

# Нанотехнологическая дорожная карта США

В 2008 г. по заказу Министерства энергетики США была разработана и опубликована технологическая дорожная карта «Производственные наносистемы. Обзор технологических перспектив». США ставит перед собой задачу стать мировым лидером в разработке этих революционных технологий, чтобы улучшить условия жизни, решив важнейшие проблемы в энергетике, медицине и других областях. Руководители проекта: Алекс Коучак (Alex Kawczak) из Battelle Memorial Institute, Эрик Дрекслер (K. Eric Drexler) из Nanorex, Джон Рэндалл (John Randall) из Zyvex Labs, Перл Чин (Pearl Chin) из Foresight Nanotech Institute, Джим фон Эр (Jim Von Ehr) из Zyvex Labs. В разработке принимали участие представители многих крупных коммерческих фирм и лабораторий, известных университетов США.

## ПРЕДМЕТ И СТРУКТУРА ОБЗОРА

ТАТ (технологии атомарной точности) – одно из направлений нанотехнологии, которое, по мнению разработчиков дорожной карты, станет основой новой технологической революции. Этот документ основан на материалах семинаров, которые проводились в рамках программы исследования технологических перспектив ТАТ, и содержит мнения и оценки десятков экспертов США. Физическое моделирование показывает, что развитие ТАТ приведет к появлению революционных возможностей в атомарно точном производстве (ПАТ).

Дорожная карта США по нанотехнологиям состоит из трех частей. Мы публикуем краткий обзор данного документа, полный текст которого размещен на <http://www.foresight.org/>. В первой части дорожной карты всесторонне обсуждаются технологии и задачи ТАТ и ПАТ, рассматриваются приложения и формулируется тезис о необходимости политической координации действий.

Во второй части «Подробный анализ» задействованные технологии исследуются более детально: рассматривается их сегодняшний потенциал для развития ТАТ и ПАТ, и обсуждается, как их можно использовать для достижения функциональности и применений следующего поколения. «Здесь мы острее всего почувствовали ограниченность нашего времени и ресурсов по сравнению с широтой и глубиной необходимого знания. Важные темы, серьезные проблемы и пути их решения, перспективные направления разработок иногда только упоминаются или кратко освещаются

в более широком контексте. Мы считаем это поводом пригласить вас к написанию следующей версии этого обзора перспектив», пишут разработчики документа.

Наконец, часть «Материалы рабочей группы» содержит статьи, расширенные аннотации и частные оценки, представленные участниками как в ходе проведения семинаров, так и в последующем обмене мнениями.

## ТЕХНОЛОГИИ АТОМАРНОЙ ТОЧНОСТИ

Обзор технологических перспектив производственных наносистем содержит описания уже существующих разработок в этой области, направлений и технологий, которые могут появиться в будущем. Обзор основан на докладах рабочих групп, исследователей из различных лабораторий и университетов США, занимающихся разработкой технологий производства структур атомарной точности, разработкой соответствующих производственных процессов. Структуры атомарной точности составлены из атомов в строго определенной конфигурации. Сегодня известны следующие примеры:

- самосборочные ДНК конструкции; искусственные белки;
- поверхности и внутренние области кристаллов;
- шаблоны на поверхности кристалла, созданные с помощью СТМ (сканирующей туннельной микроскопии); органические молекулы, органометаллические комплексы; металлические кластеры с заполненной оболочкой и квантовые точки;
- сегменты и концевики нанотрубок; биомолекулярные компоненты (ферменты, фотосинтетические центры, молекулярные моторы).

В обзоре рассмотрены проблемы развития технологий атомарной точности: фундаментальные, конструктивные, экономические, проблемы, связанные с моделированием и координацией усилий научного сообщества.

Речь, в частности, идет об атомарно точных производственных процессах – ПАТ, в которых используется управляемая последовательность операций для строительства структур с атомарной точностью. Сканирующие зонды решают эту задачу на поверхностях кристаллов, а биомолекулярные механизмы – в живых системах. И в технологии, и в природе компоненты сложных систем с атомарной точностью производятся с помощью той или иной технологии ПАТ. Большие надежды связаны с недавно появившимися

методами использования существующей продукции ПАТ для организации и эксплуатации других функциональных компонентов в нанометровом масштабе. Эти методы опираются на достижения в других областях нанотехнологии и открывают возможности для качественных преобразований в нескольких областях, расширяя спектр элементарных наноконструкций и архитектурных решений.

Следующий этап развития ТАТ, изучаемый в дорожной карте — создание ПНАТ. Производственные наносистемы с атомарной точностью (ПНАТ) — это системы ПАТ наномасштаба, которые самостоятельно обладают атомарной точностью. Все биологические системы ПАТ одновременно являются ПНАТ. По мере адаптации технологий ПАТ к расширяющемуся спектру материалов появляется возможность применения систем ПНАТ для все более широкой номенклатуры изделий. Результат — материалы и устройства с беспрецедентными рабочими характеристиками.

Технологии с атомарной точностью сегодня существуют в разнообразных, но ограниченных формах: в материаловедении исследуется производство методами ТАТ, а продукты ТАТ распространены в органическом синтезе, управлении сканирующими зондами и биомолекулярной инженерии. Опираясь на сегодняшние достижения, необходимо их развивать, освоив производство расширенного спектра конструкций с более масштабным применением систем ТАТ, повышенной сложностью, совершенствованными материалами и все большей эффективностью. Успехи в этой области заложат основу для новых методов производства с использованием ТАТ, что, в свою очередь, поспособствует прогрессу в других областях. Физическое моделирование показывает, что этот путь приведет к появлению революционных возможностей в атомарно точном производстве.

Появление новых методов ПАТ и ПНАТ рассматривается в дорожной карте как начало технологической революции. Из строгих материальных законов подобия следует, что развитые системы этого класса смогут обеспечить высокую производительность на единицу массы, а требования к исходным материалам и энергии не окажутся запредельными. Эти наблюдения, как и опыт с биологическими системами ПНАТ, указывают на возможность освоения экономичного производства изделий. Последующее развитие и укрупнение масштаба на системном уровне откроют возможность применения массивов ПНАТ для поточного производства изделий, объединяемых в системы макромасштаба. Такие характеристики, как масштаб, стоимость и производительность, свидетельствуют о революционных изменениях с громадным потенциалом во множестве отраслей промышленности.

Пока не предложено никаких альтернатив ПНАТ, способных объединить атомарно точное изготовление сложных структур с потенциалом рентабельной масштабируемости.

#### **ТЕРМИНОЛОГИЯ:**

- Под наносистемами понимаются наноразмерные взаимодействующие структуры, компоненты и приборы.
- Под функциональными наносистемами понимаются наносистемы, которые обрабатывают вещество, энергию или информацию.
- Под структурами атомарной точности понимаются структуры, составленные из атомов в строго определенной конфигурации.
- Под технологией атомарной точности (ТАТ) понимается любая технология, использующая достаточно сложные структуры атомарной точности.
- Под функциональными наносистемами атомарной точности понимаются функциональные наносистемы, которые содержат один или более наноразмерных компонентов, имеющих достаточно сложные структуры атомарной сложности.
- Под самосборкой атомарной точности (САТ) понимается любой процесс, в котором структуры атомарной точности спонтанно выстраиваются и связываются, формируя таким образом достаточно сложные структуры.

#### **ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАССМАТРИВАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Предмет «Обзора» разработчики определяют как совокупность технологий, которые либо претерпят кардинальную смену парадигмы с появлением ПАТ, либо будут способствовать его появлению. Эти технологии будут активно взаимодействовать со многими дисциплинами и катализируют инновации на многих финансовых и отраслевых рынках. ПАТ включает не только передовые производственные наносистемы, но и ряд наномасштабных производственных технологий, быстро развивающихся в настоящее время:

- атомарно точная депротекция поверхности для селективного роста с компьютерным управлением;
- молекулярные манипуляции с использованием сканирующих зондовых микроскопов;
- управляемая самосборка строительных блоков атомарной точности;
- адаптация существующих (например, биологических) производственных наносистем;
- органический синтез модульных расширяемых наноразмерных структур.

Эти ПАТ технологии широко используются сами собой и рассматриваются как инструменты реализации в разработке производственных наносистем. Технологии, связанные с ПАТ, включают передовые функциональные наносистемы, которые состоят из изделий ПАТ. Чтобы оценить масштаб и глубину грядущих изменений, следует принять во внимание то, что функциональные наносистемы атомарной точности

в следующие 10–20 лет окажут сильное влияние на разработки и развитие в следующих отраслях:

- производство энергии;
- здравоохранение;
- вычислительная техника;
- умные материалы;
- приборостроение;
- химическое производство (катализаторы).

Эти отрасли выступают локомотивами в разработке ПАТ, функциональных наносистем атомарной точности и, в конечном счете, производственных наносистем. Некоторые приложения будут основаны на гибридных системах, подобных нанолитографическим структурам, сопряженным с устройствами атомарной точности, другие разработки будут развивать гибридизацию управляемой самосборки с новыми сочетаниями отдельных подходов и технологий.

Что касается применения ПАТ в промышленности, в ближнесрочной перспективе наиболее привлекательно изготовление продукции высокой стоимости, для функционирования которой необходима атомарная точность изделий ПАТ, а для производства используются малые количества материалов атомарной точности. Среди перспективных приложений такого рода можно указать сенсоры, метрологические стандарты и устройства для квантовых вычислений.

Идеальным был бы продукт с большим рынком сбыта, но первоначальные приложения вполне могут оказаться нишевыми продуктами с небольшим рынком. Этот гипотетический нишевый рынок может и не оправдать инвестиций в создание и развитие ПАТ. Однако компания, рискнувшая осуществить начальные инвестиции, продолжит инвестиции в более амбициозные проекты после того, как будет доказана осуществимость и эффективность ПАТ. Рост доходности этих технологий запустит экономические механизмы, которые коммерциализируют и капитализируют как приложения, рассмотренные ниже, так и многие другие. Государственное финансирование в той мере, в которой оно доступно, ускорит создание ПАТ технологий, но его не следует считать заменой рыночным механизмам при разработке более амбициозных приложений. Оно лучше всего подходит для реализации нескольких наиболее перспективных проектов создания ПАТ, в отличие от массы разнонаправленных усилий, которые еще долго не будут приносить результатов.

### **ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПАТ**

Методы атомарной точности изготовления и сборки часто разделяют на нисходящие, или «сверху-вниз», (управляемые посредством сканирующих зондов), восходящие, или «снизу-вверх» (управляемые посредством САТ комплементарных интерфейсов), и серую зону между этими полюсами. Впрочем, многие технические проблемы являются общими для всех методов

изготовления, и потому в обзоре не используется эта классификация.

Вот некоторые задачи и вопросы, которые требуют разработки и решения на пути развития нанопроизводства.

#### **Инструменты атомарной точности**

– Стабильные, воспроизводимые, атомарно точные зонды для сканирующей туннельной микроскопии с возможностью визуализации атомарного разрешения.

– Атомарно точные инструментальные зонды, предназначенные для локализации атомов, молекул и других строительных блоков в точных и надежных конфигурациях, а также для доставки объектов к другим структурам посредством точных и надежных операций.

– «Умные» инструментальные зонды, способные распознавать, произошел ли захват строительного блока зондом и когда блок переходит с зонда в предписанное положение.

– АТ штампы, формы и наноимпринтные шаблоны для параллельных операций пассивации/депассивации.

– Нанопозиционные системы с обратной связью с разрешением  $< 0.1$  нм и тремя и более степенями свободы, а также small-footprint системы для реализации матричного параллелизма.

#### **Процессы атомарного разрешения**

– Технические усовершенствования в атомарной эпитаксии и нанесении атомарных слоев.

– Профилированная атомарная эпитаксия со многими материалами.

– Методы согласования решеток в гетероэпитаксиальных 3D структурах.

– Высокоселективная депассивация поверхностей (в обеспечение атомарной эпитаксии, или АЭЮ, со многими материалами).

– Высокоселективное послойное травление (удаление временных слоев нанесенных АЭ со многими материалами).

– Прочные защитные слои для поддержания атомарной точности в изделиях ПАТ.

### **ПРИМЕРЫ ПРОДУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЙ, В КОТОРЫХ ПЛАНИРУЕТСЯ ПРИМЕНЕНИЕ ПАТ И ПНАТ**

#### **Топливные ячейки**

Топливные ячейки на ПЭМ (полимерной электролитической мембране) основаны на технологиях, которые, как считается, перспективны в создании экологически чистых источников энергии. Хотя в отношении топливных ячеек за последние годы был достигнут прогресс, остается ряд серьезных проблем, среди которых: 1) низкая, по сравнению с теоретически предсказанной, эффективность преобразования энергии; 2) высокое содержание платины в электрокатализаторах; 3) нестабильность платины в условиях долговременных рабочих циклов.

**ТАБЛИЦА** | Современный и прогнозируемый потенциал производства атомарной точности

Годы	Технологии производства *	Расходный материал	Тип продукта	Атомов в типичном продукте	Типичная масса продукта †	
					Грамм	Единиц
<b>Современный уровень</b>						
2007	Зондовое ПАТ	Малые молекулы	Профилированные поверхности кристаллов	$10^2$	$10^{-21}$	1
	Органический синтез	Различные реагенты	Различные ковалентные структуры	$10^2$	1	$10^{21}$
	Белковая инженерия, рибосома как ПНАТ	Биологические субстраты	3D свернутые полимеры	$10^3$	1	$10^{20}$
	Структурное ДНК конструирование, полимеразы как ПНАТ	Биологические субстраты	3D полимерные конструкции	$10^6$	$10^{-6}$	$10^{11}$
	Специализированные процессы	Разные	Нанокристаллы, нанотрубки, другие	—	—	—
<b>Следующее поколение</b>						
2-10	ПАТ с зондовыми матрицами	Малые молекулы	Слоистые кристаллические структуры, многокомпонентные материалы	?	?	?
	Самосборка составных систем	Строительные блоки: ДНК, белки и др.	3D биополимерные конструкции, различные компоненты	$10^7$	$10^{-3}$	$10^{13}$
<b>Уровень 1</b>						
5-15	ПАТ с зондовыми матрицами	Малые молекулы	Различные 3D структуры, различные материалы	?	?	?
	Искусственные ПНАТ-ы для строительства полимеров, управляемая сборка	Различные мономерные строительные блоки	Надежные составные наносистемы на основе полимеров	$10^8$	1	$10^{15}$
<b>Уровень 2</b>						
10-25	ПНАТ-ы для строительства твердотельных объектов (синтез технологий)	Малые молекулы	Надежные системы, построенные из различных искусственных материалов	$10^9$	10	$10^{15}$
<b>Уровень 3</b>						
15-30	Масштабируемые системы из ПНАТ-матриц, направляемая сборка	Малые молекулы	Системы уровня сложности макроразмерных продуктов 2007 года	$10^{10}$	$10^2$	$10^{15}$
<b>Уровень 3+</b>						
15-30+	Масштабируемые системы из ПНАТ-матриц	Малые молекулы	Большие матрицы из сложных систем	$10^{26}$	$10^3$	1

† Грубая оценка порядка величины на цикл опытного производства.  
 \* Обычно в сочетании с другими нанотехнологиями: нанолитография, наночастицы, СЗМ и т.д.

Решение этих эксплуатационных проблем может быть достигнуто сочетанием 1) разработки катализаторов на основе теоретических методов, 2) атомарно точных катализаторов, 3) дальнейшего улучшения *in situ* контроля специфичностью и субангстремным разрешением.

### **Твердотельные осветительные элементы с высоким КПД**

Радикальное повышение эффективности искусственного освещения может быть получено с использованием твердотельных осветительных (ТТО) элементов. Их потенциал заключается в прямом преоб-



разовании электрической энергии в световую в полупроводниковом устройстве. Эффективность преобразования энергии в современных ТТО элементах, пригодных для эксплуатации, гораздо ниже 100 %, но она постепенно растет, и каких-либо фундаментальных физических ограничений, препятствующих достижению высокой эффективности генерации белого света, пока не обнаружено. Характеристики ТТО элементов радикально улучшатся с внедрением управляемой компоновки строительных блоков для переноса заряда и излучения света с помощью технологий производства атомарной точности. Для светоизлучающих диодов (СИД) используются кристаллические полупроводники, в которых велико влияние одиночных атомарных дефектов на эффективность переноса заряда и генерацию излучения. В отличие от них, органические светоизлучающие диоды (ОСИД) изготавливаются из очень тонких пленок молекулярных материалов, в основном в аморфной фазе. Отсутствие технологии сборки массивных структур с молекулярной точностью пока препятствует применению этих уникальных для ОСИД эффектов на практике. Если такая технология будет разработана, возможно появление как СИД, так и ОСИД, с эффективностью преобразования электрической энергии в световую, близкой к 100 % от термодинамически достижимой.

#### **Солнечная энергетика**

Привлекательность ОФЭН (органических фотоэлементов на основе наноструктур) – в их низкой стоимости, неограниченности источников исходных материалов, низкотемпературной обработке и возможности дешевого производства устройств большой площади на гибкой подложке. Обладая такой же теоретической эффективностью, как и традиционные полупроводниковые фотоэлементы, и низкой стоимостью производства, ОФЭН вполне могут стать решением задачи технологии фотоэлементов – рентабельной генерации электрической энергии в промышленных масштабах. В самых общих чертах, оптимизация ОФЭН устройства сводится к подбору наноконструкций с соответствующими зонными характеристиками и их организации в термодинамически устойчивую структуру путем формирования интерфейсов с подходящими разрывами зон.

#### **Пьезоэлектрическая энергетика**

Пьезоэлектрические материалы могут преобразовывать механическую энергию в электрическую. Это означает, что пьезокерамики и пьезополимеры перспективны для применения в датчиках движения, а кроме того, могут преобразовывать обычно неиспользуемые механические напряжения и вибрации в полезную электрическую энергию. Атомарная точность в производстве пьезоэлектрических материалов обеспечит беспрецедентные характеристики и новые возможности применения этих материалов в преобразовании механической энергии.

#### **Волноводы**

Прогресс в технологии волноводов привел к информационной революции, идущей в течение последних 20 лет. Внедрение ПАТ в волноводные технологии, помимо возможности развивать кремниевую фотонику, придаст отрасли импульс, равный или даже больший, чем тот, который получили информационные технологии и производство сенсоров.

#### **Высокодобротные резонансные микрополости**

Оптические микрополости – это резонансные устройства, которые могут хранить и направлять фотоны, характеристики которых удовлетворяют некоторым условиям резонанса. В настоящее время технология высокодобротных микрополостей на чипе преследует цель создания компактных устройств в следующих областях:

- сенсоры,
- компактные низкопороговые лазеры,
- исследования по квантовой информации,
- обработка оптической информации.

#### **Биологические сенсоры**

Биологические системы дают примеры ПАТ, которые стимулируют разработку биосенсоров. Биополимеры, такие как белки, нуклеиновые кислоты и углеводы, демонстрируют избирательное сродство к другим биополимерам и малым молекулам при соответствующем расположении химических функциональных групп. Теоретически, новые элементы для химического распознавания могут быть созданы путем атомарно точной организации слабо взаимодействующих ансамблей, которые способны распознавать биомолекулы предсказуемым образом. Такие элементы распознавания нужны для химического детектирования и для *in vivo* нацеливания.

#### **Электрические наномоторы и наноактуаторы**

В 2003 г. в группе А. Зеттла в лаборатории Беркли и Калифорнийском университете в Беркли был изготовлен мельчайший из известных небиологический наномотор. Это устройство было собрано на многослойной углеродной нанотрубке (МСУН), которая служила как подшипником для ротора, так и электрическим проводником.

#### **Наноприборы, нанобиосенсоры, НЭМС, нанотрубки и нанопровода для применения в биологии**

Наноматериалы обладают превосходными характеристиками для химических и биологических сенсоров. Наносенсоры с иммобилизованными биорецепторными зондами называются нанобиосенсорами. Среди применений нанобиосенсоров можно указать выявление микроорганизмов, мониторинг метаболитов в жидкостях организма и диагностику тканевых патологий.

## ОБЩИЙ ВЗГЛЯД РАЗРАБОТЧИКОВ ОБЗОРА НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СТИМУЛЫ РАЗВИТИЯ ТАТ

Стратегия развития ТАТ должна акцентировать внимание на конкуренции как стимуле в поиске новых идей и на рынке как инструменте оценки успеха и распределения ограниченных финансовых, временных и интеллектуальных ресурсов. Развитие сети Интернет и экономики показало способность конкуренции и рынка решать задачи быстрее и дешевле по сравнению с большими централизованными программами. Не надо создавать всеобъемлющего проекта с многомиллиардным бюджетом. Необходимо работать с множеством из тысяч проектов с миллионным бюджетом и сотен с десятиллионным, используя их как основу для десятков стомиллионников. К поставленным целям надо идти разными путями, на которых непременно возникнут непредвиденные возможности и трудности. Как и при коммерциализации Интернета, рассредоточенные конкуренция и кооперация дадут отдачу быстрее и дешевле, чем запуск и реализация всеобъемлющей огромной программы.

Существенным фактором станет сотрудничество правительства с научными и промышленными кругами. Программа должна финансировать многочисленные совместные промышленно-университетские группы, стимулируя их конкуренцию в целевых областях и содействуя кооперации внутри конкретного промышленно-университетского кластера. Следует поощрять усовершенствование правил и механизмов обмена технологиями между университетами и компаниями. Высокоскоростные коммуникации будут содействовать тесному международному сотрудничеству, участие в котором не будет сдерживаться удаленностью исследователей. Промышленность играет существенную роль в выборе целей и быстром внедрении разработанных технологий. Однако возможности компаний инвестировать в долгосрочные исследования ограничены.

Финансовая ситуация зачастую неблагоприятна для акционерных компаний в части вложений в исследования и разработки, а малым компаниям не хватает необходимых ресурсов. Финансирование со стороны правительства может значительно изменить масштабы, охват и горизонт планирования промышленных исследований и разработок. Налоговая политика также может способствовать прогрессу в разработках, но она значительно менее направлена и эффективна, чем целевая программа финансирования.

Национальный научный фонд (NSF) должен совместно с Национальным бюро по координации нанотехнологий (NNCO) разработать структуру университетской программы по развитию ПАТ. NSF уже сейчас управляет сетью университетов, которая является частью Национальной нанотехнологической инфраструктурной сети (NNIN). Созданная для обслу-



График дает общее представление о направлениях совместных исследований и возможных ближайших и отдаленных результатах в области производственных наносистем и их приложений

живания пользователей, эта сеть обеспечивает доступ к современным исследовательским средствам в 13 университетах США. Инструменты, которые нужны для ПАТ, как предполагают разработчики технологической дорожной карты, будут отличаться от используемых в NNIN для нисходящих методик общей нанотехнологии, модель сотрудничества, принятая в NNIN, поможет разработке ПАТ. Следует уделить внимание развитию эффективного сотрудничества между университетами и промышленностью.

Чем скорее мы запустим программы по развитию ПАТ и производственных наносистем, считают разработчики дорожной карты, тем ближе к нам станут блага мира с более чистой энергией и более долгой жизнью. Следующим важным шагом должна стать доработка настоящей программы расширенной международной командой, сформированной из сообщества нанотехнологических организаций.

*Перевод выполнен в компании НТ-МДТ.*

*Полный текст можно получить в службе маркетинга компании НТ-МДТ у Тихомировой Анны (тел.: +7-495-913-5736/37/38, факс: +7-495-913-57-39, e-mail: tikhomirova@ntmdt.ru).*