

САМООРГАНИЗАЦИЯ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

© 2016 г. Р.А. ПОПО

Московский технологический университет (МИРЭА)
e-mail: radpo@yandex.ru

Современное естествознание ищет пути моделирования самых сложных систем, которые присущи природе, способных к самоорганизации, саморазвитию. Основные свойства самоорганизующихся систем - открытость, нелинейность, диссипативность. Открытые системы - это такие системы, которые поддерживаются в определенном состоянии за счет непрерывного притока извне вещества, энергии или информации. Постоянный приток вещества, энергии или информации является необходимым условием существования неравновесных состояний в противоположность замкнутым системам, неизбежно стремящимся (в соответствии со вторым началом термодинамики) к однородному равновесному состоянию. Открытые системы - это системы необратимые; в них важным оказывается фактор времени. Открытые неравновесные системы, активно взаимодействующие с внешней средой, могут приобретать особое динамическое состояние - диссипативность, которую можно определить как качественно своеобразное макроскопическое проявление процессов, протекающих на микроуровне. Неравновесное протекание множества микропроцессов приобретает некоторую интегративную результирующую на макроуровне, которая качественно отличается от того, что происходит с каждым отдельным ее микроэлементом. Благодаря диссипативности в неравновесных системах могут спонтанно возникать новые типы структур, совершаться переходы от хаоса и беспорядка к порядку и организации, возникать новые динамические состояния материи. Главная идея синергетики — это идея о принципиальной возможности спонтанного возникновения порядка и организации из беспорядка и хаоса в результате процесса самоорганизации. Решающим фактором самоорганизации является образование петли положительной обратной связи системы и среды. При этом система начинает самоорганизовываться и противостоит тенденции ее разрушения средой. В неорганической природе существуют классы систем, способных к самоорганизации. История развития природы — это история образования все более и более сложных нелинейных систем. Такие системы и обеспечивают всеобщую эволюцию природы на всех уровнях ее организации — от низших и простейших к высшим и сложнейшим (человек, общество, культура) [1,6].

Природа создала множество уникальных материалов, суть которых пытается осознать человек и использовать в своей практической деятельности (например, явление электрической и магнитной намагниченности доменов различных материалов). Отработанная Природой нервная система давно изучается, но технически пока мало удалось скопировать у Природы. Идеи для разработки технических средств лучше находить в «природных библиотеках». Созданы нейронные сети, искусственный интеллект, самонастраивающиеся системы и др. Проникновение в тайны происхождения жизни связаны и с некоторыми проблемами повседневной жизни с медицинской точки зрения (трансплантация органов и др.), технической (нанотехнология требует новые подходы), биологической и других. В микроэлектронике «элементами-кирпичиками» электронной техники являются микросхемы, в наноэлектронике - молекулы и атомы. Переход к нанотехнологии заставляет осмыслить развитие жизни на Земле для более

целенаправленного вкладывания усилий в изучение процессов, приводящих к содействию в улучшении материальных возможностей человека.

1. Самоорганизация - ключ к нанотехнологиям в электронике [1,6]

Основные изделия микроэлектроники стали основными элементами бытовой электроники, медицины, автомобилестроения, авиации и т. д. Логика развития любой отрасли техники в настоящее время немыслима без использования микрочипов. Следует отметить, что с возрастанием производительности микрочипов они становятся дешевле и потребляют меньше энергии по сравнению с чипами предшествующего поколения. Стремительное развитие микроэлектронных технологий позволило ворваться в область субнанометровых топологических размеров. Экспериментальные исследования последних десятилетий показали, что развитие нанотехнологии, нацеленной на производство и использование наноматериалов, тормозится недостатком информации о фундаментальных особенностях структуры и свойств наноматериалов и наносистем, а также закономерностях их поведения в техногенных и природных системах. Особой проблемой при этом является создание материалов с элементами наноструктурирования, в которых рекордные функциональные свойства или проявления полифункциональности возникают за счет вклада в формирование свойств различных уровней структуры – и не только на нано, но и на микроуровне. Свойства наноматериалов, как и любых других материалов, зависят от их химического состава, структуры, морфологической организации, размера, размерности и степени упорядочения составляющих их фрагментов, отвечающих нанодиапазону, в силу этого для формирования различных наноструктур с уникальными функциональными характеристиками наиболее эффективны процессы самосборки и самоорганизации. Под нанотехнологиями будем понимать сумму технологий и методов обработки материалов, основанных на манипуляциях с отдельными атомами и молекулами, биологическими объектами с целью получения новых материалов, приборов и устройств, а также формирование приборных структур с характеристическими размерами порядка 10-100 нм. В атомной и квантовой физике единицей длины принято считать величину 1 \AA . Нанометр в десять раз больше. Ангстрем выбран масштабом потому, что он соответствует диаметру самого маленького из атомов — атому водорода. Диаметры других атомов достигают значений нескольких единиц ангстрем. В живой природе, состоящей, так же как и неживая материя, из атомов, молекулы протеина и липидов имеют размеры до 10 нм. Диаметр спиральной молекулы ДНК составляет примерно 20 нм, в то время как длина может достигать десяти микрометров. Масштаб рибосом и вирусов лежат в пределах 100 нм. Интересно отметить, что один из продуктов нанотехнологий — нанотрубки, а также элементы сверхбольших интегрированных схем - имеют размеры тоже порядка 100 нм. Вполне логичным путем развития микроэлектроники является постоянное увеличение степени интеграции за счет уменьшения топологической нормы.

Первая стратегия «сверху — вниз» заключается в уменьшении путем масштабирования элементов интегральных схем. При уменьшении топологических норм за счет совершенствования литографических и других технологических процессов можно уменьшать, например, длину канала МДП-транзистора. Это приведет к увеличению быстродействия транзистора, уменьшению величины управляющих напряжений, снижению потребляемой мощности.

Линии межсоединений выполняются по той же технологии и с теми же технологическими нормами. Оценки показывают, что значение сопротивления токоведущей дорожки резко возрастает с уменьшением ее сечения и есть вероятность, что сигнал может не пройти по линии межсоединения. При масштабировании межсоединений такие процессы как электромиграция, возрастание волнового сопротивления, краевые емкости межсоединений, «джоулев» разогрев резко ухудшают характеристики межсоединений. Уменьшение размеров в плоскости кристалла сопровождается уменьшением размеров по глубине. Речь идет о толщине подзатворного диэлектрика, глубине залегания р-р-переходов. Уже при топологической норме 65 нм толщина окисла должна быть по-

рядка 1 нм. Это примерно несколько атомных слоев. Такая толщина окисла позволяет происходить процессам туннелирования через диэлектрик. С этой целью применяют диэлектрики с высоким значением диэлектрической постоянной, например, HfO (значение $\epsilon = 25$). Но это уже другая технология!

Правила масштабирования предусматривают также увеличение степени легирования канала. Это позволяет не только увеличить число носителей в канале, но и снизить подвижность носителей в канале, избежать смыкания областей пространственного заряда истока и стока.

Другая стратегия «снизу — вверх» предполагает синтез структур из отдельных атомов. На начальной стадии развития туннельной микроскопии был продемонстрирован массоперенос на уровне отдельных атомов и атомная сборка структур, состоящих из отдельных атомов.

В нанотехнологиях остро стоит вопрос о поиске в природных процессах или разработке в лаборатории эффективного технологического процесса для создания заданных наноструктур. Таким процессом может быть самоорганизация структур. Процесс самоорганизации представляется как спонтанный переход от беспорядочного движения, хаотического состояния к новому порядку через нарастание флуктуации. Лауреат Нобелевской премии по химии Илья Романович Пригожин, анализируя открытые системы, выдвинул принцип, согласно которому неравновесность может служить источником упорядоченности. Для описания неравновесных систем Пригожин предложил ввести понятие локального термодинамического равновесия. Если процессы, возмущающие равновесие в малом объеме, менее интенсивны процессов, которые формируют равновесие, то говорят о локальном равновесии. Принцип локального равновесия является постулатом. Феноменологические уравнения описывают малые отклонения системы от термодинамического равновесия. Возникающие потоки линейно зависят от термодинамических сил. В природе известно много самоорганизующихся систем. В животном мире в качестве примеров можно привести полосатую шкуру зебры, выверенное строительство шестиугольных сот у пчел, индивидуальный и неповторимый рисунок кожи на пальцах человека, типы снежинок и льдинок.

Классическим структурированием в условиях притока энергии может служить возникновение ячеек Бенара в жидкости, возникающих при определенном градиенте температуры. В этом случае появляются конвекционные потоки в жидкости, обладающие характерной структурой в виде шестиугольных ячеек призмы. В центральной области призмы жидкость поднимается вверх, вблизи вертикальных граней опускается вниз. В поверхностном слое жидкость растекается от центра к краям, а в придонном - от границ к центру. Конвективные ячейки являются самоорганизованной структурой, в которой происходит отдача энергии. Формирование структур Бенара объясняется тем, что при малых градиентах температуры появляется конвективный поток. Увеличивается пропускная способность слоя жидкости передавать тепло, появляются флуктуации конвективного движения, которые усиливаются и достигают макроскопических масштабов. Возникает устойчивая структура Бенара, в которой обеспечивается максимальная скорость теплового потока. Следует отметить, что в открытой системе возникает новый молекулярный порядок, стабилизируемый за счет обмена энергией с внешней средой. Важно отметить, что при этом не нарушается второе начало термодинамики. Стационарная неравновесная система, имеющая диссипативную структуру, потребляет отрицательную энергию. Возникновение диссипативных структур носит пороговый характер. Самоорганизованная структура возникает из флуктуации, а пороговый характер самоорганизации связан с переходом одного устойчивого состояния в другое. В открытых системах образуются диссипативные структуры, для которых характерен обмен веществом и энергией с внешней средой. Стационарная равновесная система, имеющая диссипативную структуру, должна потреблять отрицательную энтропию. При этом, закон возрастания энтропии не нарушается. К тому же, потоки энергии и вещества создают флуктуационный и структурный порядок в открытых системах. Новая структура является результатом неустойчивости и возникает из флуктуации. В докритическом режиме флуктуации обычно затухают. При преодолении порога и выхода на сверхкрити-

ческий режим флуктуации усиливаются, достигают макроскопического уровня и формируют новый устойчивый режим. Так пороговый характер самоорганизации связан с переходом одного устойчивого стационарного состояния в другое. Самоорганизация в системе связана с формированием структуры более сложной, чем первоначальная.

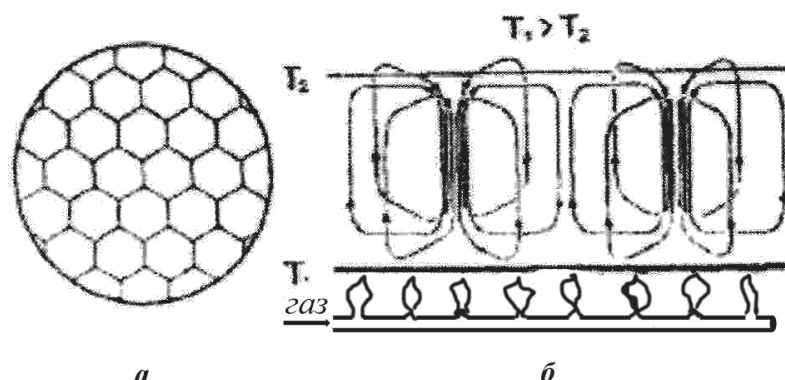


Рис. 1. Ячейки Бенара: общий вид структуры (а); схема потоков в отдельных ячейках (б).

К процессам самоорганизации в научно-технических приборах можно отнести формирование когерентного лазерного пучка. В процессе «накачки» активного рабочего вещества сначала происходит некоррелированное излучение возбужденными атомами квантов света. Когда амплитуда сигнала превышает определенный порог, атомы начинают осциллировать когерентно. Возникает когерентное электромагнитное поле, формирующее лазерный луч с определенной временной и пространственной когерентностью. И в этом случае на смену хаотическому спонтанному излучению приходит организованное индуцированное излучение.

В последние годы исследовательский бум вызвало открытие фуллеренов и нанотрубок, представляющих собой новые структуры углерода. Поверхность фуллеренов имеет замкнутую сферическую форму, структура которой состоит из правильных шестиугольников и двенадцати правильных пятиугольников. По своей структуре углеродные нанотрубки можно рассматривать как определенным образом свернутые в трубки графеновые слои. Графен представляет собой атомарный слой графита - одну молекулу в виде пленки. Углеродные нанотрубки заканчиваются полусферической головкой, образованной как бы половинкой фуллерена с участием пятичленных углеродных циклов. Трубки могут быть одностенными и многостенными, если они образованы несколькими графеновыми слоями. Если фуллерены представляют собой молекулярную форму углерода, то углеродные нанотрубки сочетают в себе свойства нанокластеров и твердого тела. Углеродные нанотрубки образуются в результате физико-химических превращений углерода при высоких температурах. Известно несколько способов получения нанотрубок: электродуговое распыление графита, абляция графита с помощью лазерного или солнечного облучения и каталитическое разложение углеводородов. Механизм образования фуллеренов и нанотрубок как был интригующей проблемой, так и по сей день остался дискуссионным. Не ясно, каким образом из хаотического состояния углерода образуется высокоупорядоченные углеродные наноструктуры. Видимо, в основе лежат процессы самоорганизации структур, однако, не ясна последовательность реакций. Вот и приходится оперировать понятиями типа «сворачивания» гофреновой пленки. С решением проблемы образования нанотрубок исследователи создадут технологический процесс самоорганизации структур. Заметим, что в минерале шунгит находят углеродные нанотрубки и фуллерены, сформированные естественным способом.

2. Примеры технической самоорганизации (химическая самосборка, самоорганизация эпитаксиальных структур)

Одним из примеров процессов самоорганизации можно рассматривать метод химической самосборки поверхностных наноструктур. Разновидностью химической

сборки является метод молекулярного наслаивания. При создании упорядоченных наноструктур одним из методов является образование полупроводниковых островков, осуществляемое гетероэпитаксией. Метод заключается в осаждении материала, образующего островки на подложке, состоящей из другого материала с близкой структурой и значением параметра решётки. Гетероэпитаксия широко используется как при проведении исследований, так и при промышленном изготовлении многих полупроводниковых устройств, превратившись, по существу, в хорошо развитую технологию. Она включает в себя доставку атомов или молекул к поверхности подложки, где они могут принимать участие в одном из трёх процессов: а) адсорбции и диффузии по поверхности с образованием зародыша островка путём соединения с другими атомами, б) присоединении к существующему островку, в) десорбции с испарением в окружающее пространство. Маленькие островки могут продолжать расти, мигрировать на другое место или испариться. Существует критический размер, при котором они становятся устойчивыми и больше не испытывают существенного испарения. Таким образом, есть начальная стадия формирования островков, когда их число с добавлением новых порций материала увеличивается. За ней следует вторая, в течение которой количество островков стабилизируется, а существующие островки растут в размере. Наконец, есть стадия, когда главными событиями являются объединения существующих островков друг с другом с образованием больших кластеров.

Например, массив наноточек на поверхности можно создать с помощью процесса самосборки. В результате островкового роста формируются атомные кластеры, каждый из которых содержит несколько атомов. Типичное значение поверхностной концентрации островков варьируется в диапазоне 10^{10} — 10^{11} см². Процессы зародышеобразования и роста островков имеют стохастическую природу и поэтому островки располагаются случайным образом. Свойства кластеров сильно зависят от размеров. Поэтому для практических применений важно создавать кластеры с идентичными размерами и структурой, с высокой пространственной однородностью.

3. Самоорганизация магнитных доменов в тонких пленках [3]

В журнале «Наука и жизнь» (№ 6, 2003 г) была опубликована статья доктора химических наук профессора Г. Браницкого из Минска «Неживая природа. Такая ли она неживая?». В статье рассказывалось о явлениях, протекающих при электролитических реакциях (например, восстановлении ионов серебра, контактирующих с активными металлами). Подчеркивалось, что, по крайней мере, внешне они похожи на явления и процессы, которые протекают в живых, биологических объектах.

Исследования, проведенные Г.С. Кандауровой с сотрудниками в Уральском государственном университете, показали, что в тонких магнитных пленках, помещенных в переменное магнитное поле низкой частоты, тоже происходит «конкурентная борьба» и самоорганизация доменов. Известно, что в магнитных кристаллах магнитные моменты атомов выстроены таким образом, что кристалл обладает спонтанной намагниченностью, ориентированной вдоль определенных кристаллографических осей — осей легкого намагничивания. Их может быть несколько или всего одна. В последнем случае кристалл называют магнитоодноосным. Если магнитные моменты атомов (как маленькие магнитные стрелочки) выстроены в одном направлении, образец, подобно постоянному магниту, обладает максимальной магнитной энергией. Такое положение неустойчиво — все природные процессы идут в сторону уменьшения энергии. Поэтому в образце возникает доменная структура — макроскопическая система областей (доменов) с разной ориентацией векторов, так что весь образец в целом оказывается немагнитным. При воздействии магнитного поля разной частоты происходит перестроение доменов - происходит их самоорганизация в зависимости от воздействующей частоты.

Заключение

Переход к нанотехнологиям заставляет более внимательно изучать «труды При-

роды». Природа базируется на самоорганизации. Задача нанотехнологов – понять и использовать отброшенный многовековой практикой опыт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Щука А.А.* Самоорганизация - ключ к нанотехнологиям в электронике. - Вестник Международной Академии Наук, 2008, № 1, с. 52-58.
2. *Резник Н.* Цианобактерии производят нанотрубки . - Наука и жизнь, 2008.
3. *Кандаурова Г.С.* Хаос, порядок и красота в мире магнитных доменов. — Изд. Уральского госуниверситета, 1997, с. 31-52.
4. *Поло Р.А.* Память биологических и технических систем современной радиоэлектроники.- Успехи современной радиоэлектроники, 2002, № 4, с. 54-56.
5. *Поло Р.А.* Эволюция земных самоорганизующихся систем - Успехи современной радиоэлектроники, 2008, № 7, с. 95-96.
6. *Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А.* Морфологическое многообразие наноматериалов, создаваемых методами консервативной и диссипативной самоорганизации. - Международный форум по нанотехнологиям 2009г(секционный доклад).