

УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО

БИНОМ

УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Учебник

Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по образованию в области
радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению 211000
«Конструирование и технология электронных средств»



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний

УДК 544-022.532(075.8)
ББК 24+32.844.15я73
К89

Серия основана в 2009 г.

Кузнецов Н. Т.

К89 Основы нанотехнологии : учебник / Н. Т. Кузнецов, В. М. Новоторцев, В. А. Жабрев, В. И. Марголин. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. — 397 с. : ил. — (Учебник для высшей школы).

ISBN 978-5-9963-0853-8

В учебнике изложены общие представления о нанотехнологии, ее концептуальные проблемы. Затронуты вопросы самоорганизации и синергетики в наномире, проанализированы возможности нанометрологии. Рассмотрены специфические особенности и проблемы наномира.

Для студентов, изучающих дисциплины, связанные с применением нанотехнологии, магистрантов и аспирантов, инженерно-технических и научных работников, а также интересующихся проблемами современной науки.

УДК 544-022.532(075.8)

ББК 24+32.844.15я73

Учебное издание

Серия: «Учебник для высшей школы»

Кузнецов Николай Тимофеевич
Новоторцев Владимир Михайлович
Жабрев Валентин Александрович
Марголин Владимир Игоревич

ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Учебник

Ведущий редактор канд. хим. наук *Д. К. Новикова*. Редактор *С. Ф. Селиверстова*

Художник *И. Е. Марев*

Технический редактор *Е. В. Денюкова*

Компьютерная верстка: *С. А. Янковая*

Подписано в печать 27.02.14. Формат 70×100/16.

Усл. печ. л. 32,5. Тираж 1000 экз. Заказ

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»

125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3

Телефон: (499) 157-5272, e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>

ISBN 978-5-9963-0853-8

© БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	8
Глава 1. Общие представления о нанотехнологии	13
1.1. Научное мировоззрение и наномир	13
1.2. Исторические начала и корни нанотехнологии	18
1.3. Переход от микротехнологии к нанотехнологии. Наномир	31
1.4. Особенности наноразмерного состояния вещества	43
1.5. Терминологическая база нанотехнологии	47
1.6. Доктрина развития работ по нанотехнологии и наноматериалам в России.	54
1.7. Магистральные направления развития нанотехнологии. Прогнозы и перспективы	60
Контрольные вопросы к главе 1	85
Глава 2. Концептуальные проблемы нанотехнологии	87
2.1. Проблема размерных эффектов	87
2.2. Роль информации и информационной составляющей в наномире	95
2.3. Проблемы невоспроизводимости в нанотехнологии	102
2.4. Проблема измерений в квантовой механике и наномире	108
2.5. Проблема слабых и сверхслабых воздействий в нанотехнологии	120
2.6. Резонансные взаимодействия в наномире.	128
2.6.1. Некоторые резонансные явления, перспективные для нанотехнологии.	128
2.6.2. Принцип фрактальности применительно к резонансным процессам и явлениям	132
2.7. Эффекты дальнего действия в наномире	137
2.7.1. Эффекты дальнего действия в наноразмерных структурах	137
2.7.2. Эффект ориентированной кристаллизации через аморфную среду	138
2.7.3. Эффект дальнего действия, возникающий при энергетическом воздействии на систему	144
Контрольные вопросы к главе 2	147
Глава 3. Самоорганизация и синергетика в наномире	149
3.1. Процессы самоорганизации и синергетика	152
3.2. Реализация процессов самоорганизации в различных системах	166
3.3. Некоторые представления о роли самоорганизации в наномире	178
3.3.1. Кластер. Магические числа	179
3.3.2. Структурные скелеты и надмолекулярное состояние вещества. Понятие мезофазы.	182

3.4. Применение процессов самоорганизации для технологических целей	184
3.5. Самоорганизация в биологических объектах	193
3.6. Самоорганизация как целенаправленный детерминированный выбор направления эволюционного процесса	203
3.6.1. Особенности химической связи в неорганических, органических и элементоорганических соединениях	204
3.6.2. Химические реакции и процессы самоорганизации	208
3.7. Фрактальные структуры и самоорганизация	215
Контрольные вопросы к главе 3	226
Глава 4. Специфические особенности и проблемы наномира	227
4.1. Основные понятия нелинейной динамики	227
4.2. Диссипативные системы. Бифуркации.	234
4.3. Поверхностные, межфазные и граничные особенности объектов наномира	239
4.4. Проблема чистоты материала, вещества и поверхности	250
4.4.1. Проблема чистоты материала	250
4.4.2. Проблема чистоты поверхности	257
4.4.3. Проблема шероховатости поверхности.	262
4.5. Механические особенности. Закон Холла–Петча	266
4.6. Междисциплинарные области использования наноразмерных материалов и композитов	272
4.7. Фундаментальные и прикладные аспекты наномедицины и нанобиологии.	279
Контрольные вопросы к главе 4	288
Глава 5. Методы исследования вещества в наноразмерном состоянии	289
5.1. Проблемы метрологии в наномире	289
5.2. Автоионный микроскоп	294
5.3. Рентгеновская микроскопия	298
5.4. Просвечивающая электронная микроскопия	304
5.5. Растровая электронная микроскопия. Общие представления.	312
5.6. Механизмы формирования контраста в РЭМ	322
5.7. Электронная оже-спектроскопия	335
5.8. Рентгеновский микроанализ	341
5.9. Рентгеноструктурный анализ	348
5.10. Сканирующая туннельно-зондовая и атомно-силовая микроскопия	353
5.11. Микроскопия ближнего поля	367
Контрольные вопросы к главе 5	375
Цитируемая литература	377
Дополнительная литература	380

ПРЕДИСЛОВИЕ

Последняя треть прошлого, двадцатого, века существенно изменила и расширила наши представления об окружающем мире. Появились новые, революционные в хорошем смысле слова, подходы к описанию природы, например фрактальная геометрия и фрактальная физика, теория детерминированного хаоса, нелинейная динамика, термодинамика неравновесных процессов. Развитие аналитической инструментальной базы привело к появлению таких прецизионных методов исследования, как комплекс туннельно-зондовых технологий, включающий сканирующую туннельную, атомно-силовую, электро-силовую и магнитно-силовую микроскопию. Многие лаборатории и исследовательские центры расширили парк своей научной аппаратуры за счет микроскопов ближнего поля, конфокальных оптических и конфокальных лазерных микроскопов, электронных микроскопов сверхвысокого разрешения и высоко-разрешающих сканирующих электронных микроскопов.

Эти новации в науке и технике выявили непростую проблему перехода от микромира к наномиру, в узком аспекте — от микротехнологии и микроэлектроники к нанотехнологии и наноэлектронике, а в более глобальном — к расширению научного мировоззрения. Для неорганической химии переход в наноразмерный масштаб позволил обнаружить новые структурные типы, строение которых не соответствует законам классической кристаллографии. Для наночастиц характерны разнообразные структурные элементы — нульмерные, одномерные, двухмерные, трехмерные, имеющие обычную структуру и фрактальные. Наносистемы далеки от равновесного состояния в силу различных причин, в том числе из-за наличия развитой поверхности. Атомы вблизи поверхности отличны как по структурным, так и физико-химическим характеристикам от атомов в объеме кристалла, а состав приповерхностной области не соответствует стехиометрическому составу химического соединения. Многообразию наночастиц и структурная неоднородность наносостояния не всегда укладываются в представления классической кристаллографии.

В рамках классической кристаллохимии все структурные типы можно разделить на 5 категорий в соответствии с основной доминантой структуры: координационные, островные, цепочечные, слоистые, каркасные. В наноструктурах доминант может быть несколько. Это справедливо как по отношению к доминантам отдельных соседних фрагментов, так и по отношению к объединяющей доминанте, в соответствии с которой фрагменты образуют структуру следующего уровня иерархии. Анализируя структуру наночастиц (осуществляя целенаправленный синтез структуры гипотетической наносис-

темы с целью придания ей требуемой функциональности), следует выделить основные структурные фрагменты и на каждом уровне иерархии в пределах каждого фрагмента определить основные структурные доминанты.

Неорганические наночастицы по своей структуре часто корреспондируют с известными ранее характерными чертами биологических объектов. В диапазоне наноразмеров весьма вероятно конвергенция между живой и неживой природой, т. е. совместимость органических и неорганических веществ, так как для наночастиц снимаются многие запреты и ограничения классической симметрии на совместимость элементов. (В настоящее время признанным центром таких исследований является «Курчатник», возглавляемый М. Н. Ковальчуком.) В неорганическом наномире реализуется пентагональная и икосаэдрическая симметрия, допустимы поворотные и винтовые оси 5-го, 7-го и более высоких порядков, возможна геликоидальная симметрия.

По всей вероятности, реализуются не только все три типа геометрии постоянной кривизны — Евклида, Лобачевского и Римана (здесь уместно вспомнить гипотезу Вернадского), но и определенные конструкции проективной геометрии. Наномир демонстрирует многообразие структур и, как следствие, многообразие форм наночастиц.

В 1959 г. нобелевский лауреат Р. Фейнман выразительно сказал, «что полно игрушек на полу в комнате», объясняя тем самым, что в области малых размеров масса интересна. Многие считают это началом наноэпохи. Однако Фейнман имел в виду чисто количественные аспекты. В 1977 г. другой нобелевский лауреат Илья Романович Пригожин указал на невозможность простого перехода от процессов на макроскопическом уровне к обратимым процессам на микроскопическом уровне и определил круг проблем, связанных с решением этой задачи. Выдающиеся открытия отечественных и зарубежных химиков в области синтеза и исследования строения наночастиц открывают новую страницу в ее преодолении. Современные аналитические методы высокого разрешения позволяют экспериментально изучать наносостояние на уровне индивидуальных наноразмерных объектов — наночастиц и кластеров.

С уменьшением размеров объектов возрастает потенциальное быстродействие системы, что является очень важным аспектом для электроники и вычислительной техники. Достигнутое быстродействие в реальных устройствах составляет уже около 1 нс (10^{-9} с), но может быть еще уменьшено на несколько порядков, в ряде наноструктур — до фемтосекунд.

Сейчас первостепенное значение имеют фундаментальные исследования, направленные на создание принципиально новых технологических процессов, материалов и продуктов в таких областях, где традиционными методами в принципе невозможно достигнуть требуемых результатов, особенно это касается материаловедения.

В громадном и слабо освоенном промежутке между макроуровнем (где действуют хорошо разработанные континуальные теории сплошных сред и инженерные методы расчета и конструирования), плавно переходящим в микроуровень, и атомарным (подчиненным законам квантовой механики) находится обширный уровень структуры материи, — наномир. Именно на этом уровне протекают жизненно важные биохимические процессы между макро-

молекулами ДНК, РНК, белками, ферментами, субклеточными структурами, требующие более глубокого понимания. В наномире могут быть искусственно созданы неизвестные ранее продукты и технологии, способные радикально изменить жизнь человеческого сообщества. Возникающие при малых размерах и низких температурах специфические квантовые размерные эффекты могут быть использованы в электронике, оптике, вычислительной технике.

Поэтому можно только приветствовать появление учебника, в котором проложен мост к пониманию физических основ и физико-химических проблем нанотехнологии и нанoeлектроники, рассмотрены на концептуальном уровне многие вопросы, в том числе основы фрактальной геометрии, фрактальной физики и нелинейной динамики.

Отличие представляемого учебника от прочих, довольно многочисленных учебных пособий и монографий в области нанотехнологии состоит в том, что авторы стремятся уходить от обсуждения частных проблем, явлений и нано-эффектов, освещая общие представления и концептуальные подходы к нанотехнологии и наномиру. Рассматриваются основы наших представлений о нанотехнологии, ценности этого направления науки сегодня и ее перспективы на будущее в максимально обобщенном виде.

К достоинствам учебника следует отнести четко прослеживаемое желание авторов делать упор на физическую и химическую интерпретацию рассматриваемых явлений, а не на написание ворохов длиннейших формул, которые угнетающе действуют на психику читателя, обрекая его на сомнения в собственной умственной полноценности. Физическая, а не математическая интерпретация окружающего мира намного доступней и эффективней для читателя любого уровня подготовленности.

Следует также отметить, что данный учебник написан авторами в порядке личной инициативы, без поддержки каких-либо фондов, благотворительных организаций, грантов и поощрительных премий.

*Директор ВИАМ
академик Е. Н. Каблов*

ВВЕДЕНИЕ

Развитие наших представлений об окружающем мире тесно связано с возможностью познавать его на всех масштабных уровнях: от гигантских звездных систем до мельчайших вирусов и в перспективе — молекул и атомов. Ограниченность и определенное несовершенство человеческого организма, способного познавать мир с помощью органов пяти чувств в очень ограниченных диапазонах (зрение: 0,3–0,6 мкм, слух: 40–20000 Гц), вынуждают применять для познания мира инструментальную технику, которая позволяет получать в том или ином виде, прямо или косвенно интересующую информацию. Оптический микроскоп и телескоп расширили наши представления об окружающем мире сразу по обе стороны доступного человеку масштабного диапазона. Процессы, происходящие в далеком космосе, в макро- и микромире оказались приоткрытыми для исследования и изучения. Применение полученных знаний на практике позволило создать мощнейшую технологическую базу человечества.

Совершенствование методов исследования позволяло двигаться по масштабной шкале, познавая все более мелкие объекты. Мечтой многих исследователей было увидеть мельчайшие структурные единицы материи — атомы и молекулы. Для этого надо было освоить масштабный диапазон, лежащий в области нанометров (порядка 10^{-9} м). В соответствии с масштабной приставкой «нано» (от греческого *nanos* — карлик) этот масштаб стали называть наноразмерным, а все с ним связанное получило приставку «нано». Однако оказалось, что переход в нанодиапазон не является простым переходом к другой единице измерения, все гораздо глубже. Свойства вещества в наносостоянии оказались весьма отличными от свойств в привычных агрегатных состояниях: газообразном, жидком, твердом и плазменном. Это дает право считать наносостояние пятым состоянием вещества, поскольку любое вещество может быть получено и исследовано в этом состоянии.

Сейчас мир стоит на пороге новой научно-технической революции, последствия которой представить пока затруднительно. Ученые вплотную подошли к оперированию объектами с размерами нанометрового диапазона, что и получило комплексное название нанотехнологии, ее фундаментальную часть принято называть нанонаукой, а совокупность исследуемых объектов — наномиром. И это действительно очередная революция, но прежде всего она, как ни странно, должна произойти в умах людей.

Объектами нанотехнологий являются не только, собственно, низкоразмерные объекты — наноэлементы с характерными размерами как минимум по одной пространственной координате (наноусы, наночастицы, нанопорошки, нанотрубки, нановолокна, нанопленки), но и макроскопические объекты (объемные материалы, отдельные элементы устройств и систем), структура которых контролируемо создается с разрешением на уровне отдельных наноэлементов и существенно отличается от свойств более крупных объектов того же состава. При этом под устройствами или системами, изготавливаемыми с использованием нанотехнологий, понимают таковые, в которых как минимум один компонент является объектом нанотехнологий (т. е. существует как минимум одна стадия технологического процесса, результатом которой является объект нанотехнологий).

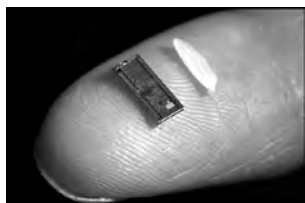
К сфере нанотехнологии относятся нанокристаллы и наночастицы (в том числе и квантовые точки), нанотрубки, нановолокна, наноусы, двумерные нанообъекты с характерными толщинами порядка размера молекул. Под наноструктурами понимают комбинации вышеперечисленных элементов, для которых наблюдаемые физические свойства непосредственно определяются размерно-зависимыми свойствами элементов: это многослойные и многополосные структуры и сетки; твердотельные гибриды и гетероструктуры на основе полупроводников, металлов и магнетиков; элементы или наборы элементов, контролируемо модифицированные функциональными молекулами, мицеллами или биологическими объектами субмикронных размеров.

К наноматериалам относят полностью или частично состоящие из вышеперечисленных элементов твердые или жидкие материалы, для которых какие-либо макроскопические свойства определяются размерами и/или взаимным расположением элементов:

- наночастицы в твердых, полимерных и жидкокристаллических матрицах;
- наночастицы на подложках;
- нанокапсулы;
- слоистые материалы с характерным размером фрагментов порядка постоянной решетки;
- суперкристаллы на основе упорядоченных наноэлементов;
- гранулированные наноразмерные материалы;
- бионаноматериалы и биофункционализированные наноматериалы;
- объекты традиционных технологий (нанопорошки, нанопористые материалы, золи, гели, эмульсии, пены, наногетерогенные полимеры и т. д.).

Нанонаука и нанотехнология создают принципиально новую техническую и технологическую базу цивилизации и опираются на новейшие достижения в области химии и физической химии, коллоидной химии, прикладной математики, физики твердого тела, фрактальной физики и геометрии, нелинейной динамики, динамического хаоса, материаловедения и других естественных наук. Современная нанотехнология отличается тем, что она соединила талант химика-синтетика, химика-аналитика с мастерством инженера, и именно этот союз позволил создать самые замысловатые структуры благодаря использованию как разнообразных темплатов, так и бестемплатных процессов.

В результате технологической революции элемент информационного устройства сам стал производить сложные действия над потоками информации, общаясь с внешним миром на языке математической логики. Эти информационные потоки могут быть реализованы в виде переноса заряженных частиц или квантов электромагнитного поля. Каждый последующий этап компьютерной эволюции будет изменять именно функции элементов информационных устройств, а важнейшие принципы их работы и, возможно, технологии их изготовления предыдущей революции останутся в какой-то степени



до поры и времени консервативными. Но только до той поры, пока в недрах технологического прогресса не созреет новая техническая революция нанотехнологии. Технологические достижения в области создания элементной базы современных компьютеров наглядно иллюстрирует показанный на снимке микропроцессор фирмы «Интел», содержащий 4,7 млн транзисторов и размещенный на кончике пальца рядом с рисовым зернышком [1].

Однако тысячи остроумных приемов и десятки сложных физических явлений не реализуют сами по себе предмет развитой технологии, а нанотехнологии в особенности. Не существует такого приема или явления, которые могли бы самодостаточно выразить ее сущность. Элементную базу современной микроэлектроники, к примеру, для достижения практически любой поставленной цели можно реализовывать на основе самых разнообразных физических явлений и использовать разные материалы — полупроводниковые, сверхпроводящие, магнитные или оптические. При этом должен сохраняться единственный принцип — это обработка информационных сигналов в мезоскопически и микроскопически малых областях твердого тела, в которых средствами современной технологии создано определенное распределение электронных свойств. Однако на смену микроэлектронике идет нанoeлектроника, а есть еще нанохимия, нанобиология и наномедицина. По-видимому, роль биологии и химии будет еще больше возрастать, несмотря на то что уже сейчас они являются магистральными направлениями развития нанотехнологии.

Потоки электронов, заключенные в полупроводниковый кристалл, дали в свое время начало новой ветви эволюции элементной базы — поколению интегральных схем. Подвижность электронов в сочетании с малыми внутрикристаллическими размерами обеспечили скорость, а структура твердого тела — организацию информационных потоков в микропространстве. Это привело к необходимости формировать кристалл с почти идеальным расположением атомов в решетке, заданным распределением примесей, образующих внутри кристалла сложную пространственную фигуру, и созданием на поверхности кристаллов элементов с возможно более малыми размерами (планарная технология). Эти принципы распространились уже и на аморфные твердые тела, а не только на идеальные кристаллы. В нанотехнологии ситуация существенно более сложная и принципиально иная. Нужно отказаться от многих привычных взглядов и понятий или относиться к ним по крайней мере с величайшей осторожностью. Более того, надо осознать многие непривычные

и вызывающие инстинктивное отторжение понятия, химические и физические, и разнообразные явления в наномире. Например, признать, что структура наночастицы может изменяться под влиянием внутренних и внешних условий, что химическая связь на первых стадиях химических реакций лабильна, что устойчивые нанообразования и наночастицы могут быть у любого вещества.

Ограничение требований регулярности трансляционной симметрии приводит к появлению икосаэдрических форм упаковки с пентагональной симметрией для неорганических частиц. Реализуются также наночастицы с когерентными границами раздела между структурными фрагментами различной симметрии.

При изучении структурно-неоднородных наночастиц можно обнаружить общие черты с такими явлениями, как послыйный и блочный полиморфизм, изоморфизм с заполнением пространства, автоизоморфизм (внутренний твердый раствор), двойникование, эпитаксиальное соответствие, псевдоморфное сопряжение, модуляция подрешеток, сверхструктурное упорядочение (в том числе упорядочение вакансий в дефицитных структурах), образование несоизмерных (мисфит-) структур и т. д. Можно утверждать только, что имеются искаженные фрагменты известных структур. Следовательно, можно непосредственно использовать концепцию фрагментарности. Согласно этой концепции, некоторые кристаллические структуры природных минералов могут рассматриваться в качестве сложных, построенных из модулей (фрагментов) или структурных блоков, как бы заимствованных из других кристаллов или кристаллических решеток. Если требуется более одного вида блоков для построения трехмерной структуры в целом, то этот случай называется полисоматизмом. Являясь обобщением более частных понятий политипизма, полисоматизма, гибридности, турбостратификации (одномерной разупорядоченности в слоистых структурах), концепция фрагментарности указывает направление, где минерологи могли бы искать новые минеральные структуры и составы.

Дуализм состояний наночастиц определяет случайный характер их образования, что означает временную зависимость параметров системы частиц. Для теоретического анализа наносостояния необходимо преодолеть и другие трудности концептуального характера. Самое главное, что они уже в определенной степени известны. В 1977 г. нобелевский лауреат И. Р. Пригожин (1917–2003) указал на невозможность простого перехода от процессов на макроскопическом уровне к обратимым процессам на микроскопическом уровне и определил круг проблем, связанных с решением этой задачи. Выдающиеся открытия отечественных и зарубежных химиков в области синтеза и исследования строения наночастиц открывают новую страницу в исследовании этой проблемы.

Переход к нанотехнологии является довольно болезненным, как и любая революция, а впрочем, любая неожиданная ломка привычных представлений, даже заключающаяся в простом, но резком расширении границ мировосприятия. В связи с этим осмелимся привести две цитаты. Первая принадлежит американскому философу Уильяму Джеймсу (1842–1910), занимавшемуся философией научного познания [2–4]: «В любой науке вокруг общепризнанных и упорядоченных фактов вечно кружит пыльное облако исключений из правил —

явлений малозаметных, непостоянных, редко встречающихся, явлений, которые проще игнорировать, нежели рассматривать. Всякая наука стремится к идеальному состоянию замкнутой и строгой системы истин. Феномены, не подлежащие классификации в рамках системы, считаются парадоксальными нелепостями и заведомо не истинны. Ими пренебрегают и их отвергают, исходя из лучших побуждений научной совести. Тот, кто всерьез займется иррегулярными феноменами, окажется способен создать новую науку на фундаменте старой. По завершении же этого процесса правилами обновленной науки по большей части станут вчерашние исключения».

Вторая цитата принадлежит нашему соотечественнику, физику, занимающемуся проблемами квантовых измерений, Михаилу Борисовичу Менскому [5]: «Нерешенные концептуальные вопросы квантовой механики часто объединяют под именем «проблемы измерения». Они не имеют, подобно другим проблемам в физике, вполне ясной и однозначной формулировки и порой разными авторами преподносятся по-разному. Более того, большое число вполне квалифицированных и опытных специалистов считает, что никаких концептуальных проблем в квантовой механике вообще не существует. Те, кто такие проблемы обсуждает, часто встречают не только непонимание, но и осуждение. Типичная оценка такого рода обсуждений состоит в замечании, что это не физика, а философия, и при этом слово «философия» иногда произносится несколько свысока <...> Парадоксы в квантовой физике возникают лишь тогда, когда исследователь не удовлетворяется этим «физическим» уровнем теории, когда он ставит такие вопросы, которые в физике ставить не принято, другими словами, когда он берет на себя смелость попытаться выйти за пределы физики. Вполне оправданной является точка зрения, что такая попытка со стороны физика не имеет смысла. Те, кто этой точки зрения придерживается, не заслуживают осуждения. Более того, они по-своему правы, потому что для конструктивной работы в физике необходимо ограничить себя точно сформулированными, чисто «физическими» задачами. Однако для некоторых физиков оказывается необходимым иногда попытаться выйти за рамки собственно физической методологии и поставить более широкий круг вопросов. Вот тогда возникают квантовые парадоксы. Оказывается, что попытки разрешить эти парадоксы могут приводить к удивительным новым концепциям, которые, по меньшей мере, весьма любопытны. Нельзя сказать, что на этом пути достигнут существенный прогресс. Однако красота и смелость возникающей при этом картины квантового мира невольно заставляют надеяться, что этот путь позволит в конце концов вывести теорию на качественно новый уровень». Все это полностью можно отнести и к нанотехнологии. Безусловно, на начальном этапе своего становления нанотехнология будет сталкиваться с сопротивлением консервативно мыслящих исследователей.

Можно утверждать, что по мере освоения нанометрового диапазона все более значительную роль станут играть ранее малозаметные на фоне больших энергозатрат резонансные эффекты и сопряженные с ними слабые и сверхслабые воздействия на наноразмерные системы.

Процесс этот начался недавно и уже принес интереснейшие результаты, которые имеют тенденцию к нарастанию, причем лавинообразному.

ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НАНОТЕХНОЛОГИИ

1.1. Научное мировоззрение и наномир

Если исходить из хронологических представлений, то на фоне всей истории человечества, насчитывающей десятки тысяч лет (а по некоторым данным это число больше на один-два порядка), феномен науки и соответствующее ему представление о научном мировоззрении исключительно молоды. До появления научного взгляда на окружающий мир существовало два основных подхода к познанию этого мира — мистический и схоластический.

Самый древний, мистический, исходил из того, что мы через свои органы чувств познаем очень маленькую часть окружающего мира, населенного недоступными нам в ощущениях в обыденной жизни мистическими существами. Эти мистические существа и управляют миром и всеми явлениями в нем. Посему познавать мир бессмысленно, а необходимо лишь установить какой-либо контакт с этими мистическими существами и заставить их служить себе и выполнять все наши просьбы. Наивно думать, что технический прогресс человечества похоронил эти представления. Если обратиться к современной российской массовой прессе, то нормальный ум будет поражен обилием рекламы услуг бесчисленного числа колдунов, предсказателей, знахарей, астрологов.

Следующий в хронологическом порядке подход к познанию мира — схоластический, он берет свое название от школы схоластиков. Самый яркий ее представитель — великий Аристотель (384–322 гг. до н.э.). Основная идея — мир надо познавать путем строгих логических рассуждений, и если они выверены, то проверять их на практике бессмысленно, аморально и даже вредно. До нас дошло описание многочасового спора Альберта Великого (Альберт фон Больштедт, 1193–1280) и его ученика Фомы Аквинского (1225–1274) на актуальную и животрепещущую тему — есть ли у крота глаза. Присутствовавший при том садовник предложил им отловить крота и сразу узнать истину. Его «убогое» предложение было гневно отринуто великими мужами с криками: «Ни в коем случае, мы должны в принципе познать, есть ли у крота глаза!!!».

Идеи и трактаты Аристотеля были взяты на вооружение сначала в арабском мире, известном своими выдающимися достижениями в математике, медицине, географии и прочих областях знания. Затем они благополучно перекочевали в Европу, где и процветали под «доброй» дланью католической церкви. Почти тысячу лет просвещенная и такая умная Европа зачитывалась трактатами Аристотеля и свято верила его безупречным логическим выводам. К примеру — таким: у женщин зубов больше, чем у мужчин, а у мужчин их 34;



Рис. 1.1. Роджер Бэкон



Рис. 1.2. Фрэнсис Бэкон

у мухи 8 лап; если жениться рано, то дети будут женского пола. Проверить эти перлы схоластической мысли в Европе никто так и не удосужился.

Эти своеобразные подходы критиковал еще великий Леонардо да Винчи (1452–1519): «Нужно руководствоваться показаниями опыта, — писал он, — и разнообразить условия до тех пор, пока мы не извлечем из опыта общих законов, ибо лишь опыт открывает нам общие законы». Под этой фразой обеими руками подпишется каждый естествоиспытатель современности.

В специальном трактате англичанин Роджер Бэкон (1214–1292, рис. 1.1) призывал расстаться со словами как источником мудрости и обратиться к опыту. Бэкон выдвинул идею о качественно различных элементах, комбинации которых образуют конкретные вещи. Бэкон отрицал атомистическое учение о неделимости атомов и пустоте. Критикуя схоластов, он видел основу всякого познания в опыте.

Его благородное дело завершил через 300 лет другой монах — Фрэнсис Бэкон (1561–1626, рис. 1.2), противопоставивший категориям схоластической философии, спекулятивным рассуждениям о Боге, природе и человеке доктрину «естественной» философии, базирующейся на опытном познании мира. Он впервые сформулировал идею универсальной реформы человеческого знания на базе утверждения опытного метода исследований и открытий. «Истина — дочь Времени, а не Авторитета». Наука, по Бэкону, должна дать человеку власть над природой, увеличить его могущество и улучшить его жизнь. С этой точки зрения он критиковал схоластику и ее силлогистический метод, которому он противопоставил обращение к опыту и обработку его методом индукции, подчеркивая значение эксперимента.

Акцентирование значения научного метода позволило Бэкону выдвинуть важный для педагогики принцип, согласно которому цель образования — не накопление возможно большей суммы знаний, а умение пользоваться методами их приобретения. Бэкон постулировал основные принципы научного мировоззрения. Они очень просты в формулировке и в то же время не просты в исполнении. Первая заповедь или основной постулат: «Критерий истины — эксперимент». И только он. Это значит, что если самая замечательная

и единственно верная теория противоречит эксперименту, то неверна теория, а не эксперимент или его результаты (безусловно, эксперимент должен быть абсолютно корректен).

Вторая заповедь: «Эксперимент должен быть воспроизводим и повторяем». Это значит, что если эксперименты проводятся в одинаковых условиях, то они должны давать одинаковые результаты, где и сколько бы раз они ни производились. Поэтому наука не занимается исследованием таких невозпроизводимых и неповторяемых явлений, как телепатия, телекинез.

Становление и развитие научного мышления происходили в основном в европейских странах и тяготевших к ним ареалах (США, Канада, Япония и т. д.). А вот арабский мир, долгое время живший в плену схоластических аристотелевых представлений, потерял темп развития, и, возможно, навсегда. Правда, и в трудах Рене Декарта (1596–1650) можно найти некоторые рецидивы схоластического мировоззрения, в его основаниях логики первым правилом было: «Ничего не принимать за истинное и не включать в свои суждения, пока оно моим разумом ясно не признано таковым, и таким образом ограждать себя от всякой торопливости в суждениях и от всяких предвзятых мнений» [6]. То есть критерий истины отнюдь не эксперимент, а разум Декарта.

Со времени постулирования основ научного подхода, по меркам истории человечества, прошло ничтожное количество времени. Однако был достигнут совершенно поразительный результат в области технического прогресса, опиравшегося на результаты научных исследований. Эпоху пара, начавшуюся в 1769 г. с изобретения, вернее факта патентования, паровой машины Джеймсом Уаттом, сменила эпоха электричества, ее — эпоха информационных технологий, и мы уже вступаем в эпоху нанотехнологий.

В связи с этим приведем некоторые соображения по поводу научного мировоззрения в целом и роли личности в частности. Происходящее на наших глазах становление и развитие нанонауки требуют от исследователей определенной ломки привычных научных представлений и принятия новых научных парадигм. Принятие основных положений фрактальной геометрии и физики, нелинейной динамики и многомерной геометрии уже не вызывает прежнего отторжения и является осознанной необходимостью. Будучи пограничной междисциплинарной областью знания, нанотехнология впитала в числе прочего и различные положения квантовой механики. Вследствие этого, совокупное или, как теперь модно говорить, синергетическое воздействие этих составляющих нанотехнологии приводит к размыванию основных постулатов научного мировоззрения. Малейшее, совершенно незначительное изменение параметра в начальных условиях нелинейной системы приводит к ее эволюции по разным сценариям. Самое неприятное, что количественное изменение этого параметра чаще всего находится за пределами чувствительности нашей аппаратуры. В наносистемах мы чаще всего не имеем возможности эти изменения проконтролировать, и вопрос о воспроизводимости экспериментов из дискуссионного переходит в область практического, что будет обсуждено далее.

Как справедливо отмечают П. С. Ланда и др. [7], эксперимент, даже абсолютно корректный, сам по себе не обеспечивает правильное понимание наблюдаемых и регистрируемых этим экспериментов явлений. Об этом свиде-

[. . .]

Николай Тимофеевич Кузнецов – доктор химических наук, действительный член РАН. Лауреат Государственной премии Российской Федерации, премии Правительства РФ, премии Президента РФ в области образования, премии им. Л. А. Чугаева РАН, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Почетный профессор МИТХТ им. М.В. Ломоносова и РХТУ им. Д. И. Менделеева, Почетный доктор Ростовского госуниверситета, награжден Золотой медалью им. Н.С. Курнакова РАН.

Владимир Михайлович Новоторцев – доктор химических наук, действительный член РАН. Директор Института общей и неорганической химии РАН им. Н. С. Курнакова. Председатель Экспертного совета по неорганической химии ВАК, Лауреат Государственной премии РФ, Лауреат премии им. Л. А. Чугаева РАН.

Валентин Александрович Жабрев – доктор химических наук, член-корреспондент РАН. Заведующий кафедрой технологии стекла и общей технологии силикатов Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

Владимир Игоревич Марголин – доктор технических наук, профессор кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Действительный член Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова.