

## 1.17. ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА, УСТРОЙСТВА МОЛЕКУЛЯРНОЙ И СПИН-ЭЛЕКТРОНИКИ

**Цель лекции:** ознакомление с одноэлектронными устройствами, устройствами молекулярной и спин-электроники.

### 1.17.1. КУЛОНОВСКАЯ БЛОКАДА

Кулоновской блокадой называется отсутствие тока через туннельный переход при наличии внешнего напряжения, если туннелированию электронов препятствует их кулоновское взаимодействие.

Рассмотрим плоский конденсатор с туннельно-прозрачным диэлектриком. Если перенести заряд электрона с одной обкладки на другую, то конденсатор окажется заряженным. Для переноса заряда требуется энергия  $\Delta E$ , так как перенос происходит против сил взаимодействия с положительным зарядом, возникающим на обкладке, с которой удален электрон. Эта энергия равна энергии заряженного конденсатора:

$$\Delta E = \frac{q^2}{2C_k},$$

где  $C_k$  — емкость конденсатора.

Приложим к конденсатору возрастающее напряжение. При этом до некоторого значения  $U = U_k$  туннельный ток через переход не возникает, так как работа сил поля источника напряжения при перемещении электрона с одной обкладки на другую остается меньше работы против кулоновских сил отталкивания. Протеканию туннельного тока препятствует кулоновская блокада. Когда напряжение достигнет значения  $U = U_k$ , достаточного для преодоления кулоновских сил отталкивания, еще один электрон перейдет с одной обкладки на другую. Напряжение  $U_k$  определяется из соотношения

$$\Delta E = qU_k = \frac{q^2}{2C},$$

откуда

$$U_k = \frac{q}{2C}.$$

Электроны туннелируют через переход по одному. Наблюдение эффекта кулоновской блокады возможно в условиях, когда энергия теплового движения электронов недостаточна для преодоления блокады:  $\Delta E \gg kT$ .

Пусть полупроводниковая квантовая точка связана с двумя резервуарами электронов туннельными переходами (рис. 1.79). Увеличим число электронов в квантовой точке за счет туннелирования в точку одного электрона из левого резервуара. Для этого необходимо передать электрону потенциальную

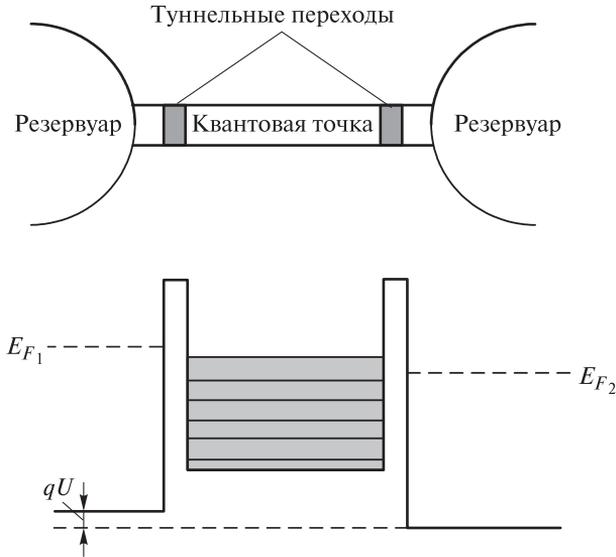
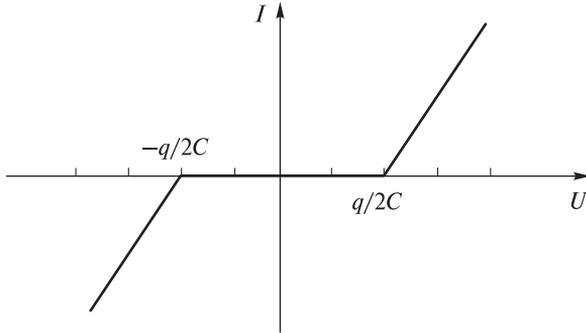


Рис. 1.79. Структура с двумя туннельными переходами

энергию  $qU$  от внешнего источника. Потенциальная энергия при этом составляет  $Q^2/2C$ , где  $Q$ ,  $C$  — исходный заряд квантовой точки и ее емкость соответственно. Следовательно, электрону для попадания в точку необходимо придать потенциальную энергию, большую или равную  $q^2/2C$ . Необходимое для этого напряжение составляет  $q/2C$ . Туннелирование невозможно, если

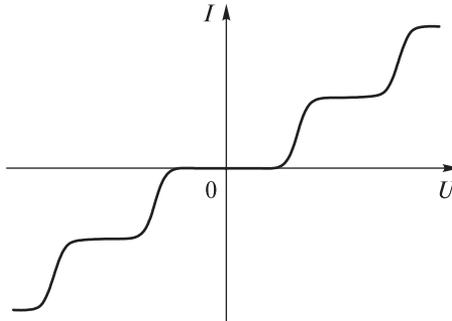
$$|U| < \frac{q}{2C}.$$

Данное неравенство означает, что на ВАХ структуры существует диапазон напряжений (от  $-q/2C$  до  $q/2C$ ), в котором ток через точку не может протекать ни при каких условиях (рис. 1.80). При  $U = U_k$  электроны туннелируют и проходят через квантовую точку по одному. Пока в точке есть один добавочный электрон, другой не может туда проникнуть из-за кулоновского отталкивания. При увеличении напряжения возможны мультиэлектронные переходы. Но если один из барьеров будет значительно более толстым, то



**Рис. 1.80.** Вольт-амперная характеристика структуры с эффектом кулоновской блокады

электроны снова будут проходить через квантовую точку по одному. Когда один из барьеров значительно толще другого, ВАХ структуры имеет вид, приведенный на рис. 1.81, и называется кулоновской лестницей.



**Рис. 1.81.** Кулоновская лестница

Значения протекающего через точку тока будут изменяться скачком при значениях приложенного напряжения

$$U = \left(\frac{1}{2C}\right)(2n+1)q, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Подаваемое напряжение измеряется единицами милливольт, одноэлектронный туннельный ток составляет десятки наноампер.

Из полученных уравнений следует, что по мере уменьшения размеров квантовой точки (и соответствующего уменьшения  $C$ ) возрастает значение энергии, необходимой для изменения числа электронов в квантовой яме.

### 1.17.2. ОДНОЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНЗИСТОР

Одноэлектронный транзистор содержит область проводимости, соединенную с истоковыми и стоковыми электродами туннельными барьерами, которые имеют емкостную связь с затвором. Изменяя напряжение на затворе, можно управлять током, протекающим между истоком и стоком через область проводимости. Если создать несколько областей с взаимной емкостной связью, то можно реализовать перемещение через эти области дискретных электронов.

Одноэлектронный транзистор работает на эффекте кулоновской блокады. Схема включения одноэлектронного транзистора показана на рис. 1.82. Квантовая точка с полным зарядом  $Nq$  подсоединена к истоку и стоку двумя туннельными барьерами. Такая квантовая точка называется кулоновским островом. На сток и затвор подается небольшое положительное напряжение относительно истока.

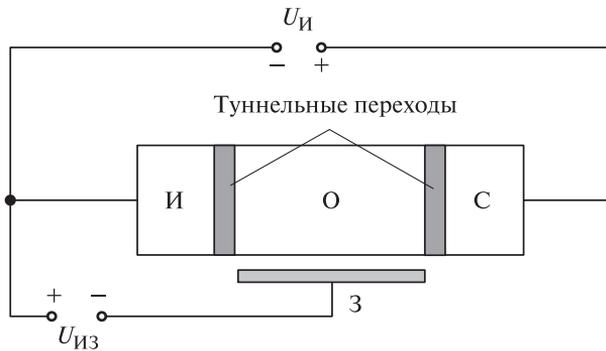
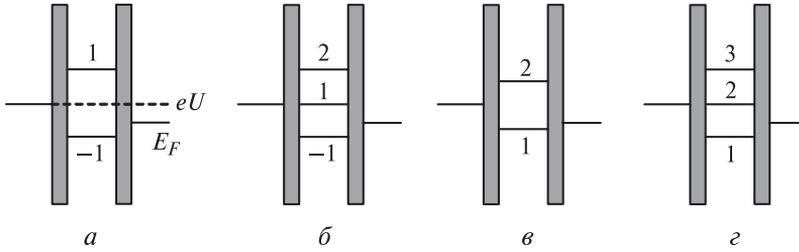


Рис. 1.82. Схема включения одноэлектронного транзистора

На рис. 1.83 приведены энергетические диаграммы, поясняющие работу транзистора. Цифры над уровнями Ферми острова ( $-1, 1, 2, \dots$ ) означают число электронов, перешедших на кулоновский остров с истока. При этом заряд области проводимости составляет  $-q, -2q, -3q, \dots$  соответственно;  $(-1)$  означает, что электрон удален с острова. Заряд острова в таком случае равен  $+q$ .

Если напряжение на затворе равно нулю, кулоновская блокада подавляет туннелирование электронов с истока, поэтому ток между истоком и стоком равен нулю (рис. 1.83, а). Поле положительно заряженного затвора смещает уровни острова вниз (уменьшает энергию электронов острова). При  $U_3 = U_{зк}$  кулоновская блокада прорывается, электроны туннелируют с истока на остров, а затем на сток (рис. 1.83, б). Между истоком и стоком появляется ток. При дальнейшем увеличении напряжения  $U_3$  и смещении уровня (1) вниз снова возникает блокада (рис. 1.83, в), ток отсутствует, но на острове находится один добавочный электрон. При  $U = U_{3_2}$  ток возникает вновь (рис. 1.83, г).

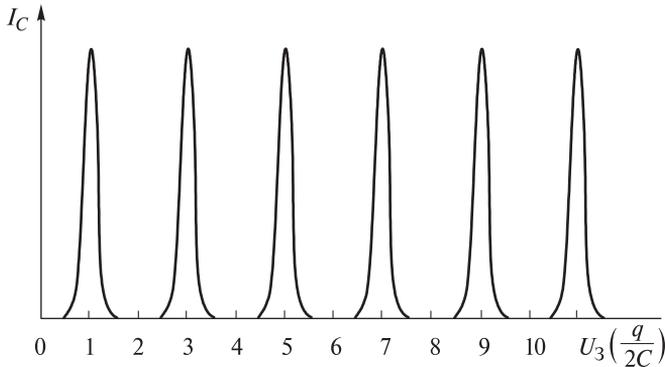


**Рис. 1.83.** Зонные диаграммы, поясняющие работу одноэлектронного транзистора:

$$a - U_3 = 0; \text{ б} - U_3 = U_{3K}; \text{ в} - U_{3K} < U_3 < U_{31}; \text{ г} - U_3 = U_{32}$$

По мере увеличения напряжения на затворе блокада периодически наступает и прорывается, но с каждым разом увеличивается на единицу число электронов на острове. Эти электроны находятся на острове стабильно, а туннелирующие электроны проходят через остров по одному.

На рис. 1.84 показан вид зависимости тока от напряжения на затворе одноэлектронного транзистора. Возникающие скачки тока называются осцилляциями кулоновской блокады. Напряжение  $U_3$  имеет порядок единиц милливольт, ток составляет десятки пикоампер.



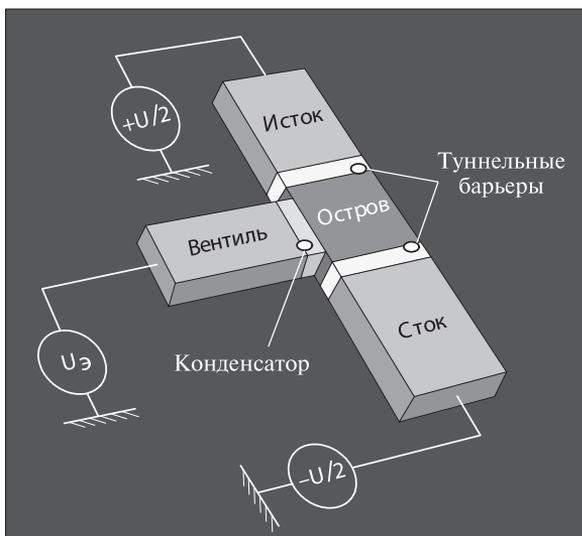
**Рис. 1.84.** Зависимость тока от напряжения одноэлектронного транзистора

Периодичность пиков напряжения определяется изменением числа электронов, содержащихся на квантовом острове на единицу  $\Delta U = q/C$ . Это дает возможность определить емкость квантового острова путем измерения разности напряжений на затворе между соседними пиками.

Одноэлектронный транзистор может находиться в состояниях «включено» и «выключено» в зависимости от напряжения на затворе. Поэтому одноэлектронный транзистор можно использовать как переключатель. При прохождении электрона сменяются состояния «включено» и «выключено».

Теоретически время туннелирования равно  $\sim 10^{-15}$  с, этим определяется верхний предел быстродействия прибора (ТГц). Поскольку одноэлектронный транзистор может находиться в двух состояниях, на его основе возможно создание ячеек памяти с малыми размерами, высоким быстродействием и низким энергопотреблением.

Одноэлектронный транзистор, разработанный Кембриджским университетом и компанией Japan Science and Technology Corporation, представлен на рис. 1.85. Размеры острова не должны превышать 10 нм. Высота потенциального барьера равна 0,173 эВ. Материалом для острова служит отдельный кластер аморфного кремния, поверхность которого оксидирована при низкой температуре для создания тонкого барьерного слоя.



**Рис. 1.85.** Одноэлектронный транзистор (Japan Science and Technology Corporation)

Одной из перспективных конструкций одноэлектронных устройств является Т-образная транзисторная структура, состоящая из двух одноэлектронных транзисторов, связанных между собой через туннельный конденсатор. На основе Т-образных транзисторных структур могут быть реализованы одноэлектронный коммутатор, одноэлектронный насос, одноэлектронный инвертор и др.

### 1.17.3. УСТРОЙСТВА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Молекулярная электроника* — наука об электронных свойствах молекулярных материалов и возможности их применения в электронике как элементов и приборов для записи, хранения и передачи информации. В молекулярной электронике выделяют два основных направления: микромолекулярную элек-

тронику (молекулярную электронику — молетронику) и макромолекулярную электронику, или органическую электронику.

*Макромолекулярная электроника* — электроника, в которой в качестве элементов схем используются тонкие (20...200 нм) пленки органических материалов.

Молекулярная электроника, или молетроника, — электроника, в которой в качестве элементов микроэлектронных схем используются отдельные органические молекулы или даже их фрагменты.

Можно выделить два основных свойства молекулярных материалов:

- 1) локализацию электронов на молекуле;
- 2) однозначное расположение атомов в молекуле (в отличие от расположения примесей в кристаллической решетке полупроводников).

Следует отметить, что к молекулярным материалам относятся как неорганические, так и органические материалы, однако последних существует намного больше, поэтому чаще под молекулярными материалами понимают органические материалы.

Главной проблемой при использовании отдельных молекул является отсутствие соответствующей схмотехники. Молекулярные устройства должны представлять собой сложные разветвленные цепи из различных атомных группировок. Методы синтеза таких устройств пока не разработаны.

Отдельные виды молекул и их совокупности могут выполнять функции диэлектриков, проводников, активных элементов — диодов, транзисторов и логических элементов.

Примером молекул-изоляторов могут служить алканы  $C_nH_{2n+2}$ . Связи С—С и С—Н образованы локализованными молекулярными  $\sigma$ -орбиталями. Такие молекулы ток не проводят.

Для создания молекулярной электроники необходимо прежде всего иметь материалы с высокой проводимостью. Как известно из теории твердого тела, металлическими свойствами могут обладать вещества с определенной зонной структурой, а именно с частично заполненной верхней разрешенной зоной. Другими словами, для получения хорошей проводимости необходимо иметь дополнительные носители заряда в разрешенных зонах.

Роль таких проводников выполняют длинные стержнеобразные молекулы с чередующимися одинарными и двойными (или тройными) связями углерода. Главной особенностью атома С (так же, как и О и N) является способность к гибридизации и образованию соединений с двойными и тройными связями, в которых присутствует  $\pi$ -связь. В таких молекулах внешние, так называемые молекулярные,  $\pi$ -орбитали электронов атомов углерода распространяются по всей молекуле (делокализованные орбитали). Это и обеспечивает возможность переноса электронов проводимости вдоль всей молекулы, что обуславливает ее высокую электропроводность.

В 1974 г. ведущие инженеры фирмы ИВМ А. Авирам и М. Ратнер предложили модель выпрямителя (диода), состоящего из одной органической молекулы. Две половинки этой молекулы обладают противоположными свойствами по отношению к электрону: одна может только отдавать электрон

(донор), а другая — только принимать (акцептор). Если поместить такую асимметричную молекулу между двумя металлическими электродами, то вся система будет проводить ток только в одном направлении.

Аналогом  $p$ - $n$ -перехода в данном случае является донорно-акцепторная молекула. Модельная молекула, состоящая из акцептора А (тетрацианохинодиметан), донора Д (тетратиофульвален) и соединительной системы метиленовых мостиков С представлена на рис. 1.86.

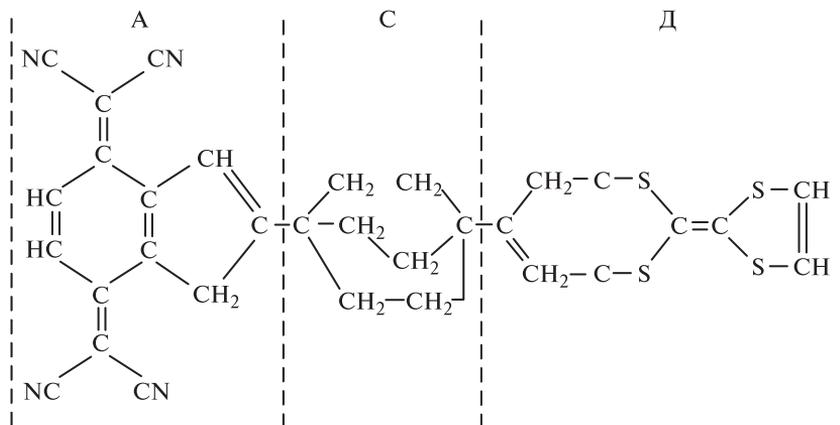


Рис. 1.86. Молекула, обладающая выпрямляющими функциями

Акцептор А имеет низколежащую свободную орбиталь  $\pi_1$ , донор Д — свободную орбиталь с более высокой энергией  $\pi_2$ . Донор и акцептор разделены изолирующей подгруппой. Молекула помещена между двумя металлическими электродами с уровнями Ферми  $E_{F1}$  и  $E_{F2}$  (рис. 1.87). Если на электрод 2 подать «минус», а на электрод 1 — «плюс», то уровень  $E_{F1}$  поднимется и электроны будут переходить из металлического электрода 1 на свободный уровень  $\pi_1$ . Уровень  $E_{F2}$  понизится, на него будут уходить элек-

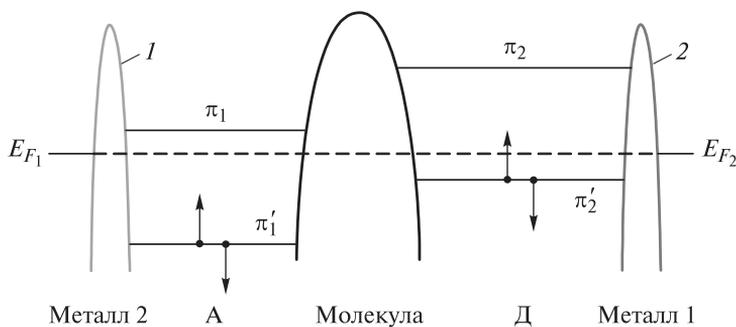


Рис. 1.87. Энергетическая диаграмма выпрямителя в равновесном состоянии

троны с занятого уровня  $\pi_2$ . На освободившийся уровень туннелируют электроны, перешедшие на уровень  $\pi_1$ . Ток течет от электрода 1 к электроду 2, электроны при движении понижают энергию на каждой ступени.

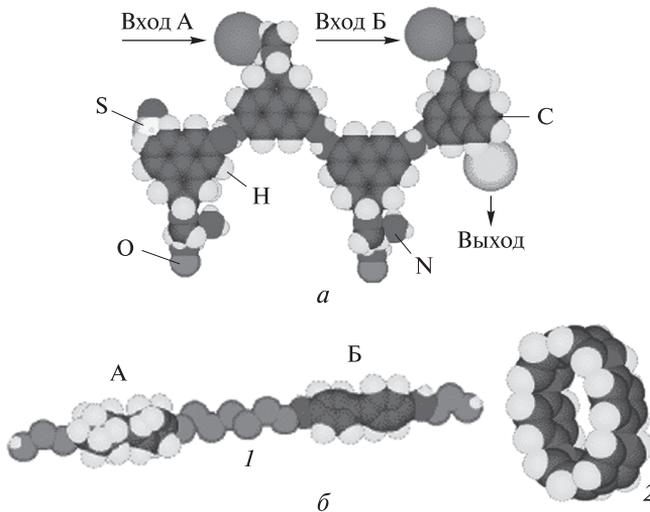
Если изменить полярность электродов, то на свободный уровень  $\pi_2$  электроны из проводника 2 перейдут при значительно большем напряжении, так как уровень  $\pi_2$  расположен высоко. Таким образом, реализуется односторонняя проводимость, т. е. рассмотренная структура обладает выпрямляющими свойствами.

В настоящее время существует несколько вариантов молекулярных транзисторных устройств — аналогов полевого транзистора и способов их изготовления:

- молекулярный одноэлектронный транзистор, в котором квантовым островом служит ион кобальта, между ионом и золотыми электродами имеются туннельные барьеры;
- на основе молекулы  $C_{60}$  и туннельного микроскопа;
- на основе одностеночной полупроводниковой нанотрубки и кремниевой подложки.

Существуют классы молекул, которые могут находиться в двух стабильных состояниях с различными значениями электропроводности. Такие молекулы могут быть использованы в качестве переключателей, логических элементов или элементов памяти.

Молекулярный логический элемент «НЕ–И» с двумя входами показан на рис. 1.88, *a*. Электрон будет проходить через молекулярную цепочку только



**Рис. 1.88.** Молекулярные логические элементы:

1 — линейный компонент; 2 — циклический компонент бусины;  
 С — атом углерода; Н — атом водорода; N — атом азота;  
 S — атом серы; O — атом кислорода  
 (<http://nauka.relis.ru/07/0012/07012064.htm>)

в те моменты, когда сигнал на обоих входах отсутствует. Логический элемент на основе молекул ротаксана представлен на рис. 1.88, б. В рабочем положении бусина нанизана на нить. Переключение элемента проводится за счет перемещения бусины из положения А в положение Б (и обратно).

Имея молекулы — проводники, изоляторы, диоды, транзисторы, логические элементы и переключатели, можно разрабатывать молекулярные интегральные схемы. Размер молекулярного транзистора равен  $\sim 1$  нм. Если создать ИМС из  $10^9$  таких транзисторов, то она будет размером с песчинку. При этом ее производительность возрастет в  $10^2$ – $10^3$  раз, а энергопотребление уменьшится до весьма малых значений.

Теоретические основы молекулярной электроники уже достаточно хорошо разработаны, и созданы прототипы практически всех элементов логических схем, однако на пути их реального использования встают значительные сложности. Главная проблема молекулярной электроники — интеграция молекул в схему. Молекулярное устройство должно представлять собой сложные разветвленные цепи из атомных группировок. Подходы к созданию базовых элементов схем хорошо разработаны, но проблема их интеграции в порядке, обеспечивающем работу схемы, еще далека от решения. Основным путем решения данной проблемы является процесс самосборки, основанный на молекулярном распознавании взаимно дополняющих структур. В настоящее время разработаны технологии некоторых простых процессов самосборки: формирование упорядоченных самоорганизованных пленок; синтез по методу Мэррифилда, в котором соединяются «выходы» одних молекул с «входами» других; получение трехмерных молекулярных структур типа «решеток», «лестниц» и крестообразных структур (из молекул ДНК).

#### 1.17.4. САМОСБОРКА И САМООРГАНИЗАЦИЯ

Классический процесс проектирования предполагает, что сначала выполняются чертежи деталей. Затем в соответствии с чертежом удаляют из металлической заготовки все лишнее либо вручную, либо при помощи металлообрабатывающего станка. Такая технология получила название «сверху-вниз». В недалеком будущем нанотехнологии позволят выполнять изделия из материалов с нуля, т. е. начиная с атомов или молекул. Такая технология называется «снизу-вверх». Следует отметить, что складывать атом к атому «вручную» не будут, предполагается, что возможно использовать явление самоорганизации, самосборки наноструктур и наноустройств.

Самосборка (*self-assembly*) — это термин для описания процессов, в результате которых неорганизованные системы благодаря специфическому, местному взаимодействию компонентов систем приходят к упорядоченному состоянию. Самосборка — реализация метода распределенного управления, при котором управляющие функции реализованы во внутренней структуре элементов, участвующих в процессе, а управляющая информация, детерминирующая процесс, распределена по всем элементам.

Самоорганизация в классических терминах может быть описана как спонтанная и обратимая организация молекулярных единиц в упорядоченную структуру с помощью нековалентных взаимодействий. Спонтанность означает, что взаимодействия, ответственные за образование самособранной системы, проявляются в локальных масштабах. Другими словами, наноструктура строит саму себя, подобно тому как это делают живые организмы.

Узнавание структур для последующей самосборки должно быть основано на комбинации так называемых узнающих модулей, что следует из геометрической комплементарности и химического узнавания. Сборка систем происходит, как правило, без использования исходных матриц. Самосборка идет за счет многоточечных нековалентных взаимодействий.

### 1.17.5. УСТРОЙСТВА СПИН-ЭЛЕКТРОНИКИ

Спинтроника — направление нанoeлектроники, в котором для использования в электронных устройствах применяются не только заряды электрона в твердом теле, но и его собственный квантово-механический момент — спин.

Спин — собственный момент количества движения элементарной частицы, имеющий квантовую природу и не связанный с перемещением частицы

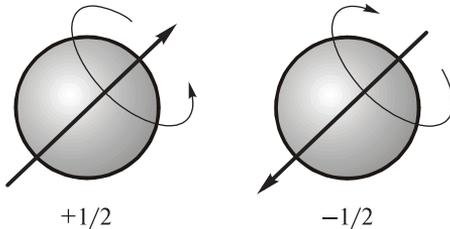


Рис. 1.89. Схема электронов с различными спинами

как целого. Спин электрона может принимать одно из двух значений:  $+1/2$  и  $-1/2$ . Спин имеет размерность (Дж·с), но так как он квантован и кратен постоянной Планка, его обычно изображают в виде целого (или полуцелого, как в случае с электроном) числа (рис. 1.89). Несмотря на то что спин был искусственно введен для объяснения экспериментальных данных, его существование теоретически обосновано в рамках развития релятивистской

квантовой механики — наличие спина является одним из следствий уравнения Дирака для волновой функции свободной частицы.

Основу спин-электроники составляют два основных эффекта, являющиеся следствием особенностей транспорта заряда, контролируемого спином электронов в наноразмерных структурах: гигантское магнитосопротивление и туннельное магнитосопротивление.

**Гигантское магнитное сопротивление (ГМС).** Наличие у электрона спина обуславливает не только его электрические, но и магнитные свойства. Соответственно, электроны с различным спином движутся в магнитном поле по-разному.

Эффект ГМС основан на том, что электроны с различным направлением спина (и, соответственно, собственного магнитного момента) под влиянием внешнего магнитного поля движутся по-разному. Магнитная головка ГМС состоит из четырех слоев (рис. 1.90). Верхний слой, состоящий из антиферро-

магнетика, называется обменным (*exchange*) и предназначен для того, чтобы зафиксировать магнитное поле второго слоя, который так и называется — фиксирующим (*pinned*). Для обеспечения необходимых магнитных свойств второй слой выполняют из ферромагнетика (сплавы никеля, железа, кобальта). Магнитное поле фиксирующего слоя всегда направлено в одну сторону. Третий слой — проводящий (*conducting*) — обычно медный — служит для разделения фиксирующего и чувствительного слоев. Последний, чувствительный (*sensing*) слой также выполняют из ферромагнетика. В отличие от фиксирующего слоя, направление магнитного поля в нем определяется внешним магнитным полем. В данном случае это магнитное поле ячейки жесткого диска, которая содержит один бит информации. В зависимости от состояния ячейки изменяется ориентация магнитного поля в чувствительном слое.

Действие считывающих ГМС-головок основано на фиксировании ГМС-структуры. Если ориентации магнитного поля в чувствительном и в фиксирующем слоях очень малых изменений внешних полей, например, при переходе от магнитного домена одной ориентации к домену противоположной ориентации, совпадают, то сопротивление сенсора уменьшается до минимального значения. Это обусловлено тем, что те электроны, спины (и, соответственно, магнитные моменты) которых совпадают с направлением магнитного поля, не испытывают значительного сопротивления и легко проходят сквозь все слои. Электроны, спины которых направлены против магнитного поля, испытывают значительное сопротивление в обоих ферромагнитных слоях.

Если ориентации магнитного поля в чувствительном и в фиксирующем слоях противоположны друг другу, то независимо от ориентации спина электроны будут испытывать значительное сопротивление в одном из ферромагнитных слоев. Этот эффект имеет чисто квантовую природу, так как его существование напрямую связано с присутствием у электрона спина. Взаимодействие спинов электронов с магнитным полем обеспечивает магнитным головкам на основе эффекта ГМС в 2 раза большую чувствительность, чем традиционным магнитным головкам.

Намагниченность ГМС-элемента после переключения сохраняется до нового переключения, поэтому его можно использовать как элемент памяти. Такие элементы применяют для ячеек магнитной памяти произвольного доступа MRAM (рис. 1.91). Шина записи с помощью тока переманичивает

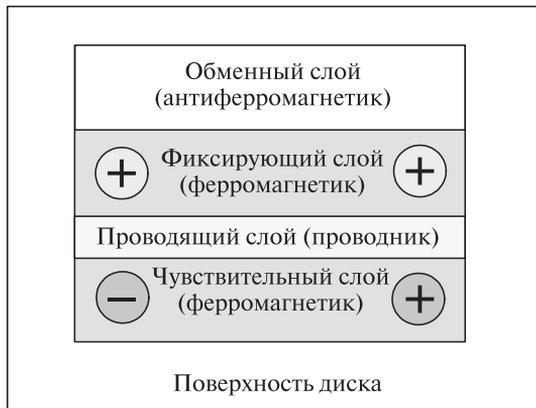
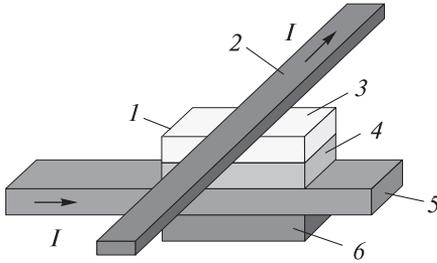


Рис. 1.90. Схематическое изображение ГМС головки



**Рис. 1.91.** Ячейка MRAM (размер около  $200 \times 200$  нм) на основе ГМС-элементов:

1 — шина считывания; 2 — шина записи; 3 — изолятор; 4 — мягкий ферромагнетик (Fe); 5 — немагнитный материал (Cu); 6 — жесткий ферромагнетик (Co)

магнитомягкий материал, записывая бит, а шина считывания проходит через немагнитный материал и по сопротивлению определяет состояние бита.

Магнитная память произвольного доступа MRAM на основе ГМС-элементов имеет следующие основные преимущества: энергонезависимость, большая скорость доступа, субмикронный размер, сравнимый с DRAM и SRAM.

**Туннельное магнитосопротивление (ТМС).** Туннельное магнитосопротивление — эффект спин-зависимого туннелирования электронов через нанометровый слой диэлектрика или полупроводника, помещенный между двумя ферромагнетиками (рис. 1.92). Электроны туннелируют слой диэлектрика, создавая ток, проходящий из одного ферромагнетика в другой.



**Рис. 1.92.** Структура, обладающая ТМС

В таких структурах наряду с туннельным эффектом используется эффект различного движения электронов с разными спинами в магнитном поле. Если магнитное поле в обоих ферромагнитных слоях клапана совпадает по направлению, то те электроны, спин которых направлен по вектору магнитного поля, легко туннелируют из одного ферромагнитного слоя в другой. Таким образом, сопротивление структуры электрическому току оказывается низким. Если магнитное поле в этих слоях противоположно, то туннельный переход затрудняется, так как в одном из слоев электрон будет двигаться против магнитного поля. Вследствие этого сопротивление клапана возрастает на 20...40 %.

На использовании эффекта ТМС основано перспективное направление — магнитная оперативная память MRAM (*Magnetic Random Access Memory*). Ее особенность в том, что информация в ней сохраняется не в виде электрических зарядов на обкладках конденсатора, как в динамической памяти DRAM, и не в виде состояния триггера, как в статической памяти SRAM, а в виде намагниченности слоя ферромагнетика. В качестве достоинств такого типа памяти можно отметить весьма малое энергопотребление, высокое быстродействие, гигантскую плотность хранения информации. Поддержание состояния намагниченности вообще не требует затрат энергии, как это происходит в жестких дисках. Высокая плотность хранения обусловлена небольшими

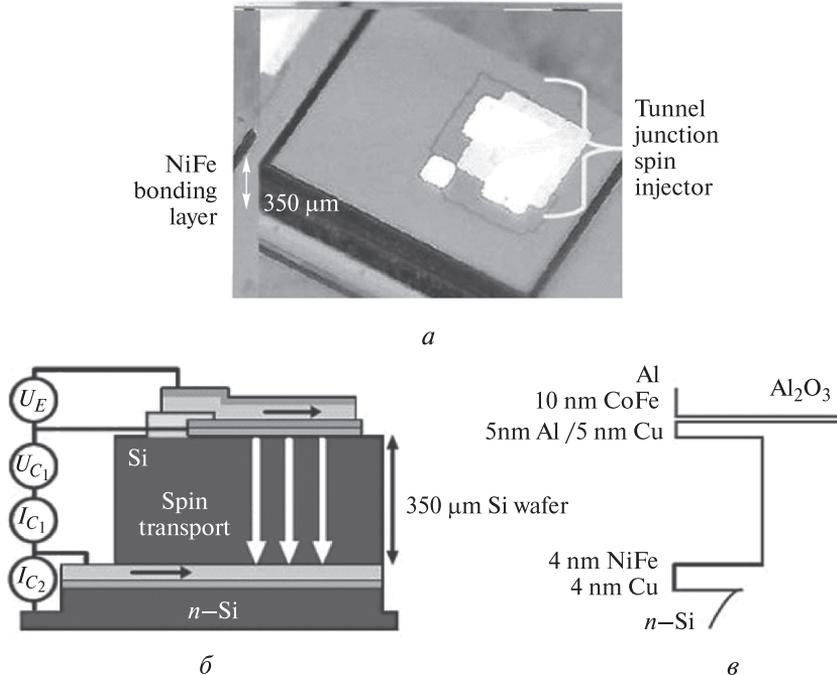
размерами элементарной ячейки, для которой не требуется большого числа транзисторов, как для SRAM, и отдельных схем регенерации, как для DRAM.

**Спиновый транзистор.** В спиновом транзисторе состояния «включен» и «выключен» зависят от направления спинов электронов, участвующих в токе. Любое спин-электронное устройство, в том числе и спиновый транзистор, должно содержать три основных элемента:

- 1) инжектор — механизм для электрического инжектирования спин-поляризованных электронов в полупроводник;
- 2) средства для управления спиновым током в полупроводнике;
- 3) детектор — электрическую схему для прецизионного детектирования (измерения) результирующего спинового тока.

Показано, что кремний в настоящее время может быть использован для совершения многочисленных манипуляций над спином на масштабе в несколько сот микрометров и в течение времени, достаточного для осуществления нескольких тысяч логических операций (десятки наносекунд), что обуславливает в перспективе использование спин-электронных систем на базе кремния.

Вид кремниевого спинового транзистора, принцип действия и зонная диаграмма (диаграмма энергетических состояний барьеров, которые встречают электроны при прохождении через вещества) приведены на рис. 1.93.

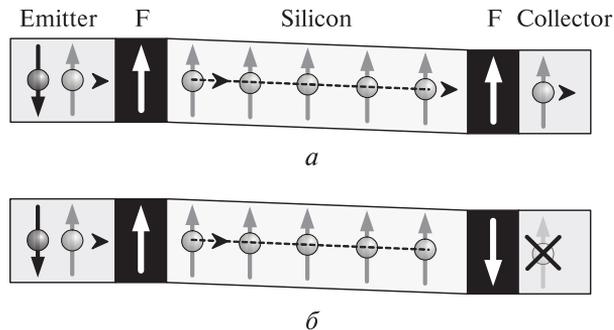


**Рис. 1.93.** Устройство кремниевого спинового транзистора: а — изображение; б — схема работы; в — зонная диаграмма компонентов (Physical Review Letters 99, 177209, 2007)

На первом этапе при приложенном напряжении  $U_E$  неполяризованные электроны инжектируются из алюминиевого эмиттера (источника) в ферромагнитный слой  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$ . Благодаря спин-зависимому рассеиванию электронов в магнитном слое электроны с выделенным направлением спина (например, «спин-вниз») отсеиваются, так как направление намагниченности слоя  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$  не совпадает с направлением спинов. Отобранные электроны с одинаправленными спинами туннелируют через тонкий слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . В данном случае туннельный барьер проходят только «горячие» электроны (с энергией, достаточно высокой для преодоления энергетических барьеров), создавая эмиттерный ток (ток источника). «Горячие» электроны необходимы для увеличения эффективности прибора. После прохождения барьера Шоттки (потенциальный барьер, возникающий на границе металл–полупроводник) в беспримесный монокристаллический слой кремния электроны занимают свободные места в зоне проводимости полупроводника и под действием приложенного к нему напряжения  $U_C$  начинается их упорядоченное движение. При этом возникает коллекторный ток  $I_C$  (ток на детекторе). После прохождения через слой кремния толщиной 350 мкм спин-поляризованные электроны детектируются вторым спиновым транзистором. Ферромагнитный слой  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  регистрирует спины электронов, которые инжектируются в кремний  $n$ -типа (основными носителями тока в котором являются электроны) для увеличения чувствительности детектора (в зоне проводимости  $n$ -типа кремния имеются избыточные электроны, которые усиливают спиновый ток), создавая коллекторный ток  $I_{C2}$ . Спиновый ток зависит от относительной намагниченности обоих ферромагнитных слоев.

Механизм работы детектора приведен на рис. 1.94. При параллельном направлении намагниченностей в слоях  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$  и  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  (рис. 1.94, *а*) ток выше, чем при антипараллельном их направлении (рис. 1.94, *б*).

Развитие спинтроники должно существенно повысить быстродействие компьютеров и плотность записи информации.



**Рис. 1.94.** Механизм работы инжектора и детектора: *а* — слои  $\text{Co}_{84}\text{Fe}_{16}$  и  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  намагничены параллельно; *б* — антипараллельно (emmitter — источник тока; *F* — первый и второй ферромагнитные слои; silicon — кремниевая прослойка; collector — приемник спинового тока) (Physical Review Letters 99, 177209, 2007)

## Тесты к лекции 1.17

### 1. Что называется кулоновской блокадой?

а) отсутствие тока через туннельный переход при наличии внешнего напряжения, если туннелированию электронов препятствует их кулоновское взаимодействие;

б) явление отталкивания одноименных зарядов;

в) кулоновское взаимодействие электрически заряженных частиц.

### 2. При каких условиях возможно наблюдение эффекта кулоновской блокады?

а) в условиях, когда энергия теплового движения электронов недостаточна для преодоления блокады;

б) в условиях, когда энергия теплового движения электронов больше энергии блокады;

в) в условиях наличия сильных магнитных полей.

### 3. На каком эффекте работает одноэлектронный транзистор?

а) на эффекте кулоновской блокады;

б) на эффекте прямого перехода;

в) на эффекте обратного перехода.

### 4. Как может использоваться одноэлектронный транзистор?

а) как переключатель;

б) как усилитель;

в) как генератор.

### 5. Что такое молекулярная электроника?

а) наука об электронных свойствах молекулярных материалов и возможности их применения в электронике как элементов и приборов для записи, хранения и передачи информации;

б) технология органической химии, на основе которой строятся различные электронные устройства;

в) технология биофизики, использующая органические материалы как конструкционные.

### 6. В чем заключается главная проблема молекулярной электроники?

а) в интеграции молекул в схему;

б) в отсутствии базовых логических элементов;

в) в отсутствии токопроводящих органических материалов.

### 7. Что такое спинтроника?

а) направление электроники, в котором для использования в электронных устройствах применяются не только заряд электрона в твердом теле, но и его собственный квантово-механический момент;

б) направление электроники, в котором для использования в электронных устройствах применяется спиновый эффект;

в) направление электроники, в котором для использования в электронных устройствах применяется только заряд электрона в твердом теле.

**8. Что такое спин электрона?**

а) собственный момент количества движения элементарной частицы, имеющий квантовую природу и не связанный с перемещением частицы как целого;

б) скорость движения элементарной частицы вокруг своей оси, имеющая квантовую природу и не связанная с перемещением частицы как целого;

в) частота вращения элементарной частицы, имеющая квантовую природу и не связанная с перемещением частицы как целого.

**9. На чем основан эффект гигантского магнитного сопротивления?**

а) электроны с различным направлением спина (и, соответственно, собственного магнитного момента) под влиянием внешнего магнитного поля движутся по-разному;

б) электроны с различным направлением спина (и, соответственно, собственного магнитного момента) под влиянием внешнего магнитного поля меняют свое направления движения на противоположное;

в) электроны с различным направлением спина (и, соответственно, собственного магнитного момента) под влиянием внешнего магнитного поля осуществляют эмиссию в вакуум.

**10. Что такое туннельное магнитосопротивление?**

а) эффект спин-зависимого туннелирования электронов через нанометровый слой диэлектрика или полупроводника, помещенный между двумя ферромагнетиками;

б) эффект туннельного отражения электронов от зеркального слоя диэлектрика или полупроводника, помещенный между двумя ферромагнетиками;

в) эффект туннелирования дырок через нанометровый слой диэлектрика или полупроводника, помещенный между двумя ферромагнетиками.