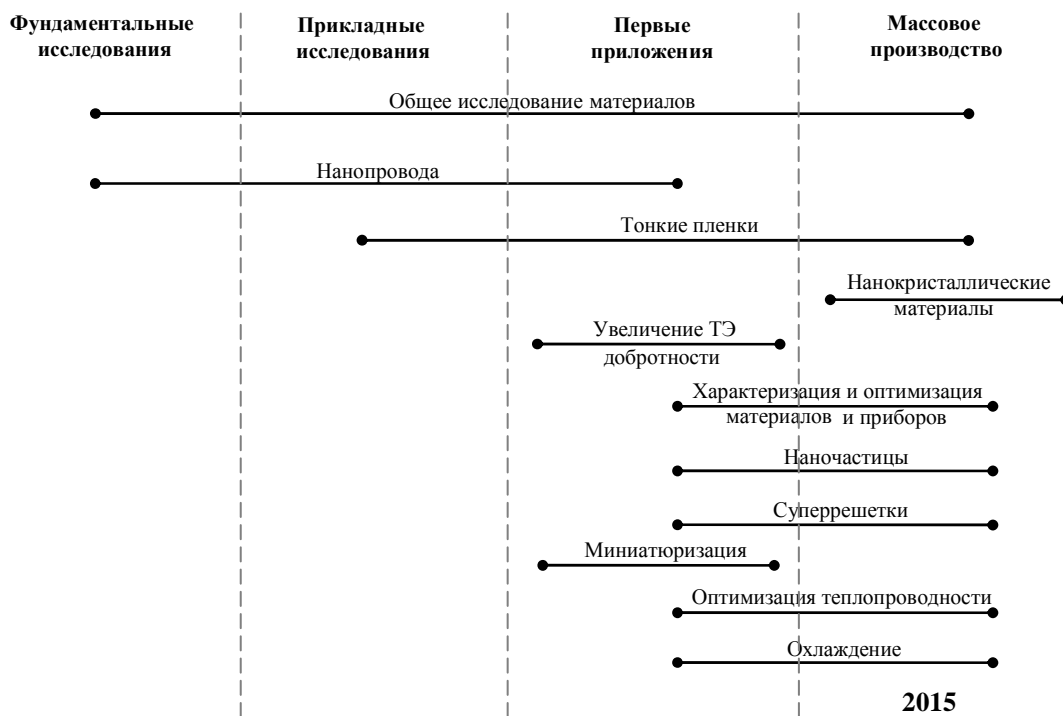


Рис. 4. Стадии развития термоэлектричества на основе нанотехнологий к 2015 г.

ходятся на стадии фундаментальных исследований. Основные усилия сосредоточены на разработке новых материалов, понимании их свойств и развитии приборов и процессов для их производства. К 2010 г. эти исследования, возможно, выльются в разработку некоторых приборов, которые найдут свое применение (например, производство электроэнергии из вторичного тепла) уже к 2015 г. К этому времени на рынок начнут выходить стабилизаторы температуры и охлаждения для электроники и телекоммуникационных систем, позволяющие управлять теплом, выделяемым в приборах. А это, в свою очередь, инициирует разработку более быстрых и мощных приборов.

Для термоэлектрических приложений будут использоваться тонкие пленки, нанокристаллические материалы, наночастицы, нанопровода и суперрешетки. Предсказанные стадии развития различных технологий к 2015 г. показаны на рис. 4.

Проблемы и барьеры

Сегодня главная задача в области термоэлектричества – создание новых материалов, а не их интеграция в новые приборы. Требуются материалы с высокой добротностью (около 3) при комнатной и при высоких температурах. Еще один приоритет — стабильность работы и низкая стоимость производства. Однако последнее требование необязательно, так как выгоды от внедрения наноматериалов могут превзойти ценовой барьер.

Одна из важнейших нерешенных проблем — производство наноматериалов, особенно тонких пленок, в промышленных масштабах. Пока материалы с наилучшими термоэлектрическими свойствами могут быть получены лишь в лабораторных масштабах, и даже в

этих условиях их свойства (размер частиц, дисперсность и т. д.) неоднородны. Для массового производства термоэлектрических генераторов необходимо уменьшить разброс свойств. Это, с одной стороны, требует прецизионных приборов для измерения структурных и термоэлектрических свойств новых материалов на наноуровне, а с другой — способов массового производства таких материалов в виде, пригодном для их инкорпорирования в термоэлектрические приборы. Такие методики как сканирующая термоэлектрическая микроскопия (*SThEM*) станут важными для исследования на наноуровне термопар, состоящих из двух ультратонких слоев.

Нетехнологические барьеры, указанные экспертами, здесь более жесткие, чем в других энергетических приложениях. Это — доступ к инфраструктуре и растущая цена оборудования. На рисунке 5 обобщены требования к исследованиям нанотехнологических приложений в области термоэлектричества.

Перезаряжаемые батареи и суперконденсаторы

Материалы, свойства, применения

Хранить энергию необходимо, когда предложение превышает спрос, а также при работе с импульсными источниками энергии и портативными приборами и инструментами. Сегодня поиск эффективных и надежных систем хранения — чрезвычайно важная задача, поскольку постоянно растет спрос на «портативную» энергию. Кроме того, мы сталкиваемся с необходимостью восстанавливать источники энергии и использовать альтернативные/возобновляемые источники.

Энергию мы умеем хранить в перезаряжаемых бата-

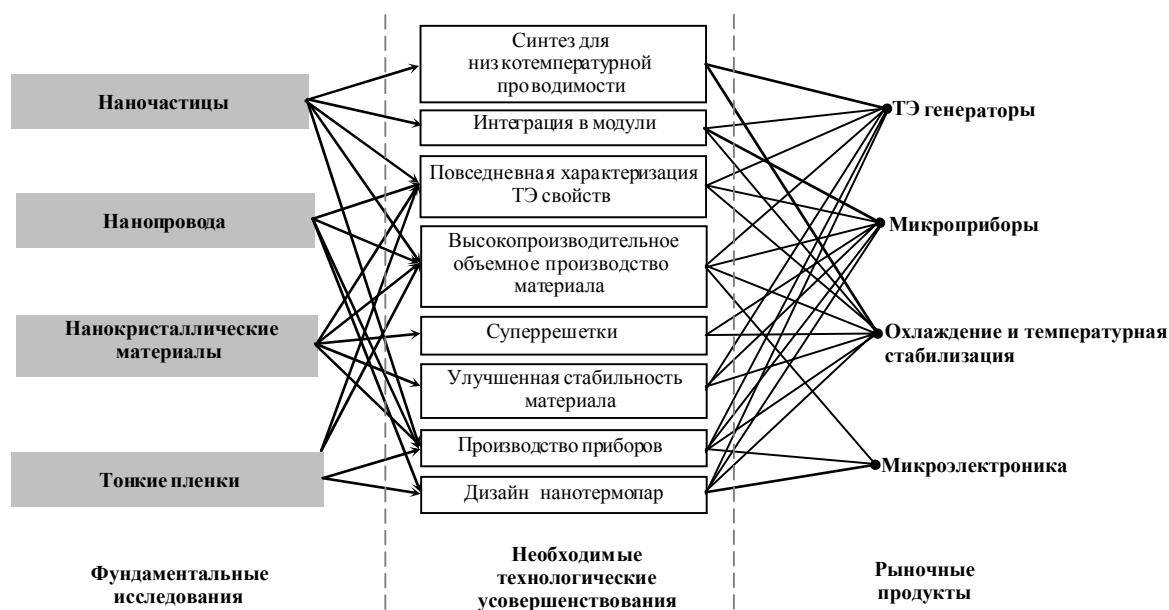


Рис.5.

рях и суперконденсаторах. Батареи сохраняют ее в виде химической энергии. В конденсаторах энергия сохраняется непосредственно в электрической форме при перераспределении зарядов между разделенными тонкими слоями проводящего материала.

Автомобильные аккумуляторы представляют собой наиболее известный пример перезаряжаемых батарей, однако сегодня основная доля рынка приходится на маленькие портативные батареи, используемые в бесконечном множестве современных электронных приборов.

Можно ожидать, что нанотехнологии будут играть важную роль в улучшении работы и свойств перезаряжаемых батарей и конденсаторов.

Приборы для хранения энергии характеризуются следующими параметрами:

- плотностью энергии (энергия на единицу объема или массы);
- плотностью мощности (показывает, как быстро энергия поглощается, то есть определяет время разрядки/перезарядки);
- временем жизни (количества циклов разрядки/перезарядки);
- чувствительностью к внешней температуре.

Аккумуляторы могут накапливать большое количество энергии, но в то же время имеют низкую плотность мощности (зарядка занимает много времени), короткое время жизни и быть очень чувствительными к внешней температуре. У обычных конденсаторов заметно больше плотность мощности, но меньше плотность энергии. Они малочувствительны к внешней температуре и у них большое время жизни.

Сегодня на рынке доминируют литий-ионные (Li-ion) и литий-полимерные батареи. Литий — электроположительный и легкий металл. Эти свойства делают его наилучшим для использования в перезаряжаемых батареях. В качестве катодных материалов используют оксиды марганца, никеля или кобальта, а аноды делают в основном из графита. Другая область исследований — аккумуляторы на основе гидридов металлов (например, никель-металл-гидридные — NiMH), для которых характерны лучшая производительность и более быстрые циклы зарядки/разрядки. Однако и они не достаточны для современных энергоемких приборов. В литиевых батареях основная исследовательская задача заключается в оптимизации переноса лития, то есть в поиске оптимальных электродов и электролитов. Это должно увеличить производительность батареи, время разрядки и количество циклов работы.

Основное ограничение для конденсаторов — уже отмеченная выше низкая плотность энергии. Суперконденсаторы, сочетающие в себе высокую плотность мощности и сравнимую с батареями плотность энергии, решают эту проблему. Своими преимуществами суперконденсаторы, по сравнению с обычными конденсаторами, обязаны высокой площадью поверхности их электродов.

В суперконденсаторах вместо обычных металлических пластин используются наноструктурированные материалы (например, пористый углерод), что рази-

тельно увеличивает эффективную площадь поверхности электродов. Типичный суперконденсатор заряжается в течение нескольких секунд (для перезаряжаемых аккумуляторов характерное время перезарядки составляет минуты или часы). Отсутствие химических реакций в суперконденсаторах делает их более стабильными по сравнению с перезаряжаемыми аккумуляторами, а время их жизни практически бесконечно.

Нанотехнологии, уже используемые в суперконденсаторах, могут значительно улучшить приборы для хранения энергии. Наноматериалы, обладающие большим отношением площади поверхности к объему, а также особой морфологией поверхности, способны заметно увеличить и плотность мощности, и плотность энергии, и скорость зарядки/перезарядки. Ожидается, что время жизни батарей также станет больше.

Нанокomпозиты и наночастицы существенно опережают другие материалы по своему потенциалу. Исследовательская активность, в первую очередь, концентрируется на разработке электродов, и лишь во вторую — на электролитах. Существует несколько различных базовых идей для электродов на основе нанотехнологий, которые могут быть внедрены как в перезаряжаемые аккумуляторы, так и в суперконденсаторы. Эксперты считают наиболее успешными:

- наночастицы / нанокристаллические материалы;
- тонкие пленки, слои и поверхности;
- углеродные и неорганические нанотрубки;
- нановолокна.

При этом разрабатываемые материалы должны быть безопасными и экологически чистыми.

Временные рамки для развития технологий

По сравнению с другими приложениями нанотехнологий в энергетическом секторе, исследования в области наноматериалов для аккумуляторов и суперконденсаторов более продвинуты, хотя и они в основном находятся на стадии фундаментальных работ. Тем не менее, ожидается, что уже к 2010 г. некоторые из них выйдут на стадию первых коммерческих приложений. К 2015 г. практически все современные задачи — улучшение электродов и электролитов, увеличение времени жизни батарей, более надежные и безопасные материалы — должны быть успешно решены (см. рис. 6).

К этому же времени суперконденсаторы высокой плотности энергии должны выйти на широкий рынок, а аккумуляторы с высокой скоростью зарядки — на стадию первых коммерческих приложений. Высокий спрос на развитые портативные источники энергии с запасом компенсирует относительное увеличение их стоимости, поэтому и внедрение нанотехнологий, и улучшение работы источников будут легко воспринято рынком.

Проблемы и барьеры

В ближайшее время исследовательские работы будут посвящены в основном новым типам электродов и электролитов. При разработке аккумуляторов они будут решать следующие задачи:

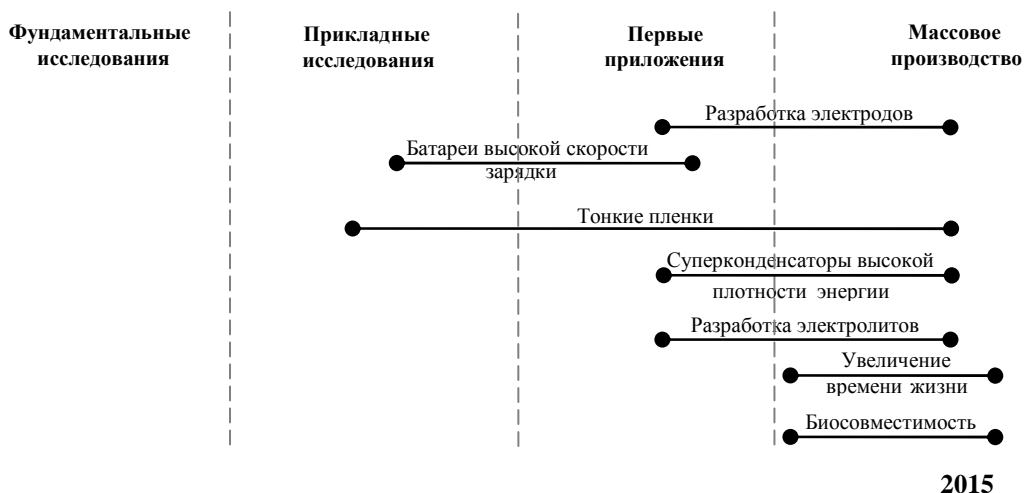


Рис. 6. Стадии развития хранителей энергии на основе нанотехнологий к 2015 г.

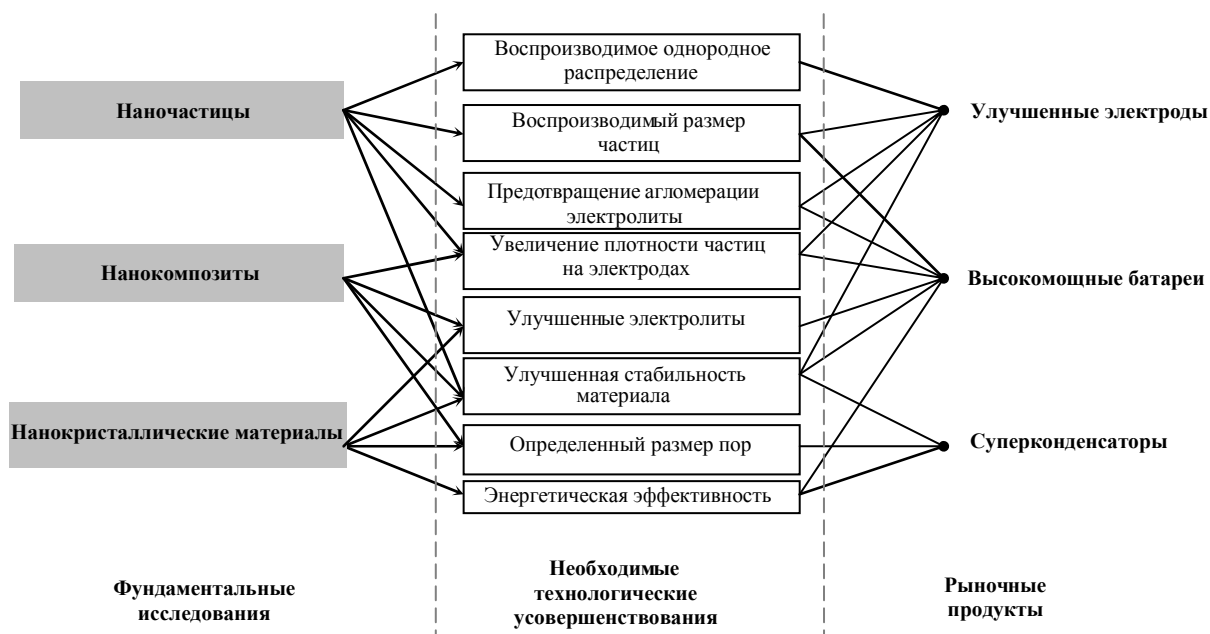


Рис.7.

— увеличение эффективной площади поверхности (напористость) для размещения большего количества лития и соответственного увеличения плотности мощности;

— разработка материалов, противостоящих изменению объема батареи при миграции лития между электродами;

— использование экологически чистых материалов катодов;

— уменьшение пассивации электродов;

— обеспечение однородного распределения наночастиц в катоде (предотвращение их агломерации) и максимизация их проводимости;

— обеспечение регулярной кристаллической структуры;

— приложение технологии на промышленном уровне с учетом всего сказанного выше.

При разработке суперконденсаторов главная задача — контроль за пористостью электрода, которая должна обеспечить максимальное взаимодействие с электролитом, а также эффективное взаимодействие катионов и анионов с соответствующим электродом (вот почему необходимо разрабатывать электроды, сделанные из одного и того же материала, но обладающие разным размером пор). Это становится еще более важным при использовании органических электролитов, обеспечивающих более высокую производительность, так как катионы и анионы могут иметь разные размеры. Исследования касаются в основном наночастиц, нанокомпо-

зитов и нанокристаллических материалов. На рис. 7 обобщены важные темы исследований в области применения наноматериалов к системам хранения энергии.

Теплоизоляция

Материалы, свойства, применения

Главное требование к теплоизоляции, где бы ее ни использовали, – уменьшить скорость теплопередачи за счет теплопроводности, конвекции, излучения, а также любой комбинации этих механизмов. Существует два основных способа достижения поставленной цели:

— использование пористого материала, удерживающего воздух или иной газ и уменьшающего таким образом конвекцию;

— применение покрытий для отражения теплового излучения (такие покрытия, прозрачные для видимого света, можно использовать при остеклении).

Что касается второго метода, то можно ввести термин «умное остекление» для стекол, способных реагировать на изменения в окружающей среде изменением прозрачности. Такие материалы незаменимы для энергосбережения.

Сегодня для теплоизоляции в основном используют стекловолокна, минеральную вату и шлаковату. Однако сравнительно недавно на рынок вышли аэрогели и быстро завоевали признание. Применение аэрогелей сегодня ограничивает их высокая стоимость. Лишь резкий рост стоимости энергии в последнее время сделал аэрогели более востребованными, особенно при остеклении и для изоляции трубопроводов (для природного газа). По мере разработки прозрачных аэрогелей (примеры уже есть) и с уменьшением их стоимости спрос на новый материал будет расти, в частности — для изготовления температуроустойчивых окон.

Нанотехнологии, возможно, сыграют важнейшую роль в судьбе аэрогелей. Эти материалы представляют собой пористые матрицы, содержащие до 99,8% воздуха (по объему), при этом частицы и поры имеют размер, меньший, чем длина волны света. Нанотехнологии могут применяться здесь не только для контроля за размером пор, но и для создания материалов с заданным откликом на падающее излучение, то есть с заданными оптическими свойствами.

Прорывом в области остекления стали дешевые многослойные тонкие пленки большой площади, получившие широкое распространение в последние годы. Исследования, позволившие уменьшить их цену, улучшить качество и воспроизводимость в производстве, позволили внедрить такие пленки в строительную индустрию.

Традиционные изолирующие материалы могут быть массивными и/или тяжелыми, поэтому даже при высокой эффективности их невозможно применить во многих случаях. Кроме того, традиционные технологии не позволяют создать прозрачный материал, обладающий одновременно высокой изолирующей способностью. Именно такие материалы необходимы для остекления.

Для решения этой задачи применение нанотехнологий может стать решающим.

Наиболее важное качество наноматериалов по сравнению с традиционными теплоизолирующими материалами заключается в их способности уменьшать скорость теплопередачи благодаря низкой теплопроводности. Кроме того, нужно учитывать и другие важные преимущества наноматериалов, в частности: улучшенная теплопроводность (противоположное сказанному выше), заданная абсорбция материала, увеличенное время жизни, меньшая цена. Исследования фокусируются в основном на:

— термохромном, фотохромном, электрохромном «умном остеклении»;

— микроструктурированных поверхностях;

— пористых материалах, удерживающих воздух или другие газы.

Наиболее полезными наноматериалами эксперты считают:

— тонкие пленки, слои и поверхности;

— наночастицы / наноконпозиты;

— аэрогели;

— самоорганизующиеся материалы;

— мезопористые материалы;

— углеродные нанотрубки.

Внимание также уделяется созданию композиционных аэрогелей, включающих в себя полимеры или сажу. Это могло бы уменьшить общую цену материала, одновременно не изменяя или даже улучшая его свойства.

Временные рамки для развития технологии

В течение следующих десяти лет нанотехнологии будут играть очень важную роль при создании покрытий и остекления с управляемыми свойствами для теплоизоляции. За исключением аэрогелей, получивших уже достаточно широкое коммерческое применение, остальные наноматериалы для теплоизоляции находятся на стадии фундаментальных исследований. К 2010 г. ожидаются первые коммерческие приложения, а широкий выход на рынок — в основном к 2015 г. (см. рис. 8). Пока нельзя сказать, что будет фокусом исследований в 2010-м и 2015-м годах, поскольку еще до конца не определен будущий спрос.

Проблемы и барьеры

Важнейшими проблемами для исследователей в этой области станут:

— стабилизация электрохромных систем;

— изготовление фотоэлектрохромных окон;

— разработка методов однородного внедрения наночастиц в матрицу-субстрат;

— широкомасштабное производство наночастиц особой формы (например, для отражающих покрытий);

— уменьшение себестоимости аэрогелей;

— контроль нанопористости;

— разработка «умного» остекления, обладающего активным откликом на изменения окружающей среды;

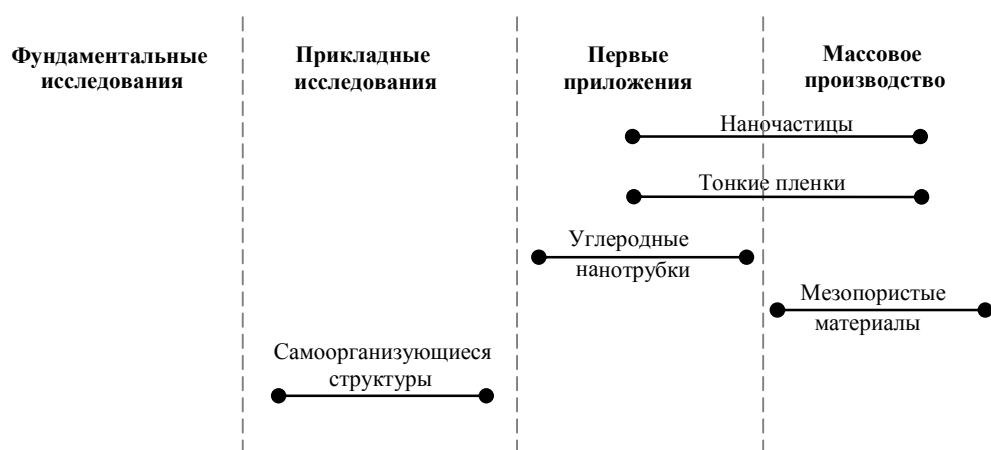


Рис. 8. Стадии развития систем теплоизоляции/теплопроводности на основе нанотехнологий к 2015 г.

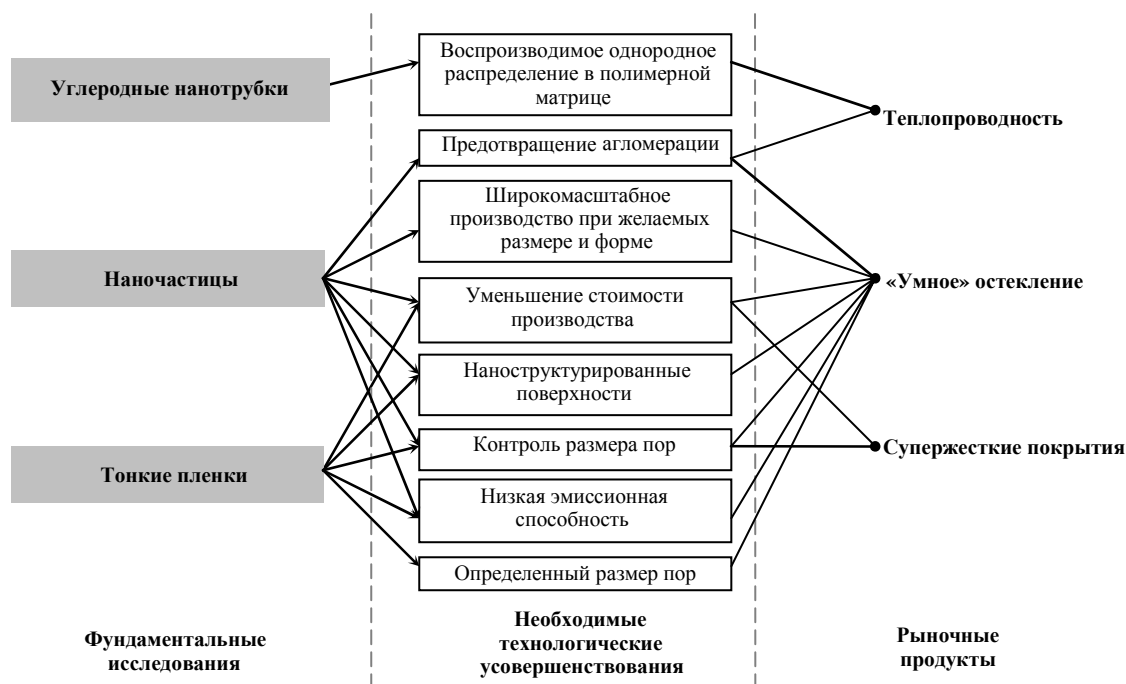


Рис. 9.

— создание сверхжестких материалов для теплоизолирующих покрытий.

Уже сегодня многие исследования находятся на прикладной стадии, и в следующем десятилетии основной проблемой станет скорее модификация покрытий, нежели открытие новых материалов. На рис. 9 суммированы основные направления исследований в данной области.

Выводы и рекомендации

Существует практически единодушное согласие в том, что нанотехнологии будут определять лицо будущего. Дорожные карты дали понимание ситуации и перспектив развития нанотехнологий в рассмотренных

выше областях энергетики. Справедливости ради надо отметить, что известная американская организация RAND Corporation, занимающаяся прогнозом технологического развития цивилизации, гораздо более сдержанна и скептически в отношении применения нанотехнологий в энергетике. В последнем прогнозе «The Global Technology Revolution 2020, In-Depth Analyses» 2006 г. только дешевая солнечная энергетика включена в перечень 16 перспективных технологий 2020 г., хотя сами нанотехнологии названы одной из четырех основных технологий будущего наряду с биотехнологиями, информационными технологиями и технологиями материалов. В частности, одна из основных проблем микро-

и наноустройств – электропитание. Размер батарей превышает размер самого устройства, что особенно заметно для нанозлектромеханических систем (NEMS).

Но как бы то ни было, спрос на новые энергетические системы обязательно будет расти в ближайшие десять лет. Множество различных технологий будет конкурировать между собой в поисках дешевых, эффективных, экологически чистых методов производства, хранения и экономии энергии. Нанотехнологии могут значительно улучшить параметры и свойства приборов и установок для энергосбережения.

Во всех рассмотренных выше областях рынок уже заполнен продуктами, в то время как развитие нанотехнологий находится в основном на стадии фундаментальных исследований или на прикладной стадии. 30—40% опрошенных экспертов считает фундаментально важным усилить поддержку исследований со стороны Евросоюза и национальных правительств. Продолжение фундаментальных исследований рассматривается как центральная задача. Понимание связей между структурой, свойствами, поведением и работой на наноуровне существенно для планирования дальнейших исследований и разработки коммерческих приложений.

По-прежнему критическим моментом остается внедрение новых технологических решений в промышленность. Поэтому необходима более тесная кооперация академической науки (которая обычно является движущей силой инноваций) с промышленностью. Одним из методов такой кооперации могло бы стать введение большего количества сравнительно небольших грантов. Такой подход дал бы возможность увеличить количество исследований и наладить связи между научными и промышленными партнерами.

Во многих случаях важной проблемой является отсутствие соответствующей технологии производства наноматериалов в больших количествах при одновременном обеспечении однородности их свойств (размер, форма частиц, их распределение по образцу). Преодоление этой проблемы критически важно для выхода нанотехнологий на рынок.

Особое внимание необходимо уделить безопасности и экологической чистоте производства. В связи с этим необходимо ответить на вопросы о токсичности и цитотоксичности наночастиц и продуктов их деградации. Подавляющее большинство экспертов отметило, что растет понимание потенциальных опасностей использования наноматериалов, и подчеркнуло, что необходимо тщательно исследовать вопросы безопасности, так как недостаточное решение этой проблемы может затормозить (или вообще остановить) успешное развитие нанотехнологий, в том числе и в энергетике. Такие исследо-

вания наряду со всесторонним и открытым обсуждением достоинств и рисков (а также методов их преодоления) нанотехнологий должны стать приоритетными для получения общественного признания.

Подавляющее большинство экспертов согласилось с необходимостью создания мультидисциплинарных центров. Они будут способствовать кооперации, сделают возможным доступ к сложному оборудованию и помогут превращать научные результаты в конечные коммерческие продукты.

В заключение нужно сказать, что для выхода на рынок предсказанных приложений нанотехнологий в следующие десять лет предстоит преодолеть много проблем и препятствий, большинство из которых общие для всех секторов науки и промышленности, где участвуют нанотехнологии. Они имеют как технологический, так и экономический характер. Вот перечень проблем, которые необходимо решать уже в ближайшее время:

- фундаментальные исследования взаимосвязи структура-свойства-функционирование на молекулярном уровне;
- компьютерное моделирование процессов на наноуровне;
- методы непосредственной характеристики и мониторинга процессов в материале;
- развитие соответствующей законодательной базы и процедур утверждения;
- идентификация и предварительная разработка материалов, приложений и методов, отвечающих нуждам массового производства;
- улучшение сотрудничества между академической наукой и промышленностью и соответствующий перенос технологий;
- образование и повышение квалификации молодых ученых и сотрудников в области нанотехнологий;
- ответ на увеличивающееся беспокойство по вопросам рисков со стороны нанотехнологий для человека и окружающей среды;
- открытая дискуссия и обеспечение правдивой информацией о рисках и достоинствах нанотехнологий всех заинтересованных лиц.

Статья подготовлена на основе материалов дорожных карт развития нанотехнологий (Roadmaps at 2015 on nanotechnology application in the sectors of materials, health & medical systems, energy, 2006), составленных специалистами Ассоциации независимых исследовательских институтов (Association of Independent Research Institutes, Великобритания) и Центра нанотехнологий (Nanotec IT, Италия).