

ПРИБОРЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

А. А. Щука

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Москва

Nanoelectronic Devices

A. Shchuka

Moscow state Institute of radio engineering, electronic and automation (technical university), Moscow

Представлен обзор состояния разработок наноэлектронных структур, а также проблем, связанных с такими разработками.

A survey is devoted to state of the art of nanoelectronic structures and some problems related to their development.

Введение в наноэлектронику

Нанотехнологию можно определить как сумму технологий, процессов и методик, основанных на манипуляциях с отдельными атомами и молекулами с целью получения новых материалов, приборов и устройств,

Нанотехнология открывает перспективы ее широкого использования в электронике, материаловедении, химии, механике, биомедицине и других областях науки и техники. Напомним, что в атомной и квантовой физике единицей длины принято считать величину 10^{-10} м или 1Å . А ангстрем выбран масштабом потому, что он соответствует диаметру самого маленького из атомов — атому водорода. Диаметры других атомов могут лишь немного превышать 2Å .

Нанометр в десять раз больше. Принято считать нано диапазоном область от 1нм до 100нм.

В живой природе, состоящей так же как и неживая материя из атомов, молекулы протеина и липидов имеют размеры до 10 нм. Масштаб рибосом и вирусов лежат в пределах 100 нм. Интересно отметить, что один из продуктов нанотехнологии — нанотрубки, а также элементы сверхбольших интегрированных схем имеют размеры тоже 100 нм. Именно это обстоятельство вселяет надежды на успешное совмещение технологий живых и неживых систем, создание микроминиатюрных устройств, лекарств.

В технологических процессах, в том числе в нанотехнологии, различают две стратегии создания изделия.

Первая стратегия получила название технологии «сверху-вниз» (top-down). Вспомним принцип Родена при создании замечательных скульптур: бери глыбу гранита и удаляй все лишнее.

Вторая стратегия в технологии создания структур получила название «снизу-вверх» (bottom-up). На-

пример, технология ваения скульптуры из кусочков глины или гипса.

Будем рассматривать нанотехнологию в интересах электроники, конкретней — микроэлектроники. Возникшая в середине прошлого столетия полупроводниковая электроника стала самым крупным достижением второй половины XX века. К концу столетия полупроводниковая электроника в определенной степени трансформировалась в микроэлектронику. Основные изделия микроэлектроники — интегральные схемы, микропроцессоры, запоминающие устройства стали основной информационной техникой, бытовой электроники, медицины, автомобилестроения, авиации и т. д. Перечень отраслей не имеет конца, потому что логика развития любой отрасли занятий, 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. Приведем несколько ярких примеров сегодняшнего уровня достижений микроэлектроники. Сегодня количество транзисторов, ежегодно поставляемых на рынок составляет 10^{19} — 10^{20} штук. Плотность упаковки на чипе транзисторных структур такова, что на булавочной головке можно разместить 200млн транзисторов (порядка 108 шт.). Причем расстояние между двумя соседними транзисторами составляет величину $1/10000$ толщины человеческого волоса.

В корпорации Intel себестоимость производства транзисторов упала до такой степени, что цена транзистора стала сопоставимой с ценой печатания типографского знака в книге, например запятой.

Такие достижения являются следствием развитой стратегии анализа и выбора или стратегией «сверху-вниз».

Однако на пути продолжения тенденций роста степени интеграции встают барьеры: технологический, физический, энергетический... Так, фотолитографическая технология, лежащая в основе технологии производства интегральных схем, достигла своего физического совершенства. На подходе рентгеновская литография, лазерная литография. Лазерная литография позволяет получить разрешение элементов схемы лучше 10 нм. Процесс печати схемы занимает 250 наносекунд! На преодоление технологического барьера направлена, например, американская программа The National Technology Roadmap for Semiconductors. В соответствии с этой программой к 2015 году будут проектироваться транзисторы с шириной затвора 20 нм, при технологической норме 30 нм. Будут увеличены площади кристаллов интегральных схем до 10^9 вентиляей. При этом рабочая частота составляет 30 — 30 ГГц. Это в проекте.

Однако много вопросов не решено на пути преодоления физических барьеров. Среди них известная проблема межсоединений: в современных интегральных схемах лишь 10% площади занято транзисторами, а 90% межсоединениями. Масштабирование элементов транзисторных структур с целью перехода от микро- к нанометровым масштабам является весьма деликатным процессом. Создать транзисторные структуры в нанометровом масштабе сегодня уже под силу серьезным фирмам. Однако не решены вопросы их интеграции, вопросы создания групповой технологии производства интегральных схем в нанометровом масштабе, создание новых или традиционных элементов и компонентов интегральных схем.

В традиционных схемах микроэлектронной схемотехнике устройства всегда имеют «вход» и «выход», которые пространственно разделены и локализованы в электрической схеме, а также в определенных контактах интегральной схемы. Все связи в интегральных схемах реализованы с помощью гальванических или емкостных связей. Реализация таких связей осуществляется благодаря изменению типов проводимости исходной подложки, созданием различных энергетических барьеров на пути потока носителей (электроны, дырки). Информация обрабатывается и хранится в виде отдельных битов (логические «0» и «1»), физически реализованных в виде тока, напряжения, заряда в определенной точке интегральной схемы. Процесс сохранения состояния в логической цепи «0» или «1», обеспечивается в микроэлектронике, как правило, «переносом» через полупроводниковый переход транзистора порядка 100 тысяч электронов. Для передачи одного бита информации, такой подход выглядит несколько расточительно. К тому же, часть из этих сотен тысяч электронов создаст тепловой шум, другая часть, из-за туннельного эффекта, вообще «улетит» через подложку отказавшись выполнять полезную работу, еще одна часть просто рассеется теплом в окружающее пространство. Все перечисленные

недостатки, как и многие другие, являются неотъемлемой частью современных методов создания микроэлектронных устройств.

Магистральным направлением развития микроэлектроники является уменьшение топологических норм транзисторных структур. Другими словами, переход от микрометрового в нанометровый диапазон линейных размеров или создание низкоразмерных структур.

В этом случае говорят о наноэлектронике. Совсем иная физическая картина рисуется при рассмотрении наноэлектронных устройств. Уменьшение размеров на несколько порядков практически меняет физические основы работы наноэлементов.

В наноэлементе используются уже не электроны как частицы, переносящие электрический заряд, а их волновые функции.

Процесс дрейфа и диффузии, характерные для микроэлектронных элементов, отсутствуют вовсе в наноэлектронных элементах. В основе наноэлементов лежат полевые связи, сформированные потенциальные барьеры. «Вход» и «выход» элемента локализованы не в пространстве, а во времени. В наноэлектронных структурах определить «вход» или «выход» возможно в определенные промежутки времени, когда существует определенный порог внешних воздействий, соответствующий «входу» или «выходу». Этот промежуток времени получил название рефлекторного периода и с его помощью обеспечивается распространение сигнала в определенном направлении. Переход от одного устойчивого состояния наноструктуры к другой происходит через возбужденные неустойчивые состояния.

Физика низкоразмерных структур сегодня представляется одним из актуальнейших и динамично развивающихся направлений электроники. Именно в этой области ожидается исследование фундаментальных физических явлений для практического применения: целочисленный и дробный квантовый эффект Холла в двумерном электронном газе, вигнеровская кристаллизация квазидвумерных электронов и дырок, высокочастотные блоховские осцилляции, перенос информации солитонами, флюксами, самоорганизация систем на квантовых точках, а также многое другое из нового мира низкоразмерных структур.

Возникло новое направление конструирования приборов и устройств электроники, получившее название «зонной инженерии» или «Инженерии волновых функций». Элементной базой этого направления электроники стали низкоразмерные структуры, которые назовем наноэлектронным элементом.

Как правило, наноэлектронный элемент состоит из набора квантовых ям и потенциальных барьеров. Энергетический спектр таких элементов зависит от размеров, а добавления лишь одного электрона существенно меняет энергетическую диаграмму наноэлектронного элемента. В наноэлектронике структурированные компоненты обладают свойством многофункциональности, способны выполнять сложные динамические функции.

В качестве материалов изделий микроэлектроники используются легированные полупроводники. В нанoeлектронике используются гетероструктуры, наноструктурированные материалы, кластеры, органические материалы. Технология формирования наноструктур или инженерия волновых функций основана на процессах направленного роста, методах сканирующей туннельной микроскопии, атомной силовой микроскопии. Если плотность размещения активных элементов в интегральных схемах достигает 10^8 см^{-2} , то в устройствах нанoeлектроники она может достигать 10^9 – 10^{10} элементов на квадратный сантиметр.

Под нанoeлектроникой понимают направление электроники, в котором изучаются физические явления и процессы взаимодействия электронов с электромагнитными полями, а также разработка технологии (нанотехнология) создания приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется для передачи, обработки и хранения информации.

Исключительно малая инерционность электронов позволяет эффективно использовать взаимодействие электронов с микрополями внутри атома, молекулы или кристаллической решетки для создания приборов и устройств нового поколения, отличающихся высокой производительностью, ничтожным потреблением энергии, сверхминиатюрными размерами.

Нанoeлектроника является логическим развитием микроэлектроники в соответствии со стратегией «сверху-вниз».

Несколько слов о стратегии «снизу-вверх». Эта стратегия пока более характерна для мира живой природы. В этом процессе отдельные атомы или молекулы группируются по заданному закону в микроблоки с заданными функциями.

Следует заметить, что для живой природы характерны следующие особенности:

- используются не отдельные природные элементы и материалы, а их композиты;
- различаются иерархические уровни организации или самоорганизации;
- используемые для синтеза материалы отличаются гибкостью и мягкостью;
- основными технологическими процессами являются самосборка, репликация, деление на основе явлений самоорганизации;
- формирование новой структуры осуществляется с использованием определенного шаблона или матрицы, например, записанной информации в ДНК.

Стратегия «снизу-вверх» позволит сопрячь в нанодиапазоне биологические объекты с рукотворными элементами нанoeлектроники. Примером могут служить процессы фуллерены и углеродные нанотрубки, используемые при создании композитных материалов.

Вместе с тем в изделиях нанoeлектроники, созданных по такой стратегии и соответствующей технологии, неизбежно возникают принципиальные нере-

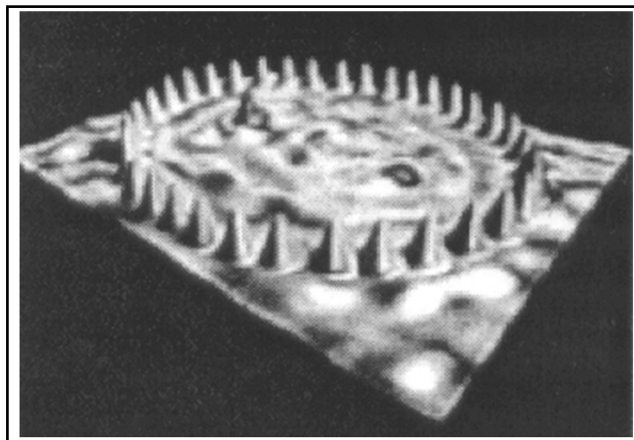


Рис. 1. Вид дебройлеровской волны или «квантовый загон» для электронов.

шенные вопросы. Прежде всего это разработка процессов сомоорганизации структур.

По мере приближения характерного размера твердотельной структуры электронного прибора к нанометровой области, соизмеримой с размерами атомов, проявляются квантовые свойства электронов.

Если в микроэлектронных приборах поведение электрона определялось поведением элементарной частицы, имеющей массу и заряд, то в нанoeлектронных приборах поведение электрона определяется его волновыми свойствами.

Движение электронов как волны описывается уравнением Шредингера для нерелятивистских электронов и уравнением Дирака для релятивистских. В нанoeлектронике обычно используются нерелятивистские электроны.

На рис. 1 приведена уникальная фотография экспериментально подтверждающая наличие дебройлеровской волны. В лаборатории фирмы ИВМ в помощью туннельного микроскопа удалось рассадить атомы кобальта вдоль периметра кольца диаметром 20 нм на поверхности меди.

Если внутри кольца поместить еще один атом кобальта, то возникает его изображение, инверсное относительно центра кольца. Эффект инверсности объясняется интерференцией дебройлеровской волны атома кобальта на периодической решетке других атомов.

Возникновение или отсутствие изображения зависит от положения вновь имплантированного атома.

Если дебройлеровские волны складываются в фазе в процессе конструктивной интерференции, то изображение появляется. При деструктивной интерференции оно исчезает.

Изображение интерференции удалось получить на туннельном микроскопе. Эта картинка — одно из доказательств волновой природы отдельного атома или электронов и внешних его орбит.

Вместе с тем в настоящее время разрабатываются транзисторные наноструктуры, в которых ис-

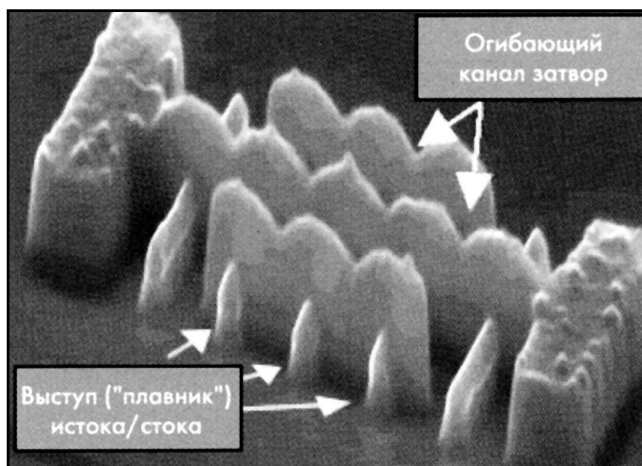


Рис. 2. Структура FinFET-транзистора.

пользуются традиционные электронные потоки, традиционные методы управления и детектирования электронных потоков.

Нанотранзисторные структуры

Нанoeлектронные транзисторные структуры возникли на базе микроэлектронных транзисторов, которые являются элементной базой микроэлектроники. Следуя основной тенденции микроэлектроники, а именно постоянному росту степени интеграции, размеры транзисторных структур постоянно уменьшались. Основной кремневой транзисторной структурой, вошедшей в арсенал средств нанoeлектроники, является кремниевая МДП-структура.

Разработки транзисторных структур для субмикронной технологии следующих поколений на 0,13; 0,10; 0,07 мкм ведутся по разным направлениям. Технология нанометрового диапазона будет промышленной технологией на ближайшие полвека. Исследователям пока предложено несколько путей выхода из кризиса при масштабировании параметров:

- КНИ-транзисторы (кремний на изоляторе) с ультратонким основанием (Ultrathin Body- УТВ);
- приборы с управляемой проводимостью канала;
- транзисторы с двойным затвором;
- плавниковоподобный полевой транзистор (Fin FET);
- одноэлектронные транзисторы.

Рассмотрим некоторые транзисторные структуры.

КНИ-транзисторы имеют полностью или частично обедненное носителями основание. Вследствие обеднения подложки зарядами электрическое поле в инверсионном слое прибора существенно меньше, чем в обычных приборах с сильнолегированной областью канала.

Структуры с ультратонким основанием изготавливались по различным технологиям. По одной из них фирма Intel создала Tera Hertz — транзистор, для кото-

рого характерна низкая емкость перехода, высокая стойкость к облучению. Этот тип транзисторов обладает высоким быстродействием и низкой потребляемой мощностью. При напряжении 1,3 В рабочий ток р-канального транзистора, например, равен 650 мкА/мкм, ток утечки всего 9 нА/мкм. Такие транзисторные структуры вселяют надежду создать на их основе микропроцессоры с топологическими нормами 20 нм, быстродействием до 20 ГГц и рабочим напряжением 1 В. В чипе микропроцессора будет находиться от 10^9 до 10^{12} Tera-Hertz-транзисторов.

Транзисторы с двойным затвором. В транзисторах с двойным затвором удалось вдвое увеличить ток транзистора.

Одним из примеров транзистора с двойным затвором является конструкция FinFET-транзистора (Fin Field Effect Transistor). Свое название он получил из-за конструктивных особенностей. В этом приборе тонкое кремниевое тело имеет форму плавника (fin) и обернуто затвором (рис. 2).

Затвор формирует два самосовмещающихся канала, расположенных с двух сторон кремниевого тела. Передняя выступающая часть тела представляет собой исток, задняя — сток. Каналы индуцируются напряжением на затворах вдоль обеих сторон пластины. Ток в транзисторе протекает в плоскости, параллельной плоскости тела. Активная ширина прибора равна высоте тела — плавника. Это тело можно увеличивать путем параллельного включения многих столбиков, формирующих исток и сток. Удастся создать транзисторы с длиной канала порядка 30 нм. Пороговое напряжение транзистора составляет порядка 0,1 В, управляющий ток не превышает 60 нА/мкм. Пороговое напряжение насыщения составляет 0,15 В при рабочем токе 55 нА/мкм и токе утечки 7 нА/мкм.

Гетеротранзистор представляет собой транзистор, содержащий один или несколько гетеропереходов. Зонные диаграммы гетеропереходов имеют разрывы зон, которые можно использовать для ограничения движения носителей заряда в направлении, перпендикулярном плоскости гетероперехода. В гетеропереходах носители заряда ведут себя в зависимости от направления движения. Гетеропереходы формируются, как правило, с помощью тонких слоев. Поэтому в направлении перпендикулярном слою энергетический спектр носителей заряда имеет дискретный характер и имеет место размерное квантование. В двух других направлениях плоскости слоя спектр носит непрерывный характер и сохраняется зонная структура.

Различают несколько видов гетеротранзисторов.

НЕМТ-транзисторы или гетероструктурные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов или НЕМТ-транзисторы (High Electron Mobility Transistor) имеют большую крутизну ВАХ или большую предельную частоту. В основе работы НЕМТ-транзисторов лежит идея использования «квантового колодца» в качестве канала. В квантовом колодце формируется

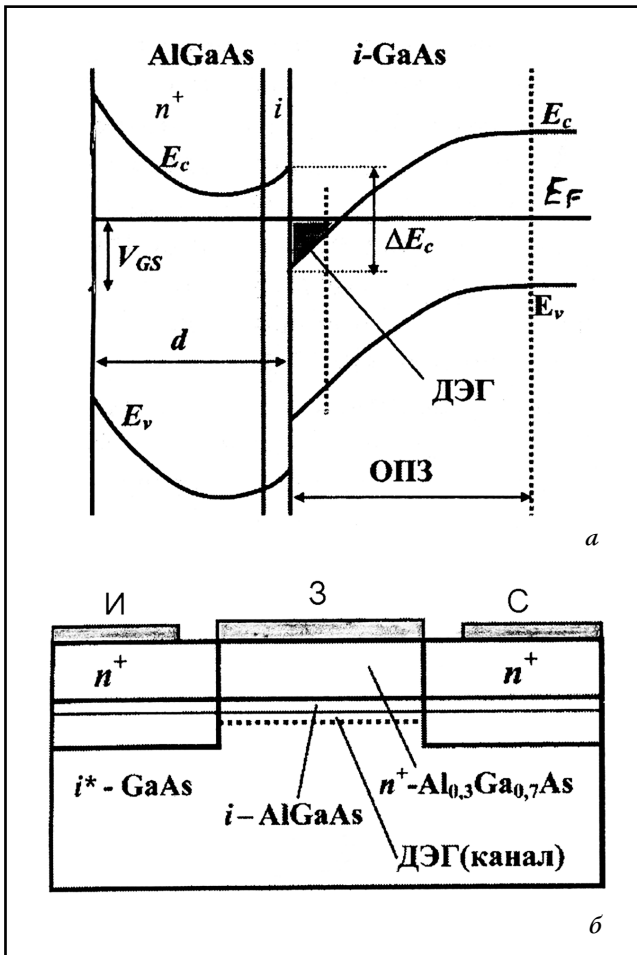


Рис. 3. Зонная диаграмма гетероперехода $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$ (а) и структура НЕМТ-транзистора на его основе (б).

двумерный электронный газ (ДЭГ). За счет потери одной степени свободы подвижность носителей увеличивается примерно вдвое, возрастает и эффективная концентрация носителей.

Гетеропереход формируется из широкозонного полупроводника $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и более узкозонного $i\text{-GaAs}$. На их границе происходит разрыв энергетического уровня E_c на величину, примерно, $\Delta E_c = 0,38$ эВ. В качестве подзатворного диэлектрика используется широкозонный полупроводник AlGaAs , который вследствие искривления энергетических зон становится обедненным электронами (рис. 3, а).

Конструкция НЕМТ-транзистора представлена на рис. 3, б. За более чем четверть вековую историю НЕМТ-транзисторы развились в семейство. Помимо соединений A^3B^5 весьма перспективными оказались соединения InGaAs , InGaP , InAlAs , InP . Соединения на основе индия отличаются высокой подвижностью электронов, разрыв зоны проводимости ΔE_c достигает 0,5 эВ.

Разработаны п-канальные и р-канальные НЕМТ-транзисторы, для которых создается потенци-

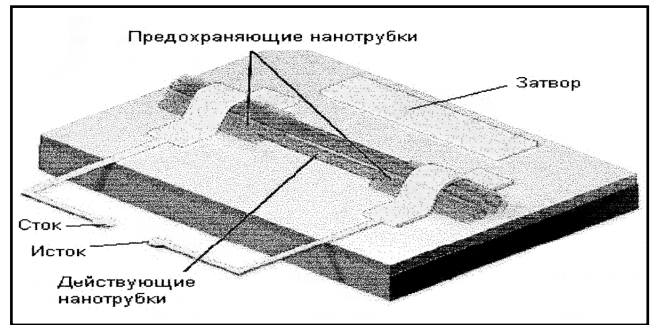


Рис. 4. Схема нанотранзистора на углеродной нанотрубке.

альная яма для дырок в узкозонном слое InGaP , например.

Для использования в мощных СВЧ-устройствах, работы в экстремальных условиях разработаны НЕМТ-транзисторы на основе GaN и SiC .

Нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок. Углеродные нанотрубки обладают хорошими эмиссионными способностями и являются перспективными элементами ряда микро- и нанoeлектроники. На рис. 4. представлена конструкция нанотранзистора на основе углеродной нанотрубки.

Углеродные нанотрубки по диаметру меньше толщины человеческого волоса $\sim 10^4\text{--}10^5$ раз. Нанотрубки представляют собой циклические структуры, обод которых составляет порядка десятков атомов углерода.

Транзисторы на нанотрубках выгодно отличаются от всех вышерассмотренных типов меньшими размерами, меньшим энергопотреблением. За такими транзисторами большое будущее.

Механический транзистор. В нанoeлектронике предложена идея и разработано устройство «механического» транзистора, способного передавать «поштучно» электроны из одной цепи в другую. Структура транзистора представлена на рис. 5. На проводники «G1» и «G2» подается регулируемое по частоте переменное напряжение от генератора, вытравленного на одной подложке с «транзистором». Переменный ток приводит в действие механический маятник «А», на конце которого можно видеть два утолщения (молоточка). Маятник изолирован от всех контактов (G1, G2, S, D) и заземлен.

В создании колебательных движений, подчиняясь электромагнитному эффекту, участвует «молоточек», находящийся между контактами генератора. В соприкосновение с ними он не входит. Роль транзисторного «перехода» играет второй «молоточек». Контакты с обеих его сторон выполнены с точностью до 10 нм. Один из контактов — исток (source), а другой — сток (drain). Расстояние между ними — 300 нанометров. В цепь сток-исток включен источник тока и измерительный прибор. Колебаясь, маятник ударяет в сток. Благодаря туннельному эффекту переносится один эле-

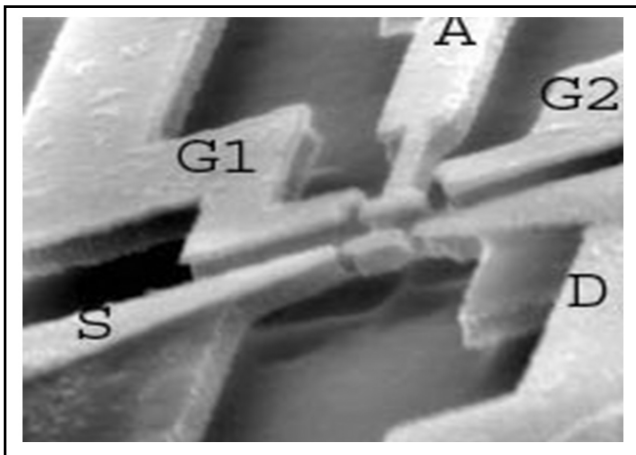


Рис. 5. Механический «транзистор» в электронном микроскопе.

ктрон. Удар в исток пересылает электрон дальше по цепи. И так до бесконечности.

При комнатной температуре и напряжении между стоком и истоком 1 В (маятник раскачивается напряжением 3 В) за один размах переносилось порядка 500 электронов. Подобрал оптимальную частоту генерации и величину напряжения, приложенного к «переходу», удалось создать условия для переноса лишь одного электрона.

С прикладной точки зрения, механический «транзистор» привлекателен для космической электроники, где радиоактивное излучение вносит много помех, вызывая спонтанные переходы в полупроводниковых слоях. Маятнику такое излучение не страшно. Очень выгодно использовать в обычной вычислительной электронике механический одноэлектронный «транзистор». Никакой утечки, никаких тепловых шумов. Если транзистор выключен, то он действительно выключен (сток и исток разделены физически).

Работы в области нанотранзисторостроения идут широким фронтом, однако ещё нет промышленных интегральных схем на основе нанотранзисторов, нанотранзисторы ещё не выпускаются по групповой технологии, обеспечивающей высокий процент выхода годных, минимальную стоимость и т. д.

Наноэлектронные запоминающие устройства

Существуют различные идеи создания наноэлектронных ЗУ, в основе которых лежат различные физические принципы.

Схемотехническое направление в наноэлектронике исповедует идеи создания схем одноэлектронной памяти. В этом случае на хранение одного бита информации потребуется два-три электрона. Заметим, что при хранении информации в современных микроэлектронных ДОЗУ на один бит информации требуется 10^5

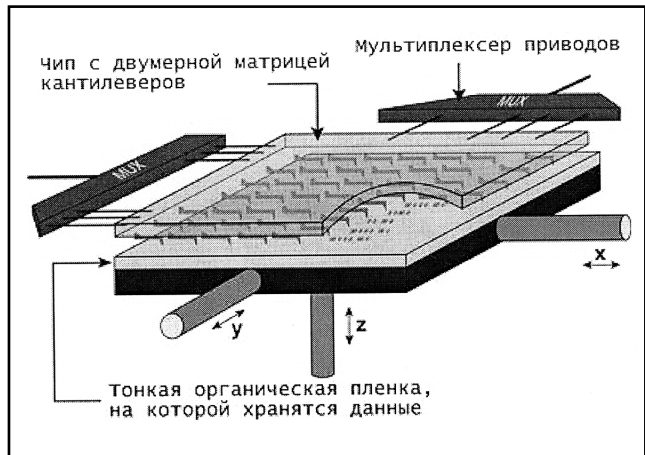


Рис. 6. Схема устройства ЗУ типа «многоножка».

электронов. Эффект хранения информации в ячейке памяти обеспечивается несколькими туннельными переходами, которые определенным образом коммутированы с конденсатором хранения информации.

Исследователи, связанные с молекулярной электроникой, создают молекулярные ЗУ. В качестве активных элементов в таких ЗУ используются молекулярные ключи, которые располагаются в перекрестиях двойной ортогональной сетки перекрещивающихся печатных проводников. При приложении напряжения к точкам пересечения печатных проводников сопротивление печатного материала изменяется в несколько раз. Органические молекулы могут работать в качестве диодов, конденсаторов.

Весьма перспективной оказалась старая техническая идея, сформулированная на новый лад. Эта идея позаимствована из старого патефона. Именно в патефонах считывающая игла скользила по спиральной борозде и считывала записанную информацию, соответствующую глубине рельефа бороздки. В цифровых системах обработки информации создаются ямки, соответствующие записи «1», а их отсутствие — «0».

Запись в полимерный носитель осуществляется щупом высоко допированного кремниевого кантилевера путем локального разогрева. Нагретые иглы выдавливают в полимерном носителе углубление конической формы — пит.

Пит имеет глубину не более 25 нм и в ширину порядка 40 нм. Так записана логическая единица. Отсутствие углубления в нужном месте — записан логический ноль.

Стирание информации происходит путем «залеживания» питов с помощью горячей иглы кантилевера.

Считывание записанных битов осуществляется той же иглой кантилевера, нагретой до 300 градусов Цельсия. Попадая в углубление игла отдает тепло поверхности пластика и охлаждается. При этом электрическое сопротивление уменьшается на доли процента. Сигнальный процессор эти слабые изменения преобра-

зует в выходной сигнал, состоящий из логических единиц и нулей.

Информация записывается на тонкой органической пленке полиметилметакрилата. Матрица записи/чтения содержит 4096 кантилеверов своеобразных (иглолок) общим размером 6,3×6,3 мм.

Само запоминающее устройство получило название «многоножки» и представлена на рис. 6.

В процессе записи/чтения привод кремниевого «стола», на котором размещена пленка с данными позиционирует ее в плоскости по заданным координатам X, Y. Приводы мультиплексоров позволяют управлять каждым кантилевером, обеспечивая адресацию памяти. Важно отметить, что матрица кантилеверов обеспечивает параллельность процессов записи и считывания информации. На площади в квадратный дюйм можно записать 1,2 Терабит информации. Другими словами, в чип размером в почтовую марку можно записать 25 DVD дисков.

Эта уже не микроэлектронное, а наноэлектронное запоминающее устройство. Ожидается появление таких ЗУ емкостью до 100 Гб, которое вполне может заменить чипы Flash — памяти, в мобильных телефонах. По скорости обработки информации такое ЗУ не уступает электронному ЗУ.

Литература

1. Щука А. А. Наноэлектроника. М.: Физматкнига, 2007.
2. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике. Отв. редактор А. Л. Асеев. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004.
3. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам. Сб. статей под ред. д. т. н., проф. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2005.
4. Орликовский А. А. Проблемы развития кремниевой транзисторной наноэлектроники. Интеграл. 7; 27: 2006.
5. Абдолин Б. Н., Мартынов В. В. Электроника. Вчера... Сегодня. Завтра? М.: ИКП «Дека», 2005.
6. Нанотехнологии в электронике. Под ред. Ю. А. Чапыгина М.: Техносфера, 2005.
7. Веттингер П., Бинниг Г. Проект нанопривод. В мире науки 2003; 5.
8. <http://perst.isssph.kiae.ru>

Заключение

Решение проблем перехода от микро- к наноэлектронике вовсе не отрицает дальнейший путь развития микроэлектроники. Успехи микроэлектроники далеко не исчерпаны. Однако становление наноэлектроники сулит новые научные достижения и разработки в области технологии во многих отраслях науки и техники. Развитие научных исследований о наноструктурах и нанотехнологиях позволит получить материалы и приборы с новыми уникальными свойствами. Это позволит решить ряд актуальных задач как в области электроники, так и во всех остальных отраслях науки и промышленности.

В наномире будут работать и «старые» идеи схемотехнической электроники, в основе которых лежит использование усовершенствованного транзистора.

Вместе с тем наномир способствует рождению свежих идей, связанных с волновыми свойствами электрона, с солитонами, как носителями информационного сигнала, с новыми материалами, с новой технологией. Поэтому и появляются новые приборы и устройства наноэлектроники, реализованные либо на совершенно новых принципах, либо на хорошо забытых методах обработки информации.