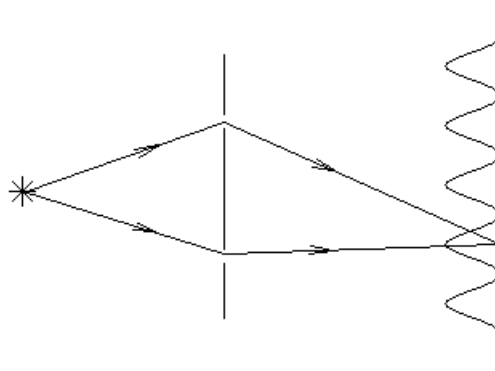


Полупроводники.
Факультатив. Квантовая механика.

Рассмотрим схему опыта Юнга по наблюдению интерференции света.



Будем считать, что интерференционная картина регистрируется на фотопластинке. Когда световой фотон попадает на фотопластинку, его ловят в том смысле, что фотон вызывает химическую реакцию в конкретной молекуле фотопластинки. Будем говорить, что частицу ловят, если ставят опыт, в результате которого положение частицы можно локализовать. После проявления фотопластинки в месте попадания фотона остается почернение, следовательно, фотон был локализован в пределах этого почернения.

Заметим, что фотон интерферирует сам с собой, а не с другими фотонами. Такой вывод следует из результатов опыта по интерференции света при очень слабом световом потоке. Интерференция в слабом свете не пропадает. Интерференционная картина остается, только при регистрации на фотопластинке ее надо дольше накапливать.

Пока фотон не ловят, он распространяется, как волна, может дифрагировать и интерферировать. Когда фотон ловят, соответствующая ему волна мгновенно пропадает во всем пространстве, а фотон оказывается локализован. От волны остается только информация, где и с какой вероятностью можно было поймать фотон.

Аналогичный опыт наблюдения интерференции можно поставить и с электронами вместо световых фотонов.

Если поток электронов слабый, то интерференционная картина не пропадает. Это означает, что каждый неделимый электрон пролетает через две щели и интерферирует сам с собой.

Не только фотон, но и любая другая частица, пока ее не ловят, распространяется как волна де Бройля с длиной $\lambda = \frac{h}{mV}$, а когда ловят, становится частицей. От волны, которую принято называть волновой функцией и обозначать буквой Ψ , остается только вероятность, с которой можно было поймать частицу в разных точках пространства.

Для фотона вероятность поймать фотон пропорциональна интенсивности света, которая пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля световой волны. Аналогично для любой другой частицы

$|\Psi|^2 dV$ — вероятность поймать частицу в объеме dV . На опыте эту вероятность можно измерить, если многократно повторять опыт в одинаковых условиях.

В квантовой механике каждая частица одновременно является и волной.

Можно поставить опыт Юнга по интерференции протонов или даже целых молекул. Только чем больше масса частицы, тем с меньшей скоростью нужно пускать частицы для того, что длина волны де Бройля $\lambda = \frac{h}{mV}$ и ширина интерференционных полос остались прежними.

Экспериментально наблюдалась дифракция молекулярных пучков при отражении от поверхности кристалла. При этом вместо зеркального отражения наблюдались дифракционные максимумы в разных направлениях. Дифракционные максимумы возникают за счет того, что каждая молекула отражается не от конкретного атома кристалла, а от всего кристалла, как от дифракционной решетки.

Согласно квантовой механике аналогично электронам или фотонам в опыте Юнга должны вести себя и песчинки и мячики и люди. Бросим человека на две двери. Он, как волна, пройдет одновременно через обе двери и за дверьми проинтерферирует сам с собой. В результате интерференции человека с самим собой, пролетающим через две двери, человек в какие-то точки стены за дверьми может попасть, а в какие-то — не может. Человека нужно бросать очень медленно, чтобы интерференционные полосы не были слишком частыми.

Возникает вопрос. Как этот пролет через две двери будет выглядеть с точки зрения самого человека? Ответ — никак. Дело в том, что за интерференцией нельзя подглядывать. Как только вы подсматриваете за человеком, так сразу волна де Бройля везде пропадает, и человек локализуется там, где вы его увидели. При этом не важно, смотрел ли кто-нибудь на человека. Важно только была ли принципиальная возможность его увидеть или локализовать каким-либо другим способом.

Факультатив. Обменное взаимодействие.

Рассмотрим два электрона в двух атомах водорода.



Из тождественности электронов следует, что при перестановке электронов вероятность поймать электрон в произвольном малом объеме dV не изменяется. Тогда

$$|\Psi(\vec{r}_2, \vec{r}_1)|^2 = |\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2)|^2 \quad \Rightarrow \quad \Psi(\vec{r}_2, \vec{r}_1) = e^{i\varphi} \cdot \Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2),$$

где φ — вещественная константа.

После двух перестановок электронов, они возвращаются на свои места. Следовательно,

$$e^{2i\varphi} = 1 \Rightarrow e^{i\varphi} = \pm 1 \Rightarrow$$

Возможны два варианта:

1). $\Psi_s(\vec{r}_2, \vec{r}_1) = \Psi_s(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$, и волновая функция Ψ_s называется симметричной волновой функцией.

2). $\Psi_a(\vec{r}_2, \vec{r}_1) = -\Psi_a(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ и волновая функция Ψ_a называется антисимметричной волновой функцией.

Если рассмотреть антисимметричную функцию одного аргумента x , то из определения антисимметричной функции $f(-x) = -f(x)$ следует, что $f(0) = 0$. По этой причине для антисимметричной функции Ψ_a в точке, расположенной ровно посередине между ядрами двух атомов водорода, плотность электронного облака равна нулю. Для симметричной функции Ψ_s в средней точке плотность электронного облака отлична от нуля.



Тогда для антисимметричной волновой функции Ψ_a при приближении атомов друг к другу с учетом соотношения неопределенности Гейзенберга $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$ получим:

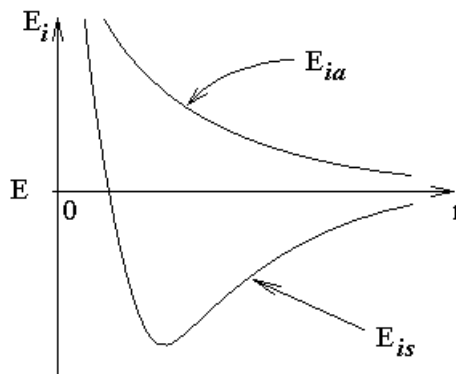
$$\Delta x \searrow \Rightarrow \Delta p_x \nearrow \Rightarrow |p_x| \nearrow \Rightarrow p_x^2 \nearrow \Rightarrow E_{\text{кин}} \nearrow \Rightarrow E_{\text{полная}} \nearrow \quad \text{— отталкивание.}$$

Для симметричной волновой функции Ψ_s :

$$\Delta x \nearrow \Rightarrow \Delta p_x \searrow \Rightarrow |p_x| \searrow \Rightarrow p_x^2 \searrow \Rightarrow E_{\text{кин}} \searrow \Rightarrow E_{\text{полная}} \searrow \quad \text{— притяжение.}$$

На некотором расстоянии энергия взаимодействия атомов достигает минимума.

В результате вместо каждого уровня энергии E_i одиночного атома для пары атомов появляется пара уровней энергии E_{is} и E_{ia} с симметричной и антисимметричной волновыми функциями электронов.

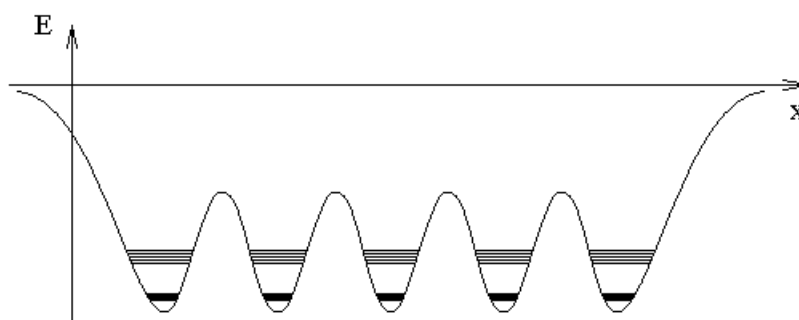


Разность энергий этих уровней ΔE_i связана с частотой обмена электронами ν соотношением $\Delta E_i = E_{ia} - E_{is} = h\nu$.

Факультатив. Твердое тело.

Если рядом находятся два одинаковых атома, то каждый уровень энергии одиночного атома раздваивается. Если рядом находятся три одинаковых атома, то каждый уровень энергии растривается. Если рядом находятся N атомов, то вместо каждого уровня образуется N близких друг другу уровней энергии. Если $N \approx 10^{27}$, то вместо каждого уровня образуется целая зона уровней энергии. Это и есть энергетические зоны в твердом теле.

Рассмотрим зависимость потенциальной энергии электрона от его координаты в твердом теле. Около каждого атома образуется минимум потенциальной энергии.



Каждый уровень энергии уединенного атома расщепляется в зону уровней, которые принадлежат всему кристаллу, а не одному атому. Чем выше уровень энергии одиночного атома, тем легче электрон перепрыгивает из одной потенциальной ямы в другую, и тем выше частота перескоков, которая совпадает с частотным расщеплением уровней энергии в зоне.

Интересно, что согласно квантовой механике электрон способен перескакивать из одной потенциальной ямы в другую через потенциальный барьер, оставаясь при этом на уровне энергии, расположенном ниже высоты потенциального барьера. Это так называемое туннелирование электронов через потенциальный барьер.

Для нижних уровней энергии одиночного атома вероятность туннелирования через барьер очень мала, уровни энергии почти не расщепляются и остаются одиночными уровнями, а не зонами уровней.

Если электрон часто перескакивает, то это свободный электрон, а зона уровней энергии — зона проводимости. Если электрон редко перескакивает, то это связанный электрон, а зона — валентная зона.

Между валентной зоной уровней энергии и зоной проводимости находится зона совсем без уровней — запрещенная зона.



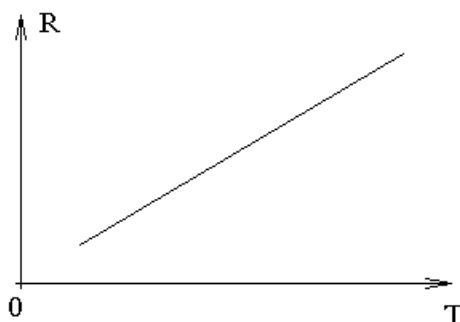
При изображении энергетических зон по вертикали откладывают энергию уровня, а по горизонтали обычно ничего не откладывают. Уровни энергии рисуют горизонтальными отрезками, потому что отрезки лучше видно, чем точки на оси энергии.

Если верхнее занятое электронами состояние находится в валентной зоне, то материал — диэлектрик. Диэлектрик не проводит электрический ток.

Если верхнее занятое электронами состояние находится в зоне проводимости, то материал — проводник. Проводник проводит электрический ток.

В полупроводнике при температуре абсолютного нуля $T = 0$ верхнее занятое состояние находится в валентной зоне. При комнатной температуре есть очень небольшое количество электронов в зоне проводимости, так как ширина запрещенной зоны полупроводника сравнима с тепловой энергией kT , хотя и заметно больше, чем kT . При этом часть электронов на хвосте распределения Ферми-Дирака аналога распределения Больцмана попадает в зону проводимости.

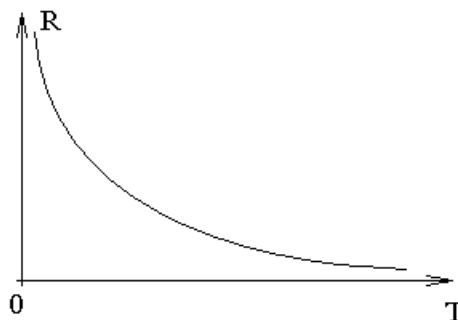
Факультатив. Температурная зависимость сопротивления.



В проводнике с ростом температуры T растет скорость электронов V и, следовательно, убывает длина волны де Бройля электронов $\lambda = \frac{h}{mV}$. С уменьшением длины волны уменьшается дифракция электронов в проводнике, электроны хуже огибают препятствия, увеличивается рассеяние электронов на узлах кристаллической решетки проводника, растет сопротивление.

В проводнике рост температуры ведет к увеличению сопротивления проводника.

В полупроводнике с ростом температуры, в соответствии с распределением Ферми-Дирака, растет заселенность уровней энергии в зоне проводимости, растет проводимость полупроводника и уменьшается его сопротивление.



В полупроводнике с ростом температуры сопротивление убывает.

Полупроводниковая электроника.

Факультатив. Полупроводники n-типа и полупроводники p-типа.

Типичные полупроводники 4-х валентны: Si, Ge. В чистых полупроводниках проводимость настолько мала, что проводимость реального полупроводника всегда определяется его примесями.

Добавление примесей — легирование полупроводника.

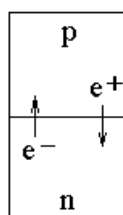
Если примесь 5-и валентна, то атом примеси имеет лишний электрон, который легко отрывается и начинает блуждать по полупроводнику. Получается полупроводник n-типа. У него негативные носители тока, поэтому полупроводник n-типа.

Если примесь 3-х валентна, то к атому примеси легко прилипает лишний электрон. Недостаток электрона — дырка. Дырка перемещается от одного атома полупроводника к другому. Получается полупроводник p-типа. У него позитивные носители тока, поэтому полупроводник p-типа.

Факультатив. Полупроводниковый диод.

Рассмотрим, что происходит при соприкосновении полупроводника n-типа и полупроводника p-типа.

Электроны диффундируют через контакт двух полупроводников из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа. Дырки диффундируют во встречном направлении из p в n полупроводник.

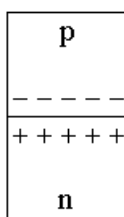


Электроны в чужом для них полупроводнике p-типа называют неосновными носителями тока, как и дырки в полупроводнике n-типа.

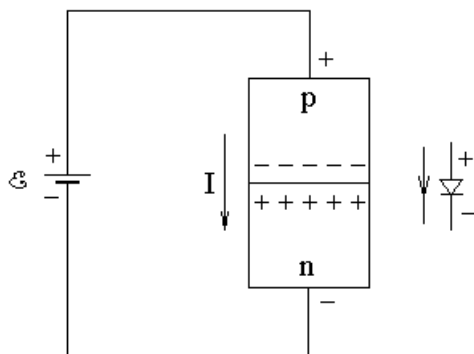
Неосновные носители тока в чужом для них полупроводнике встречаются с основными носителями и рекомбинируют. При рекомбинации пропадает один электрон и одна дырка. Освободившаяся энергия излучается в виде кванта света, поэтому каждый диод одновременно является светодиодом только обычно в инфракрасной области.

При диффузии в чужой полупроводник носители тока переносят через границу заряд. Электроны и дырки диффундируют навстречу друг другу, но силы тока при этом направлены в одну сторону и складываются.

В результате рекомбинации в области контакта уменьшается концентрация носителей тока и появляется слой, обедненный носителями.



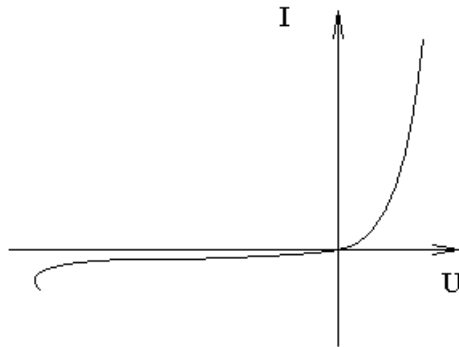
Рекомбинируя в чужом полупроводнике, неосновные носители оставляют перенесенный через контакт заряд. В области контакта появляется двойной электрический слой, похожий на заряженный конденсатор. Как и на конденсаторе, на двойном слое происходит падение напряжения. Это напряжение возрастает до тех пор, пока оно не останавливает диффузию оставшихся носителей тока через контакт.



Если к контакту приложить внешнее электрическое поле, которое уменьшает контактное напряжение, то диффузия носителей тока возобновляется. Через контакт течет ток.

Если к контакту приложить внешнее электрическое поле, которое увеличивает запирающее контактное напряжение, то тока нет.

То есть контакт двух полупроводников представляет собой диод. Он пропускает электрический ток в одну сторону и не пропускает в другую.



Отпирающее напряжение $U > 0$ называют напряжением в прямом направлении, оно вызывает ток, который хорошо подчиняется формуле:

$$I(U) = I_0 \cdot \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right),$$

где I_0 зависит от температуры T , коэффициент e в показателе экспоненты — модуль заряда электрона, k — постоянная Больцмана.

$$\frac{kT}{e} \approx 25 \text{ мВ.}$$

При увеличении отпирающего напряжения на 25 мВ ток через диод возрастает в e раз.

При постоянном токе через диод $I = \text{const}$ величина I_0 зависит от температуры так, что $I_0(T) \sim \frac{1}{T}$.

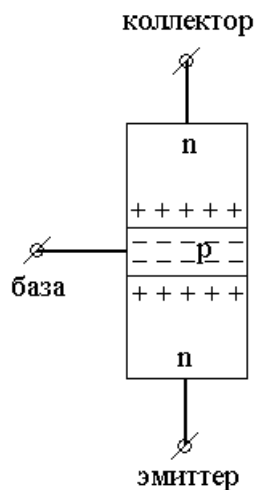
Характерное напряжение отпираения для кремниевых диодов 0.6 Вольт, для германиевых диодов (0.2 — 0.3) Вольта.

При большом запирающем напряжении происходит электрический пробой диода и, как правило, его тепловое разрушение.

Факультатив. Биполярный полупроводниковый транзистор.

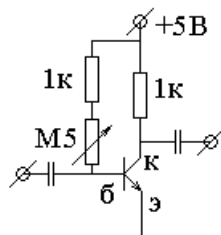
Биполярные транзисторы бывают n-p-n типа и p-n-p типа. n-p-n транзисторы имеют лучшие характеристики, поэтому чаще используются.

Рассмотрим n-p-n транзистор.



Транзистор — это два диода, которые включены последовательно навстречу друг другу, но включены так, что средний слой полупроводника р-типа очень тонкий. Толщина слоя гораздо меньше его ширины.

Два крайних полупроводника n-типа называются эмиттер (испускатель электронов) и коллектор (собиратель электронов). Средний полупроводник — база или управляющий электрод.



Рассмотрим типичную схему включения транзистора. Пусть эмиттер соединен с общим проводом схемы. На коллектор подадим положительное напряжение, например +5 Вольт, через небольшое (1 кОм) сопротивление. На базу относительно общего провода подадим небольшое положительное напряжение, для этого соединим базу с тем же источником напряжения, что и коллектор, но через заметно большее сопротивление (порядка 0.1 МОм). Буквы 'к' и 'М' в обозначении сопротивлений имеют смысл приставок "кило" и "мега" и одновременно имеют смысл десятичной запятой.

Напряжение между коллектором и базой запирает верхний p-n переход. Напряжение база – эмиттер отпирает нижний диод.

База — очень узкий слой полупроводника, поэтому большинство электронов по дороге от эмиттера на базовый электрод в своем случайном диффузном движении иногда близко подходят к контакту между базой и коллектором.

Переход база – коллектор заперт приложенным напряжением для основных носителей тока, но электроны из эмиттера на базе являются неосновными носителями, и для них напряжение база – коллектор не только не препятствует переходу через контакт, но и, наоборот, втягивает в верхний p-n переход.

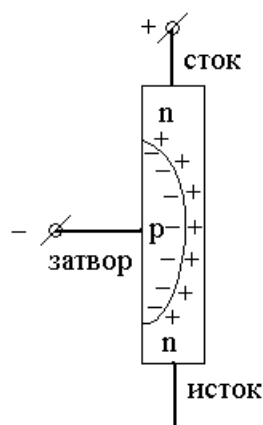
В результате ток коллектора в десятки, а то и сотни раз, превышает ток базы. Это и есть усиление транзистора по току.

Величину сопротивления в цепи базы обычно подбирают так, чтобы половина напряжения источника питания падала на сопротивлении в цепи коллектора, а другая половина — между коллектором и эмиттером.

Недорогой и достаточно универсальный (дежурный) биполярный транзистор российского или советского производства — КТ3102. Цена одного транзистора в розничной продаже в несколько раз меньше цены разового проезда в метро.

Факультатив. Полевой транзистор с p-n переходом.

Полевой транзистор, например, с n-каналом — это биполярный n-p-n транзистор, у которого между эмиттером n-типа и коллектором n-типа образовался тонкий канал того же n-типа.



Названия электродов полевого транзистора аналогичны по смыслу названиям электродов биполярного транзистора: вместо эмиттера, базы, коллектора здесь — исток, затвор, сток.

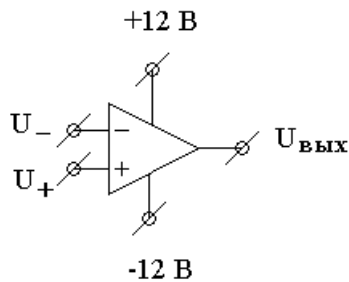
Полевой транзистор — это сопротивление управляемое запирающим напряжением на затворе. Сопротивление n-канала между истоком и стоком зависит от напряжения на затворе.

Понижение потенциала затвора относительно истока сильнее запирает диод между затвором и n-каналом. При этом в n-канале расширяется зона, обедненная носителями тока. Это приводит к увеличению сопротивления канала между стоком и истоком.

Дежурный полевой транзистор российского или советского производства — КП302. Цена одного транзистора втрое больше цены разового проезда в метро.

Факультатив. Операционный усилитель или ОУ.

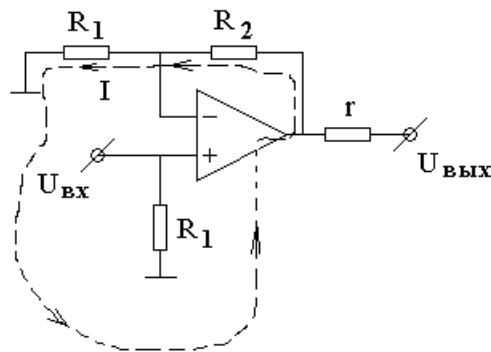
Операционный усилитель — микросхема, которая усиливает во много раз, например в миллион, разность напряжений на двух входах.



$U_{\text{вых}} = \alpha \cdot (U_+ - U_-)$, где $\alpha \approx 10^6$ — коэффициент усиления по напряжению.

Обычно ОУ имеет двухполярное питание. На одну ногу микросхемы подают +12 Вольт, на другую — -12 Вольт.

В операционном усилителе обычно вводят отрицательную обратную связь.



В качестве примера рассмотрим усилитель напряжения на операционном усилителе. Входной сигнал подадим на плюс вход ОУ. Минус вход через сопротивление R_1 соединим с общим проводом схемы. Выход ОУ через сопротивление R_2 соединим с минус входом.

Для анализа работы любой схемы с операционным усилителем достаточно воспользоваться двумя правилами.

- 1). Входные токи ОУ пренебрежимо малы: $I_+ \approx I_- \approx 0$.
- 2). При нормальной работе ОУ напряжения на двух входах практически равны: $U_+ \approx U_-$.

Проведем анализ предложенной схемы.

$$U_+ = U_{\text{вх}} \Rightarrow U_- = U_{\text{вх}} \Rightarrow$$

$$I = \frac{U_-}{R_1} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1} \text{ — сила тока по цепи } R_2, R_1.$$

$$U_{\text{вых}} = I(R_1 + R_2) = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{\text{вх}} \Rightarrow U_{\text{вых}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_{\text{вх}}$$

Дежурный импортный операционный усилитель — TL071. Цена одного операционного усилителя чуть больше цены разового проезда в метро.

