

8 Применение нанотехнологий и новых материалов

8.1 Лазеры с квантовыми ямами и точками

Самым распространенным типом полупроводникового лазера является лазер на двойной гетероструктуре, где активная область представляет собой тонкий слой узкозонного полупроводника между двумя широкозонными. При достаточно малой толщине активной области она начинает вести себя как квантовая яма и квантование энергетического спектра в ней существенно меняет свойства лазеров.

Основное влияние на свойства лазеров оказывает изменение плотности состояний, происходящее под влиянием размерного квантования. Если в массивном полупроводнике в непосредственной близости от края зоны эта величина мала, то в квантово-размерной системе она не убывает вблизи края, оставаясь равной $m/\pi\hbar^2$. Создание лазеров с квантово-размерной активной областью позволило получить непрерывную генерацию при комнатной температуре и в дальнейшем снизить пороговый ток инжекционного лазера до величин порядка 50 А/см^2 .

Благодаря иной энергетической зависимости плотности состояний меняется не только величина порогового тока, но и его температурная зависимость. Она становится более слабой, в силу чего непрерывную генерацию удастся получить не только при комнатной температуре, но и при температурах на много десятков градусов выше.

Другой важной особенностью лазеров на квантовых ямах является возможность их частотной перестройки. Минимальная энергия излучаемых световых квантов равна $h\nu = E_g + E_1^e + E_1^h$. Она меняется при изменении a (ширина квантовой ямы, и т.п.), т. е. путем изменения ширины квантовой ямы можно осуществлять перестройку частоты генерации, сдвигая ее в коротковолновую сторону по сравнению с лазерами с широкой (классической) активной областью (рисунок 8.1).

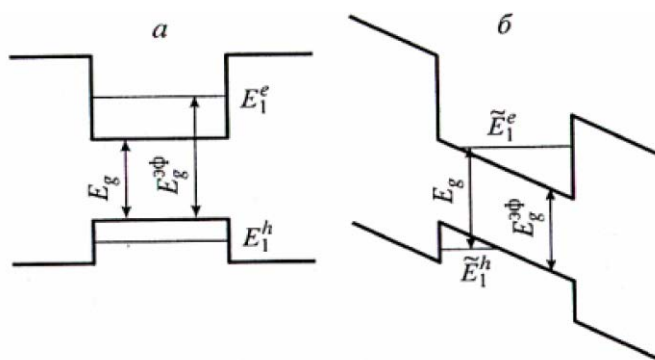


Рисунок 8.1 - Двусторонняя лазерная гетероструктура: а) в состоянии термодинамического равновесия; б) при работе

В квантовых точках энергетический спектр меняется еще более радикально, чем в квантовых ямах. Плотность состояний имеет δ -образный вид, и в результате отсутствуют состояния, которые не принимают участия в усилении оптического излучения, но содержат электроны. Это уменьшает потери энергии и как следствие уменьшает пороговый ток. Лазеры могут содержать одну или (для увеличения оптического усиления) несколько плоскостей, заполненных квантовыми точками. Согласно теоретическим оценкам, диодные лазеры с активной средой из квантовых точек должны обладать значительно лучшими свойствами по сравнению с лазерами на квантовых ямах, а именно:

существенно большим коэффициентом усиления, меньшей пороговой плотностью тока, полной невосприимчивостью к температуре решетки, лучшими динамическими характеристиками и большими возможностями контроля над энергией кванта излучения.

8.2 Фотоприемники на квантовых ямах

Процессы оптической ионизации квантовых ям могут использоваться для создания новых типов приемников инфракрасного излучения. Принцип приемника весьма прост: выброс носителей в зону проводимости широкозонного полупроводника (потенциального барьера) увеличивает проводимость в направлении, перпендикулярном слоям гетероструктуры.

По своему действию такой приемник напоминает примесный фоторезистор, где в роли центров выступают квантовые ямы. Поэтому в качестве времени жизни неравновесных носителей выступает характерное время захвата в квантовую яму τ_q . По сравнению с обычным временем жизни, связанным с захватом на рекомбинационные центры, τ_q обладает двумя важными отличиями.

Во-первых, τ_q значительно (на несколько порядков) меньше времени захвата на центры. Причина в том, что акт захвата связан с необходимостью передачи решетке от носителя достаточно большой энергии, равной энергии связи центра или же величине ΔE при захвате в квантовую яму. Наиболее эффективный механизм передачи энергии — это испускание оптических фотонов с энергией $\hbar\omega_0/2\pi$. Однако энергия связи центров отнюдь не совпадает с $\hbar\omega_0/2\pi$, и потому такой процесс невозможен. Электрон должен отдавать энергию в ходе значительно более медленного каскадного процесса испускания многих акустических фононов. В случае квантовой ямы наличие непрерывного спектра движения в плоскости ямы существенно меняет ситуацию. Становится возможным переход на связанное состояние в яме при испускании оптического фонона с одновременной передачей оставшейся избыточной энергии в движение в плоскости ямы (рисунок 8.2). Если исходный электрон имел энергию, близкую к краю зоны в широкозонном материале, то из рисунка 8.2. видно, что испускаемый фонон должен иметь достаточно большой импульс:

$$q = [2m (\Delta E - E_1 - \hbar\omega_0/2\pi)]^{1/2}$$

в плоскости квантовой ямы. Значительно большая величина взаимодействия электронов с оптическими фононами, нежели с акустическими, определяет малость τ_q по сравнению со временем захвата из центра.

Во-вторых, τ_q немонотонным, осциллирующим образом зависит от параметров ямы. Это связано со свойствами волновой функции электронов в делокализованных состояниях над квантовой ямой ψ_E . Если яма не является резонансной, то амплитуда этой волновой функции в непосредственной окрестности ямы при малой энергии электрона весьма мала. Собственно, τ_q будет относительно велико. Для резонансных квантовых ям вероятность захвата возрастает, т. е. τ_q падает.

Фотопроводимость рассматриваемой структуры, так же как и обычного фоторезистора, определяется произведением трех факторов: скорости оптической генерации, которая в свою очередь пропорциональна коэффициенту поглощения α , времени жизни в делокализованном состоянии τ_q и эффективной подвижности в нем $\mu_{\text{эф}}$, которая должна быть пропорциональна квантово-механическому коэффициенту прохождения электрона над квантовой ямой. Первый и третий факторы максимальны для резонансных квантовых ям, а τ_q , напротив, минимально для них. Однако совокупное действие всех факторов

оказывается таковым, что фотоприемники на квантовых ямах будут иметь лучшие параметры в случае резонансных ям.

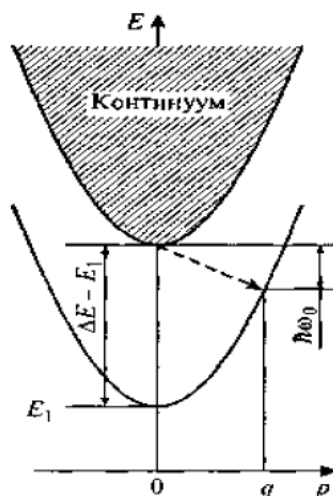


Рисунок 8.2 - Процесс захвата неравновесного электрона в квантовую яму с испусканием оптического фонона

Приемники на основе квантовых ям могут составить конкуренцию фоточувствительным структурам на основе твердых растворов CdHgTe — важнейшему типу приемников для данного спектрального диапазона. Основным достоинством структур на квантовых ямах является большая стабильность и меньший разброс параметров, что особенно важно для матричных фоточувствительных структур.

Путем сравнительно небольших изменений состава широкозонных слоев и толщины ямы можно менять положение максимума и ширину полосы фоточувствительности. Последнее обстоятельство связано с тем, что по мере нарушения точного условия резонанса спектр фотоионизации квантовой ямы становится более плавным и имеет менее резкий максимум.

В связи с тем, что оптическая ионизация квантовых ям может вызываться лишь светом, поляризованным по нормали к квантовым слоям, описанные фотоприемники должны содержать специальные приспособления, поляризующие падающий свет требуемым образом. Есть два основных способа сделать это. Свет может направляться в фоточувствительную структуру под углом через скошенный торец подложки (рисунок 8.3а). В другом варианте свет проходит через подложку по нормали, а должную поляризацию приобретает после дифракции на решетке, специально нанесенной на верхнюю поверхность структуры (рисунок 8.3б).

Возможно альтернативное решение проблемы поляризации, позволяющее избежать описанных выше конструктивных усложнений. Речь идет о выращивании квантовых структур из полупроводников с анизотропным энергетическим спектром. При наличии анизотропии электрическое поле нормально падающей световой волны, лежащее в плоскости слоев, придает электронам импульс под некоторым углом к этой плоскости. С позиций квантовой механики это означает возможность переходов между различными квантово-размерными уровнями или между уровнем и континуумом состояний над квантовой ямой, что и требуется для работы приемника. На практике для реализации этой идеи чаще всего используют гетероструктуры на основе той же, наиболее освоенной

технологически, системы $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, но имеющие не n -, а p -тип легирования. При этом сложный характер энергетического спектра валентной зоны обеспечивает фоточувствительность при нормальном падении света.

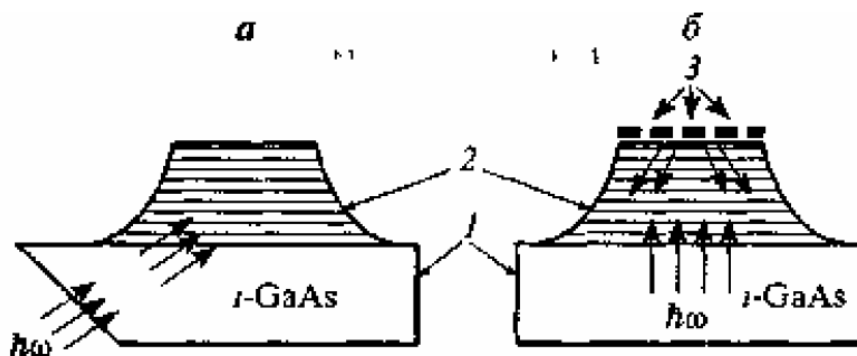


Рисунок 8.3 - Способы ввода излучения в фотоприемник с квантовыми ямами: а — через скошенный торец подложки, б — с помощью дифракционной решетки; 1 — подложка, 2 — фоточувствительная структура с квантовыми ямами, 3 — дифракционная решетка

8.3 Квантово-точечные клеточные автоматы и беспроводная электронная логика

Потребности в разработке логических устройств для нанокomпьютеров с очень высокой плотностью логических элементов и с максимально возможно низким потреблением энергии на одно переключение привели к предложениям использовать в логических элементах проводящие островки очень малого размера — квантовые точки. В таких приборах для реализации вычислений логических булевых функций используют массивы связанных взаимодействующих квантовых точек. Эти новые приборы называют квантово-точечными клеточными автоматами.

Основу прибора составляет ячейка, состоящая из четырех или пяти квантовых точек. На рисунке 8.4 представлена ячейка из пяти квантовых точек: четыре точки расположены в углах квадрата, а одна — в его центре. В ячейку при помощи внешнего напряжения через дополнительный электрод вводятся два избыточных электрона, и ячейка приобретает электрический заряд. Квантовые точки в ячейке располагаются таким образом, что возможно туннелирование только через центральную точку. Из-за электростатического отталкивания между избыточными электронами вся система будет иметь минимальную энергию только в том случае, если электроны расположатся как можно дальше друг от друга, т. е. в углах квадрата, соединенных диагональю. Поскольку таких возможных положений всего два, то система имеет всего два устойчивых состояния (две поляризации), и, следовательно, одно из этих состояний можно считать логической единицей («1»), а второе — логическим нулем («0»). При переходе системы из одного устойчивого состояния в другое меняются поляризация системы и распределение электрических полей вокруг ячейки. С помощью дополнительных электродов, связанных с ячейкой емкостной связью, можно навязать ячейке необходимое состояние и перевести ее в состояние «1» или «0». Если рядом с первой ячейкой расположить вторую (в которой также находится два дополнительных электрона), то электростатическое поле первой ячейки заставит электроны располагаться так, чтобы обеспечить минимум электростатической энергии всей системы (рисунок 8.4). Составляя комбинации из

расположенных разным образом ячеек, можно реализовать разнообразные логические функции и выполнить необходимые логические преобразования и вычисления. На рисунке 8.5 представлен пример комбинации ячеек, при которой состояние на выходе определяется большинством состояний на входе. Предложены разнообразные комбинации ячеек для реализации логических операций. На основе таких элементов возможно создание нанокomпьютера. Важно отметить, что взаимное расположение ячеек обеспечивает передачу логического сигнала без перемещения зарядов вдоль цепочки — в бестоковом режиме, только за счет передачи вдоль цепочки состояния поляризации.

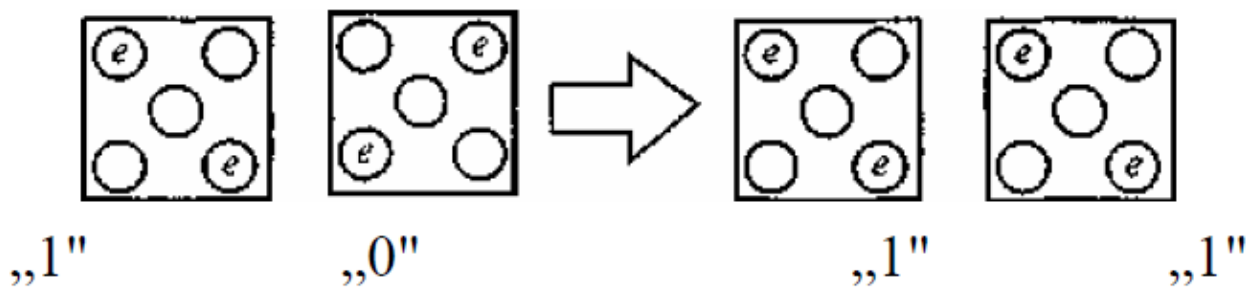


Рисунок 8.4 - Различные конфигурации ячеек квантово-точечных автоматов

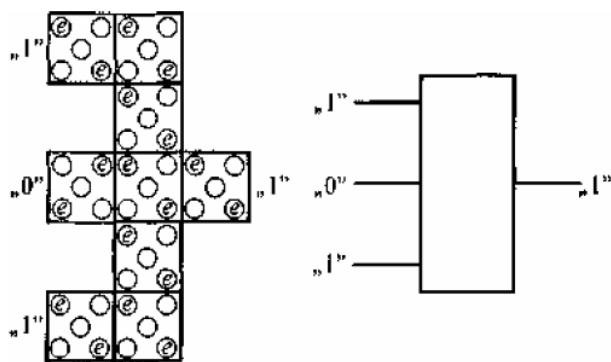


Рисунок 8.5 - Комбинации ячеек квантово-точечного автомата, при которых состояние на выходе определяется большинством состояний на входе

Преимущества логических устройств на основе квантово-точечных клеточных автоматов состоят в том, что по сравнению с аналогичными устройствами на основе полевых транзисторов требуется значительно меньший объем активной области. Например, полный сумматор на основе клеточных автоматов с размером точки 20 нм можно расположить на площади около 1 мкм², в то время как такую же площадь занимает всего лишь один полевой транзистор. Для построения такого же сумматора на основе полевых транзисторов требуется примерно 40 транзисторов. Если еще учесть области коммутации транзисторов между собой, а они, как известно, занимают объем, сравнимый или даже превосходящий объем, занятый активными приборами, то преимущества использования клеточных автоматов становятся очевидными.

Принципиальная возможность функционирования логических элементов на основе клеточных автоматов была продемонстрирована при T = 15 мК на примере ячейки, изготовленной при помощи стандартной электронно-лучевой литографии из

алюминиевых островков на поверхности окисленной кремниевой пластины. Площадь прибора составляла величину $\sim 50 \times 50 \text{ нм}^2$.

Вычислительный процесс в приборах на основе клеточных автоматов осуществляется при переходе всей совокупности ячеек в состояние с минимальной энергией — в основное состояние. Поскольку сложные вычислительные устройства должны содержать большое число ячеек, то состояние с минимальной энергией можно получить разными способами. Это может приводить к ошибкам в вычислениях. Кроме того, такие системы чувствительны к внешним воздействиям и поэтому требуют строгого контроля внешних условий. При повышении температуры вычислительный процесс может быть разрушен. Для ячеек, у которых размер одной квантовой точки — 20 нм, изменение энергии при перезарядке точки составляет величину $\sim 1 \text{ мэВ}$ (примерно $1/20 \text{ кТ}$ при комнатной температуре). Так же как и для одноэлектронного транзистора, рабочую температуру нужно повышать за счет уменьшения размеров ячейки (и соответственно каждой квантовой точки). Существует еще одна проблема, которая должна быть решена для успешной работы устройств на основе клеточных автоматов. Она состоит в том, что поскольку электростатическое поле ячейки влияет на соседние ячейки как в направлении выхода устройства, так и в направлении входа, то из-за случайных воздействий возможно распространение сигнала не только от входа к выходу, но и наоборот. Для устранения этого недостатка предложены устройства на основе квантовых точек, у которых направление передачи сигнала определяется внешним электрическим полем. Практическое изготовление устройств на основе клеточных автоматов находится в самой начальной стадии и требует разрешения целого ряда проблем, в основном технологических.

8.4 Нанокomпьютеры

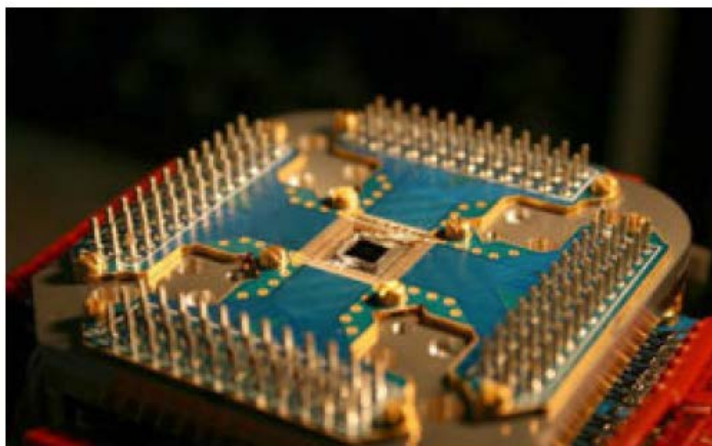
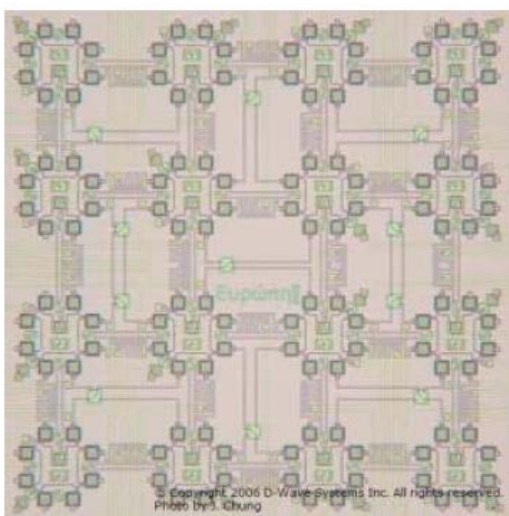
Наноэлектроника в настоящее время вплотную приблизилась к созданию и новых типов вычислительной техники — нанокomпьютеров. Можно предположить, что нанокomпьютеры будут развиваться одновременно по нескольким направлениям, реализующим различные способы представления информации (на основе квантовой логики, классической логики), а также появятся некоторые другие, например, генетические, молекулярно-биологические, молекулярно-механические. Рассмотрим одно из направлений разработки нанокomпьютеров, основанное на теории квантовых вычислений с помощью квантовомеханических логических операций. Устройства, построенные на таком типе вычислений, называются квантовыми компьютерами.

Квантовый компьютер — вычислительное устройство, использующее при работе квантовомеханические эффекты и реализующее выполнение квантовых алгоритмов. Квантовые компьютеры работают на основе квантовой логики.

Идея квантовых вычислений впервые была высказана Ю.И. Маниным в 1980 году, но активно эта проблема стала обсуждаться после появления в 1982 году статьи американского физика-теоретика Р. Фейнмана. В этих работах было предложено использовать для вычислений операции с состояниями квантовой системы. Каждое состояние квантовой системы, в отличие от классической, может находиться в состоянии суперпозиции. В терминах классического компьютера квантовый бит (кубит) в соответствии с законами квантовой механики может находиться одновременно в двух равновероятных состояниях «0» и «1». Тогда два кубита могут быть уже в четырёх смешанных состояниях — 00, 01, 10 и 11, представляя четыре числа сразу. Видно, что

увеличение растёт по степенному закону: на m кубитах можно выполнять одновременно вычисление над 2^m числами параллельно. Это значит, что, используя всего несколько сотен кубитов, можно представить одновременно больше чисел, чем имеется атомов во Вселенной. Данный факт также позволяет предполагать такое же увеличение скорости вычислений квантового компьютера по сравнению с классическим. Это предположение основано на том, что при квантовых вычислениях элементарным шагом является отдельная операция над m -кубитной суперпозицией – принцип квантового параллелизма. Иначе говоря, когда в классическом компьютере вычисляется единственное выходное значение для одного входного состояния, в квантовом компьютере вычисляются выходные значения для всех входных состояний. Иначе говоря, квантовый компьютер может за короткое время решать задачи, с которыми современные компьютеры не могли бы справиться в течение сотен лет.

Конечно, на пути практической реализации квантовых компьютеров стоит огромное количество сложнейших теоретических и практических задач. На сегодняшний день предложены варианты конструкции квантовых компьютеров на основе квантовых точек и сверхпроводящих переходов. Более того, есть заявления коммерческих организаций о создании реальных процессоров на базе кубитов, например, компьютер «Oqion». Он основан на микросхеме, содержащей 16 «кубитов» (рисунок 8.6). Однако здесь необходимо оговориться, что в квантовых компьютерах существуют проблемы, связанные с неоднозначностью интерпретации информации, поэтому заявления о создании квантовых компьютерах ставятся в научном сообществе под сомнение.



а)

б)

Рисунок 8.6 - 16-кубитный процессор «Oqion»: его схема (а) и фотография (б)

Каждый такой кубит состоит из частиц ниобия, окруженных соленоидами. По сути, «Oqion» представляет собой аналоговый компьютер, решающий задачи методом физического моделирования. Такой компьютер лучше всего подходит для расчета сложных и занимающих много машинного времени моделей – финансовых, химических или фармацевтических.

Таким образом, все приведенные здесь факты и бурное развитие нанотехнологий позволяют надеяться на то, что фантастические мечты о суперкомпьютерах в скором времени найдут реальное воплощение.

8.5 Микроэлектромеханические системы (МЭМС)

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – наиболее интенсивно развивающийся сектор современной электроники, называемый микроэлектромеханика, который занимается созданием устройств для преобразования электрической энергии в механическое движение.

Отличие механического поведения машин в макро и наном мире:

1. В наномасштабных объектах отношение площади поверхности к объему детали много больше, чем у устройств макромира, и чисто поверхностные эффекты (например, трение) становятся значительными.

2. В микро и наном мире на механическое поведение детали можно существенно повлиять, изменив тонкий слой материала на её поверхности.

3. Молекулярные силы притяжения между нанообъектами могут превышать упругие силы отталкивания (возникает прилипание).

4. Электростатическая сила, превышает электромагнитную силу, на микро размерах и в наноразмерах становится подавляющей.

Пример 1. МЭМС – датчик, для активации воздушных подушек безопасности в автомобилях. На рисунке 8.7 изображено исходное состояние устройства, которое состоит из горизонтальной кремниевой балочки, длиной несколько микрон, прикрепленной к двум вертикальным полым стойкам, имеющие гибкие стенки. Когда автомобиль, движущийся слева направо, сталкивается, горизонтальная балочка продолжает двигаться по инерции вправо, что вызывает изменение зазора между пластинами конденсатора (см. рисунок 8.7). Это меняет емкость конденсатора, который инициирует импульс электрического тока через нагревательную спираль, помещенную в капсулу с азидом натрия NaN_3 . Мгновенное нагревание приводит к взрывообразному разложению содержимого капсулы: $2\text{NaN}_3 \rightarrow 2\text{Na} + 3\text{N}_2$. Выделяющийся газ азот надувает подушку безопасности.

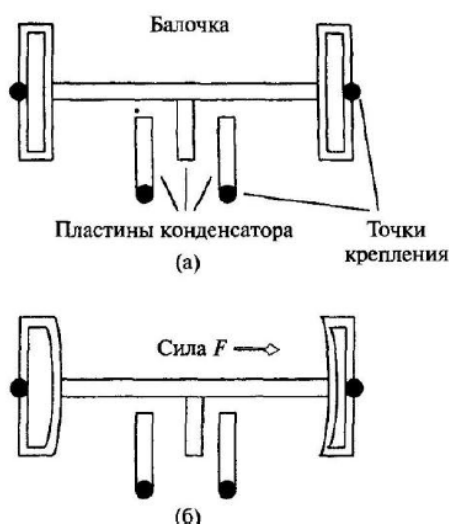


Рисунок 8.7 - Схема МЭМС-устройства используемого для приведения в действие подушки безопасности в автомобиле при его столкновении с препятствием

Пример 2. Чувствительный детектор постоянных магнитных полей содержит кантилевер - закрепленную с одной стороны консольную балочку субмикронных размеров способную колебаться под действием механического, магнитного или теплового возбуждения. Одна из поверхностей балочки покрыта материалом с хорошими магнитострикционными

свойствами. При помещении в магнитное поле материал покрытия меняет свои размеры, что приводит к изгибу кантилевера и изменению резонансной частоты его колебаний (см. рисунок 8.8). Нанокантилеверы имеют высокие значения добротности $Q=10^5$ и низкий уровень термомеханических шумов. Мощности в 10^{-12} Вт достаточно для работы НЭМС-прибора с низким отношением сигнал/шум.

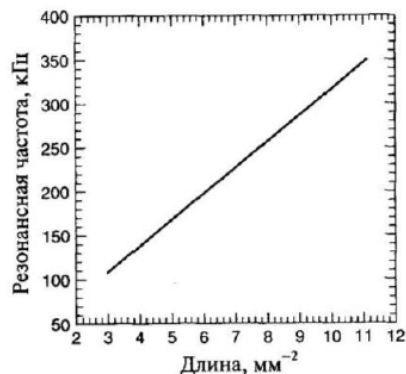


Рисунок 8.8 - График зависимости резонансной частоты МЭМС-кантилевера от квадрата обратной длины балки

Пример 3 Оптико-механические МЭМС используют поворотные микрозеркала с двумя степенями свободы установленные на торсионных подвесах. Это позволяет управлять микрозеркалами в целях отключения или переадресовки каждого канала в отдельности. Луч света из каждого входного или выходного световолокна через свою фокусирующую оптику нормально падает на свое поворотное микрозеркало. Матрица микрозеркал находится на единой панели панели. Лучи после микрозеркал падают на большое неподвижное зеркало, расположенное сбоку от пучка, которое перераспределяет лучи между световолокнами. Это зеркало, расположенное сбоку от вертикального пучка световолокон, выполняет роль трехмерного маршрутизатора световых потоков для оптоволоконных каналов связи. Микрозеркала как переключатели света позволяют отключать или переадресовывать каждый канал в отдельности (см. рисунки 8.9 и 8.10).

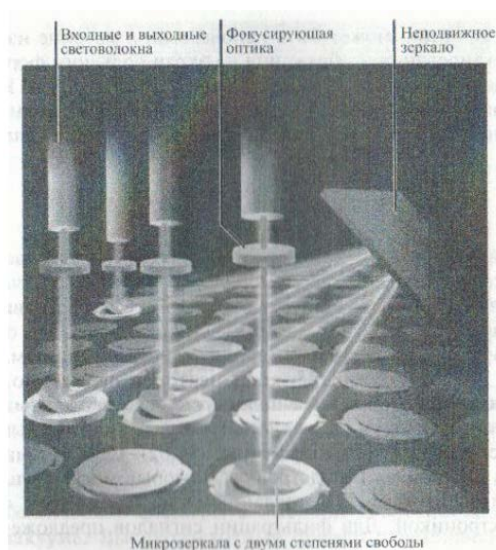


Рисунок 8.9 - Оптико-механическое МЭМС с поворотными микрозеркалами в виде трехмерного маршрутизатора световых потоков фирмы Texas Instrument Inc

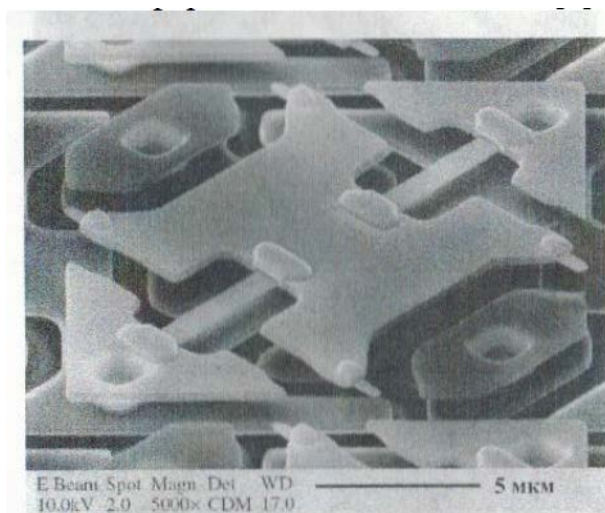


Рисунок 8.10 - Микромеханический подвес микрозеркала (типа качели) для матричного оптико-механического дисплея фирмы Texas Instrument Inc

8.6 Наноэлектромеханические системы (НЭМС)

Наноэлектромеханические системы (НЭМС)- это направление в рамках развития программ работ по нанотехнологии и микроэлектронике под названием «наноэлектромеханика», продолжение МЭМС в нанообласть.

К настоящему времени выделяются:

1. Устройства, в которых перемещение фиксированной массы находится в зависимости от напряжения, поступающего от микросхемы, например, в стабилизаторах частоты.
2. Устройства, в которых микросхемы регистрируют перемещение фиксированной массы, инерционные устройства (например, акселерометры).
3. Устройства, в которых величина перемещаемой массы определяется внешними факторами, например, в датчиках газового состава.
4. Устройства, в которых при электромеханическом преобразовании энергии возникают механические силы, используемые для совершения работы в пределах корпуса микросхемы механической работы (нанодвигатели, наноактюаторы), (НЭМС-фильтры).

Наиболее простые, базовые элементы НЭМС-наноконсоли и нанобалки, которые являются механическими микрорезонаторами. Они имеют нанометровые размеры с различными возможными конфигурациями, создаваемыми в основном из монокристалла кремния. Более сложные конструкции это мембраны круглые или прямоугольные.

Кремний обладает высоким механическими параметрами, модуль Юнга = 3×10^{11} Н/м, прочность на изгиб и разрыв. В настоящее время кремний является базовым материалом для МЭМС и НЭМС. Однако при изготовлении микро и наноконсолей используются карбиды и нитриды SiC, Si₃N₄, AlN и др.

Характерные размеры нановибраторов (наноконсолей и нанобалок) будут находиться в следующем диапазоне: толщина 10-50 нм, длина 10-1000 нм, ширина 20-100 нм.

Движущей силой перехода на новый масштаб выполнения МЭМС является перспектива получения новых функциональных возможностей приборов или возможность значительного качественного улучшения уже достигнутых на технологии МЭМС характеристик.

Масштабным применением нанорезонаторов является использование их как считывающих элементов для регистрации присутствия и изменения нанобъемов

концентраций химических элементов, токсических веществ, включая взрывчатых веществ.

Задачей нанoeлектромеханики является построение наноманипуляторов, способных оперировать отдельными молекулами и атомами. В настоящее время для этих целей применяют атомно-силовые сканирующие туннельные микроскопы, которые недостаточно эффективны в управлении. Инструментом таких наноманипуляторов могут быть наноконсоли выступающие в роли нанопинцетов, которые могут перемещать отдельные молекулы и синтезировать новые органические наноструктуры.

Актуаторы – устройства, преобразующие электрическую энергию в механическую и наоборот. Пример: актуатор состоящий из двух листов однослойных нанотрубок, удерживаемых вместе двухсторонним скотчем (см. рисунок 8.11). Изолирующий пластиковый зажим скреплял листы сверху и фиксировал электрические контакты. Листы помещали в электролит из одномолярного раствора NaCl. Несколько вольт приложенного напряжения изгибает лист, т.к. углеродные нанотрубки деформируются под действием сообщенного им электрического заряда. Переменное напряжение вызывает колебание такого кантилевера.

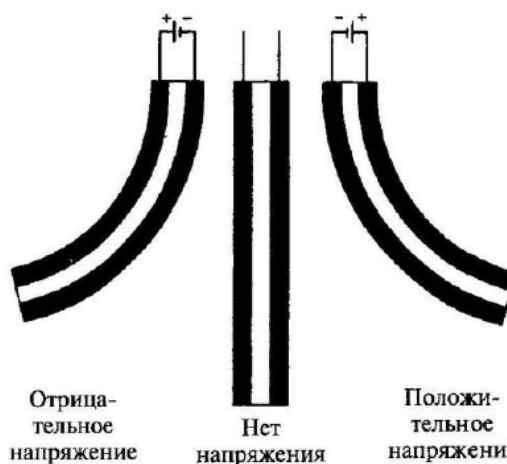


Рисунок 8.11 - Схема актуатора, состоящего из двух листов однослойных нанотрубок, удерживаемых двухсторонним скотчем. Справа положительное механическое напряжение

Этот опыт показывает, что возможно создание наноразмерных актуаторов, использующих всего три однослойных углеродных нанотрубки: две внешние должны быть металлическими, внутренняя нанотрубка - изолирующая. Они должны быть выставлены параллельно и находится в плотном контакте.

Молекула азобензола изображена на рисунке 8.12. При облучении светом длиной волны 313 нм она может изменить свою конфигурацию с транс-изомерной формы на цис-изомерную. Если облучать цис-изомер светом с длиной волны 380 нм, то молекула возвращается в транс-форму. Цис-изомер короче, чем транс-изомер.

Построена молекулярная машина, основанная на фотоизомеризации азобензольного полимера. При облучении полимера, прикрепленного к кантилеверу импульсами света 420 нм и 365 нм, балка кантилевера совершает колебания. Это первая демонстрация искусственной одномолекулярной машины, которая преобразует энергию света в механическую работу.

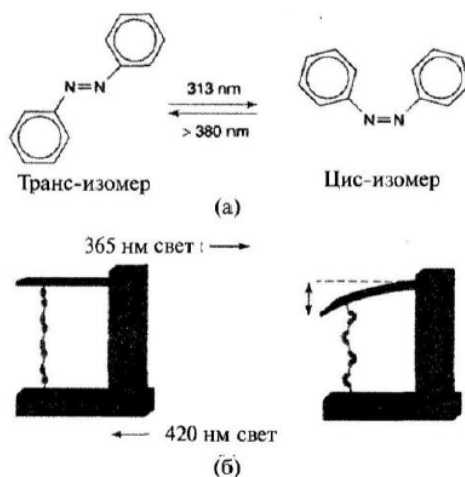


Рисунок 8.12 - а) Индуцированная ультрафиолетовым светом цис-транс изомеризация азобензола. б) Молекулярная машина, основанная на индуцированном светом изомерных превращениях азобензольного полимера. Он сокращается при переходе в цис-форму, вызывая изгиб кантилевера

После создания микро- и нано- электромеханических систем следует создание микро и нано роботов. В программе «Smart dust» - умная пыль, создано семейство мини роботов, размером с пылинку, способных создать сеть для передачи акустической и световой информации.

Молекулярные переключатели могут стать основой устройств для хранения информации, и логических схем в компьютерах, использующих двоичную систему. Если молекула может находиться в двух различных состояниях, в форме А, или В и обратимо переводится внешними воздействиями (свет или напряжение) из одного состояния 0 в другое 1, это можно использовать для запоминания информации. Оба состояния должны быть термоустойчивыми и способными переключаться много раз. Эти два состояния должны быть различимыми для некоторого зонда. Такое зондирование называется режимом чтения.

Схема переключателя на основе молекулы азобензола, которая имеет цис-форму и транс-форму показана на рисунке 8.13. Цис-изомер восстанавливается до гидробензола в электрохимическом процессе путем добавления двух атомов водорода под действием более отрицательного потенциала, а затем возвращается к транс-изомеру путем окисления, удаляющего атомы водорода. Для построения молекулярного компьютера необходимы различные соединения молекулярных переключателей в виде молекулярных логических элементов булевой алгебры.

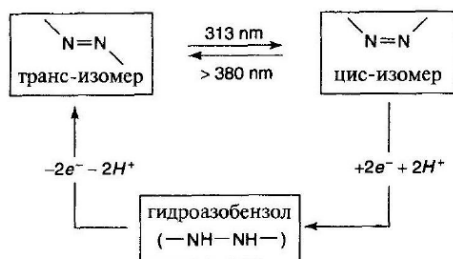


Рисунок 8.13 - Схема управления процессом переключения азобензола, посредством фотоизомеризации (вверху) и электрохимии (внизу) позволяющая реализовать двухрежимный переключатель

8.7 Микро- и нанотрибология

Согласно законам пропорциональной миниатюризации, на микро- и наноуровне поверхностные силы доминируют над объемными. В связи с этим при разработке микромеханических систем большое значение следует уделять трению и износу движущихся частей. Надо отметить, что ввиду малой массы микро- и наномеханических элементов они обладают низкой инерцией, что ведет к высоким динамическим характеристикам (скорости отклика) и высокой рабочей частоте собственных колебаний. Трение приводит не только к энергетическим потерям и снижению общего коэффициента полезного действия (КПД) механических устройств, но и к износу, который негативно воздействует на их функциональное поведение и ведет к быстрому старению и поломке элементов. Иначе говоря, трение определяет не только эффективность работы устройства, но и его долговечность.

Обычно под трением понимают механическое сопротивление, возникающее при относительном перемещении двух соприкасающихся тел в плоскости их касания. Сила трения является совокупным эффектом, возникающим в результате упругости, адгезии, вязкости, капиллярных сил, химических особенностей, фононного и электростатического взаимодействий и т.д. На величину трения влияет тип взаимодействующих материалов и состояние их поверхности. В зависимости от условий может преобладать то или другое явление. Таким образом, трение - это взаимодействие контактных областей поверхностей, а следовательно, оно воздействует только на поверхностный слой материала, практически не затрагивая его объем.

В зависимости от масштаба, на котором изучают трение, выделяют макро-, микро- и нанотрибологию. Каждый из разделов трибологии исследует трение в соответствующем масштабе. Так, в макротрибологии трение исследуют на уровне больших объектов и не рассматривают особенностей строения вещества. Основным соотношением макротрибологии является закон Амонтона-Кулона: $F_{тр} = kN$, где k - безразмерный коэффициент трения, N - сила реакции опоры. Коэффициент трения несет всю информацию о взаимодействующих поверхностях и зависит от температуры, влажности, скорости скольжения и др. В макротрибологии сила трения не зависит от площади контакта двух тел, а саму площадь контакта считают равной геометрической площади контактирующих объектов. При этом величина макроскопической силы трения является усредненной силой трения отдельных микроконтактов, которые могут варьироваться в широких пределах.

Микротрибология исследует взаимодействие элементарных микроконтактов. В отличие от макротрибологии, применяющей представления и терминологию теории сплошных сред, в данном случае используют более фундаментальные понятия, основанные на взаимодействиях отдельных атомов. Во многих моделях процессов трения на микроуровне рассматривают взаимодействие выступа с некоторой поверхностью. В связи с этим основным экспериментальным методом микротрибологии стала сканирующая зондовая микроскопия (соответствующая методика носит название метода латеральных сил). Острие зонда позволяет "почувствовать" трение на чрезвычайно малой контактной площадке, состоящей из одного или нескольких атомов.

Выделяют жидкое и сухое трение, причем жидкое трение реализуется в большинстве реальных систем (трение является жидким даже тогда, когда на поверхности твердых тел образуется молекулярная пленка жидкости). В качестве сухого трения можно

рассматривать процессы трения в вакууме или трения с большой нормальной нагрузкой, что приводит к вытеснению жидкости из-под зонда.

Сила трения является диссипативной силой, то есть при скольжении поверхностей друг по другу происходит рассеяние механической энергии, а каждый из эффектов, приводящих к трению, имеет свой механизм диссипации энергии.

В качестве таких механизмов в случае сухого трения выделяют атомарные вибрации, рассеивающие энергию в виде колебаний атомов (фононное рассеяние); разрушение атомарных связей в микронеровностях; разрыв адгезионных связей, возникающих между выступами соприкасающихся поверхностей; возбуждение электрон-дырочных пар (эффективность такого процесса значительно ниже эффективности фононного рассеяния). Жидкое трение существенно зависит от толщины слоя жидкости. Мономолекулярный слой жидкости фактически не влияет на механизмы диссипации энергии, и этот процесс можно рассматривать в приближении сухого трения. Увеличение количества жидкости на поверхности приводит к блокированию рассеяния энергии по фононному каналу, а преобладающим становится расход энергии на преодоление вязкости жидкого слоя. Для более толстых пленок основную роль играют капиллярные эффекты.

В микробиологии зависимость силы (сухого) трения от нормальной приложенной нагрузки вычисляется по формуле Баудена-Табора: $F_{\text{тр}} = \tau A_c$, где τ касательное напряжение, A_c - реальная площадь элементарного контакта. Эта площадь зависит от взаимной упругой деформации контактирующих поверхностей. Площадь такого контакта может быть получена решением задачи Герца (определение деформаций при локальном соприкосновении тел): $F_{\text{тр}} = \tau \pi (RN/K)^{2/3}$, где R - радиус кривизны выступа или зонда, N - нормальная сила, K - эффективный модуль Юнга, вычисляемый по формуле $1/K = 3/4((1-\mu^2)/E + (1-\mu'^2)/E')$, где E, E' - модули Юнга, μ и μ' - коэффициенты Пуассона соответствующих материалов. Для учета адгезионных взаимодействий в твердых телах используют модель Маугиса.

В случае жидкого трения к нормальной силе необходимо прибавить адгезионную составляющую, связанную с наличием капиллярных взаимодействий. Эта сила дополнительно притягивает друг к другу соприкасающиеся поверхности и рассчитывается по уравнению $F_c = 4\pi\gamma R$, где γ - коэффициент поверхностного натяжения. Модель Баудена-Табора хорошо подтверждена на опыте.

Одной из основных особенностей микротрибологии является эффект прилипания-скольжения, заключающийся в неравномерности движения одной поверхности относительно другой. В некоторый момент выступы поверхностей слипаются в результате адгезии или капиллярных сил, и для их последующего отрыва необходима преобладающая сила. Затем выступ перескакивает к другой точке и т.д. Эффект прилипания-скольжения существенно зависит от скорости движения. Так, при достижении некоторой критической скорости скольжения эффект пропадает, и сила трения становится регулярной.

Задачей нанотрибологии является объяснение трения на уровне взаимодействия отдельных атомов. Модель трения на наноуровне рассматривает движение отдельного атома по поверхности в поле потенциальных сил $U(x)$, создаваемых периодическим потенциалом атомов другой поверхности (рисунок 8.14): $U(x) = -U_0 \cos(2\pi x/a)$, где a - период решетки.

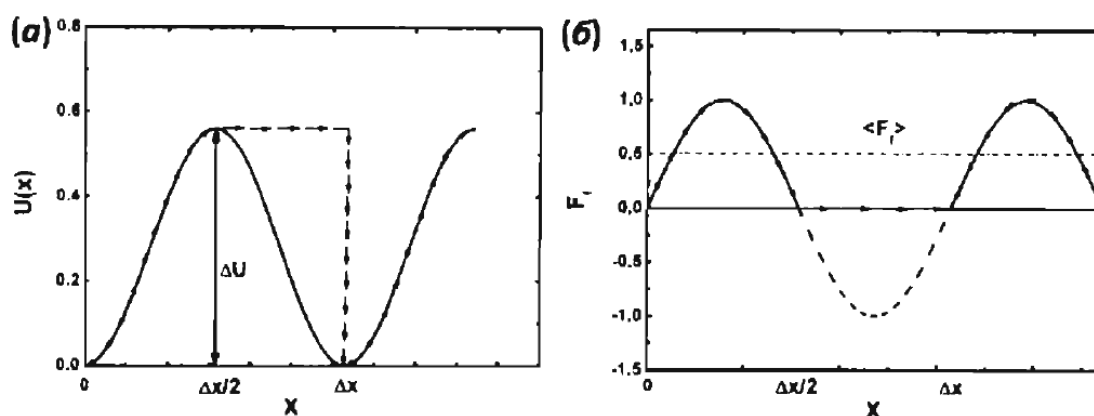


Рисунок 8.14 - Потенциальная энергия и траектория зонда (а), а также мгновенная и средняя сила трения (б) при движении атома в периодическом потенциале поверхности

При этом неконсервативность системы достигается введением "искусственной" потери энергии системы при движении атома из верхнего энергетического состояния в нижнее (рисунок 8.14). Тогда мгновенная сила трения в каждой точке траектории атома составляет: $F_{\text{тр}}(x) = \partial U(x) / \partial x$ при $0 < x < \Delta x / 2$ и $F_{\text{тр}}(x) = 0$ при $\Delta x / 2 < x < \Delta x$.

Ввиду упругой фиксации атома в твердом теле потерянная энергия передается вглубь тела в виде фононных колебаний и в последствии диссипируется. Среднее значение моментальной силы трения на всей траектории движения считают равным силе трения в микротрибологии.

Экспериментальное определение нанотрения методом атомно-силовой микроскопии в режиме регистрации латеральных сил показывает интенсивный эффект прилипания-скольжения. Для качественного понимания нанотрения обычно рассматривают модель движения упругого зонда в поле потенциальных сил, создаваемых периодическим потенциалом атомов сканируемой поверхности. При движении зонда с увеличением потенциальной энергии (в область с высоким потенциалом) зонд испытывает сопротивление образца, соответствующее силе трения. При этом зонд отклоняется и как бы "прилипает" к поверхности. Достигнув максимума потенциала, зонд срывается и начинает колебательные движения в направлении сканирования, которые постепенно затухают, а накопленная энергия диссипируется. Усреднение колебаний зонда позволяет наблюдать скачкообразный характер его движения, что соответствует эффекту прилипания-скольжения. Сила трения при этом имеет пилообразный профиль. В двумерной модели движение имеет некоторые особенности. Зонд движется не только вдоль направления сканирования, но еще и ходит из стороны в сторону, что связано с отклонением зонда от потенциальных максимумов к минимуму энергии.