

Когда мы произносим слово “электроника”, то обычно подразумеваем нечто, построенное на базе полупроводниковых элементов. Но что это за элементы такие, почему у них столь странное название? Внесём, пожалуй, ясность в этот вопрос.

Все мы знаем, что некоторые вещества проводят электрический ток, а некоторые нет. Первые называют проводниками, вторые диэлектриками. Но что означает - проводят электрический ток? С точки зрения физики, проводимость - это способность позволить свободным зарядам перемещаться .

Под свободными зарядами обычно понимают электроны (или ионы в растворах/расплавах или плазме, нас сейчас это не интересует). Однако, электрон - отрицательно заряженная частица, нельзя просто взять и свободно накопить значительное количество электронов, они отталкиваются друг от друга. А там, где мы их взяли, остались положительно заряженные частицы, к которым эти электроны притягиваются.

Так что под наличием свободных электронов подразумевают возможность, затратив небольшую энергию, изъять электроны с их обычного места, воспользоваться ими и вернуть в связанное состояние. Если представить себе замкнутый проводник, затратив относительно немного энергии, можно передвинуть электроны по кругу. Да, они не вернутся на старое место, но кто их различит. А если “впрыснуть” некоторое количество электронов в один конец проводника, можно извлечь такое же их количество с другого конца.

Итак, отличительной особенностью проводников является незначительное количество энергии, которое требуется затратить, чтобы оторвать электрон от его носителя. Носителями электронов в проводниках обычно являются металлы, хотя и графит, например, отлично проводит ток. В диэлектриках извлечь электрон с привычного места тоже можно, но на это потребуются существенно больше энергии, вплоть до того, что структура вещества разрушится (расплавится, почему нет) прежде, чем удастся оторвать сколь-нибудь значимое количество электронов.

Здравый смысл говорит нам, что

- раз всё дело в энергии отрыва электрона от атома
- и эта энергия может быть малой
- или большой
- значит должно быть и что-то промежуточное, ни большое ни маленькое.

Здравый смысл нас не обманывает, таких веществ действительно полно. И если бы наш интерес был вызван скукой, на этом можно было бы успокоиться.

Однако, вопрос в другом - как это можно использовать ?

Когда мы видим систему, балансирующую между двумя состояниями (в данном случае проводник/диэлектрик), возникает соблазн организовать катастрофу (в математическом смысле), т.е. резкое изменение поведения системы (проводник \leftrightarrow диэлектрик) в ответ на плавное изменение управляющего параметра. Таким параметром может быть температура, деформация, освещенность, наличие электрического поля ... Довольно заманчивым было бы управление электрическим

током с помощью электрического тока.
Но прежде следует разобраться в физике процесса.

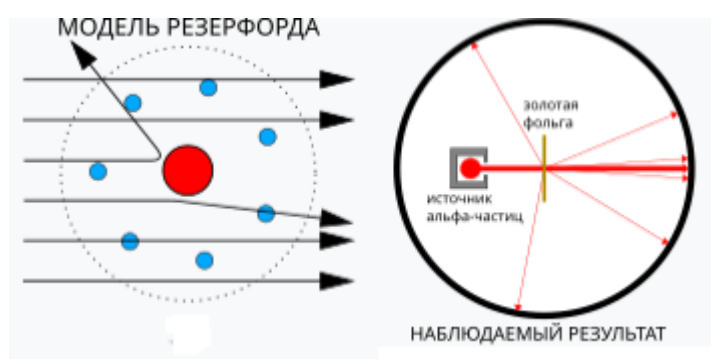
Электроны, орбитали и всё всё всё

Простой вопрос, почему некоторые атомы легко отдают электроны, а некоторые с трудом, открывает перед нами просто бездну (не)знания. То, что всё состоит из атомов, люди догадывались давно, что атомы состоят из элементарных частиц, экспериментально установлено чуть больше ста лет назад.

Об устройстве атома вначале просто строили догадки, так, существовала пудинговая модель Томсона с изюминками - электронами, или сатурно-подобная модель Нагаоки с массивным ядром и электронами в кольце. Планетарную модель Резерфорда (1911) вначале восприняли в штыки т.к. она противоречила электродинамике.

В самом деле, если электрон вращается вокруг ядра подобно планете вокруг звезды, на него действует центростремительная сила (каждый может в этом убедиться, прокатившись на карусели), т.е. он движется с ускорением, обладая зарядом и, следовательно, обязан излучать электромагнитные волны, терять энергию и в конце концов упасть на ядро. Времени для этого ему понадобится примерно десять пикосекунд (10^{-11} сек). Поскольку наш мир существует, да и предсказанного излучения мы не наблюдаем, что-то здесь не так.

Но просто отвергнуть модель Резерфорда было невозможно, т.к. она подтверждалась экспериментально, обстрел мишени из золотой фольги альфа-частицами (эксперимент Гейгера-Марсдена, 1909) показал, что размер ядра незначителен (меньше примерно в 10 000 раз) по сравнению с размером атома, а значит атомы взаимодействуют электронными оболочками.



Фиг.3.1.1 эксперимент Гейгера-Марсдена

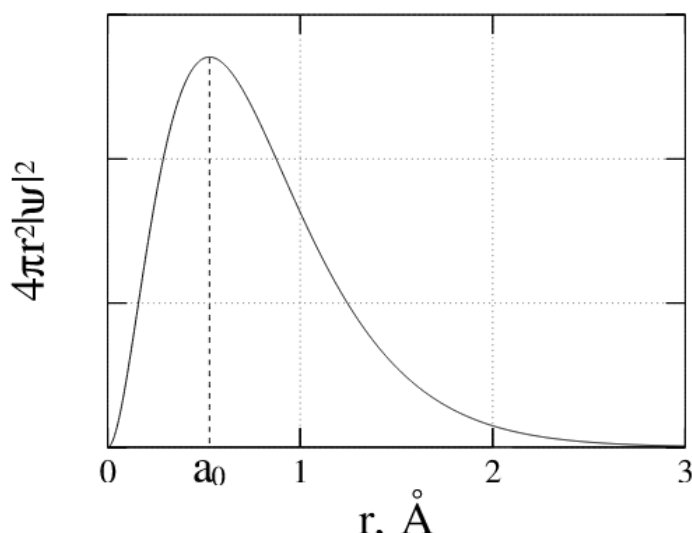
Чтобы устранить противоречие, Нильсу Бору (1913) пришлось ввести квантование энергии электрона в атоме - электрон может находиться только на определенных орбитах с определенными энергиями, переход между ними происходит скачком и при этом выделяется или поглощается квант энергии. Аналогия такая - нельзя пойти в автосалон и купить треть автомобиля, надо накопить денег на автомобиль целиком. Хорошо, в рассрочку можно, но до этого, к счастью, в микромире еще не додумались.

Теория Бора получила экспериментальное подтверждение (некоторых её предсказаний) и послужила основанием для развития квантовой механики, которую, конечно же, мы **не** будем здесь изучать.

Немного об электронных орбиталях. Квантовая механика **не** занимается поведением микрочастиц. Она описывает усреднённое поведение больших ансамблей таких частиц подобно тому, как термодинамика занимается свойствами объектов (температура, давление газа) а не конкретных молекул, из которых этот объект состоит. Квантовая механика работает с вероятностями обнаружения частицы в разных областях орбитали.

Итак, электронная орбиталь - это не траектория электрона, а вероятность его нахождения в разных точках пространства. Какими они могут быть, какой смысл заложен природой в орбиталях? Электроны имеют заряд и отталкиваются друг от друга. Но притягиваются к ядру. Смысл орбиталей в том, чтобы электроны **в среднем** были поближе к ядру и подальше друг от друга, так минимизируется их общая энергия.

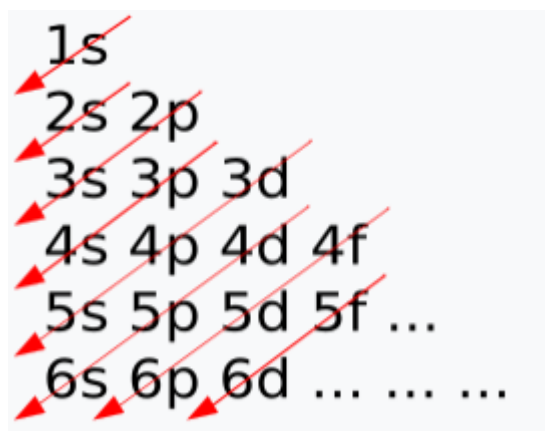
Как это может выглядеть? В случае единственного электрона вариантов не много, это сферическая орбиталь (точнее, что-то вроде полого шара, но мы будем использовать слово сфера). Для двух электронов тоже сфера, по которой электроны могут двигаться в противофазе. А для трёх? Или в произвольном случае?



Фиг.3.1.2 Плотность вероятности электрона в водороде от расстояния до ядра ([отсюда](#))

Данная задача имеет решение. В случае водорода (задача двух тел) это решение даже аналитическое, т.е. может быть записано в виде формул. Для остальных атомов аналитических решений нет, но приближенные могут быть получены (с приемлемой точностью) расчетным путём. Это так называемые в математике “[сферические функции](#)”. К слову, орбитали атомов, отличных от водорода, похожи на водородные, но несколько искажены тем, что электроны частично экранируют ядро друг для друга.

Относительные энергии разных орбиталей показаны на Фиг.3.1.4, это тоже расчетный порядок, который подтверждается экспериментом.



Фиг.3.1.4 порядок заполнения орбиталей (до $k=6$), первое число k потом mnemonic обозначение l ([отсюда](#))

Это в свою очередь порождает столь любимую многими таблицу Менделеева.

s-block												p-block					
1	2											13	14	15	16	17	18
←1s→												←1s→					
←2s→		d-block										←2p→					
←3s→		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	←3p→					
←4s→		3d										←4p→					
←5s→		4d										←5p→					
←6s→		5d										←6p→					
←7s→		6d										←7p→					
f-block																	
		4f															
		5f															

Фиг.3.1.5 Таблица Менделеева, показана верхняя (**наружная**) орбиталь ([отсюда](#))

Как заполненность **наружной** орбитали сказывается на физических свойствах атома? Если на ней мало электронов, атом легко с ними расстаётся - щелочные металлы. Если на ней много электронов, этот атом скорее оторвёт у кого-нибудь электрон, чем расстанется со своим - галогены. Если орбиталь полностью заполнена, достать электрон из такой орбитали очень сложно, поэтому такие элементы называют инертными (благородными) газами.

Это похоже на арочный свод - пока он незавершен, это просто груда камней, но стоит поставить на место последний (замковый) камень, арка становится очень устойчивой, возраст некоторых арочных мостов под 2 тысячи лет.



Фиг.3.1.6 арочный акведук Пон-дю-Гар (Pont du Gard) в южной Франции

Как возникает химическая связь? Пусть натрий (Na, щелочной металл с одним из шести возможных электронов на Р-орбитали ($l=1$)) встречается с хлором (Cl, галоген с 5 из 6 возможных электронов). Натрий отдаёт свой электрон и остаётся с полностью заполненными орбиталями, хлор наконец заполняет свою Р орбиталь. Возникает разнесение зарядов, но энергетически это выгоднее чем исходное состояние. Получившаяся соль (NaCl) весьма устойчива, диэлектрик. Начинает проводить ток в растворе или расплаве, но там проводимость ионного толка за счет миграции ионов Na^+ и Cl^- .

Виды проводимости.

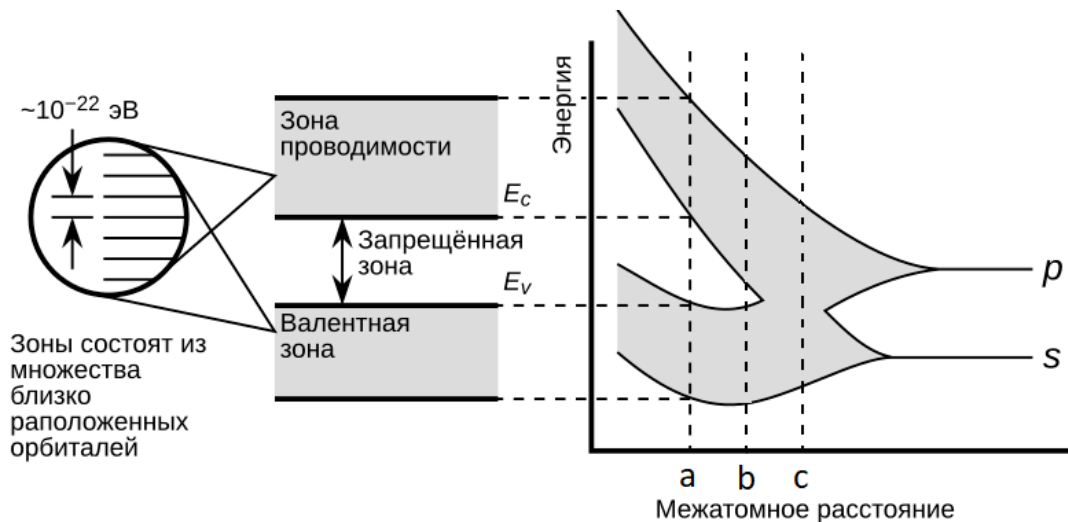
До сих пор мы имели дело с единичными атомами, но проводимость это всегда групповое поведение. Начнем с малого, что если у нас два рядом расположенных одинаковых атома.

Два одинаковых атома имеют идентичные системы орбиталей. Когда они далеко друг от друга, взаимодействием их орбиталей можно пренебречь. Но как только взаимодействие началось, вместо двух изолированных квантовых систем получаем одну общую. Однако, как мы помним, принцип Паули запрещает более чем двум электронам находиться на орбитали с одинаковым набором квантовых чисел k, l, m , а у нас на каждой такой заполненной орбитали потенциально по 4 электрона. Они идентичные, мы же помним. Как природа выкручивается из этой ситуации?

Мы видели две идентичные квантовые системы, но как только началось взаимодействие, осталась только одна общая квантовая система. А идентичные орбитали расщепились на две общие с близкими, но всё же разными энергиями. Ученые называют это “вырождение снялось”. Если смотреть на шкалу энергии

орбиталей, там где раньше в каждом атоме были одиночные линии орбиталей, появились пары очень близких линий.

Продолжим усугублять ситуацию и рассмотрим взаимодействие двух пар одинаковых атомов. Ожидаемо, там где была пара линий расщеплённой орбитали, опять снимается вырождение и линий станет 4. В случае большого количества взаимодействующих атомов, расщепленные линии фактически сольются в сплошную полосу и переход электрона в пределах этой полосы из дискретного станет непрерывным. Иными словами, для макрообъектов квантовые эффекты несущественны.



Фиг.3.1.7 Образование зон при сближении атомов ([отсюда](#))

На Фиг.3.1.7 можно наблюдать формирование орбитальных зон по мере того, как среднее расстояние между атомами уменьшается и каждый атом начинает “видеть” всё большее количество своих соседей.

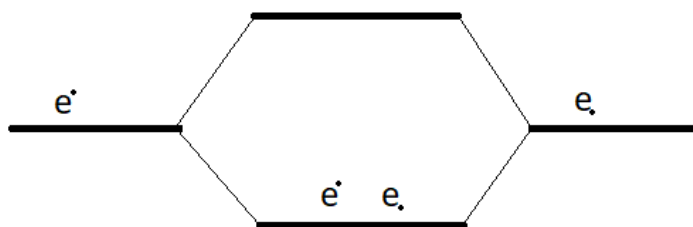
- S заполненная орбиталь атомов с квантовым числом $l = 0$
- P незаполненная орбиталь атомов с квантовым числом $l = 1$
- по мере сближения, зоны бывших орбиталей S и P расплываются и в какой-то момент сливаются. В этот момент (отметка C) оказывается, что электроны с S орбиталей (валентная зона) могут переходить на незаполненные бывшие P орбитали (зона проводимости). Для этого им не нужны затраты энергии. Физически это означает, что электроны могут почти свободно путешествовать по всему объему материала. Это металлический тип проводимости.
- При дальнейшем сжатии, слившиеся было зоны S и P начинают расходиться (отметка B). Правда, расстояние между ними мало и нужна совсем небольшая помощь, чтобы электроны смогли перескакивать с заполненной S зоны в незаполненную P и получали возможность мигрировать по материалу. Это зона полупроводниковой проводимости.
- Отметка A - чистый диэлектрик, расстояние между зонами так велико, что сколь-нибудь значимое число электронов не может её преодолеть (поэтому она и называется запрещенная зона).

Вышеописанное - это так называемая “зонная теория” проводимости. Несмотря на грубые допущения, она неплохо согласуется с экспериментом.

Что можно с этим сделать? Рассмотрим на примере кремния (очень упрощенно). Кремний имеет электронную конфигурацию $3s^2 3p^2$ т.е. полностью заполненную $3s$ орбиталь и 2 электрона на $3p$ орбиталях.

В кристаллическом кремнии атомы связаны между собой так называемой ковалентной связью. Четыре электрона на верхних орбиталях образуют четыре ковалентные связи с соседними атомами.

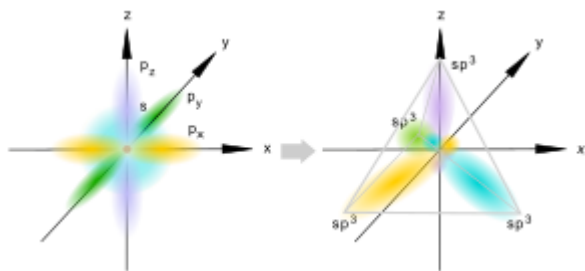
На Фиг.3.1.7 рассматривалась ситуация с заполненной s и пустой p -орбиталями, между которыми и у отдельного атома есть разница в энергии. Для кремния ситуация иная - два электрона на полу-заполненной p -орбитали. Здесь необходимо рассмотреть возникновение ковалентной связи. Слово ковалентный означает, что обе стороны возникающей связи равноценны. Если при возникновении связи Na-Cl хлор отбирает электрон у натрия и их орбитали достаточно далеки друг от друга по энергии для слияния, то здесь в образовании связи участвуют одинаковые орбитали.



Фиг.3.1.8 образование ковалентной связи (точками обозначены разные спины)

Образование ковалентной связи выгодно энергетически, иначе она бы не образовывалась, вместо двух одинаковых орбиталей возникают две другие относительно далёкие энергетически. На орбитали с меньшей энергией оказываются два электрона (с разными спиновыми числами, конечно), орбиталь с большей энергией пуста. И таких связей в каждом атоме кремния 4. Одинаковые валентные орбитали начинают взаимодействовать друг с другом аналогично тому, как это происходило на Фиг.3.1.7. В случае кремния получается ситуация с отметкой В.

Внимательный читатель обязательно спросит: как же так, почему 4 а не 2, ведь выше говорилось про два электрона на $3p$? Здесь возникает эффект, который ученые называют "гибридизация орбиталей". Происходит она в два шага. На первом, один из электронов с s орбитали переходит на p уровень. На втором шаге, s орбиталь и три p орбитали мутируют в 4 одинаковые орбитали, ориентированные так, что образуют правильный тетраэдр.

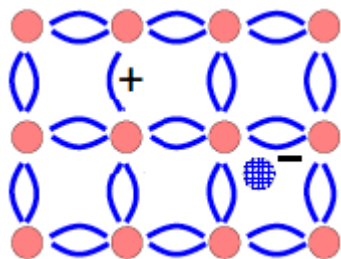


Фиг.3.1.9 гибридизация по типу sp^3 ([отсюда](#))

Действительно, конфигурация $3s^2 + 3p^2$ выгоднее энергетически чем $4sp^3$, но это касается единичного атома кремния. В случае же четырёх соседей выгоднее гибридный вариант. Между прочим, углерод тоже склонен к гибридизации по типу sp^3 , в такой конфигурации он находится в метане (CH_4) и кристаллической решетке алмаза.

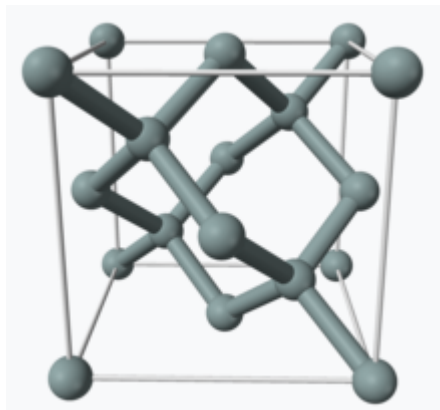
Собственная проводимость.

Поскольку запретная зона у кремния тонкая, электроны легко попадают в зону проводимости, после чего могут перемещаться по кристаллу.



Фиг.3.1.10 Свободный электрон и образовавшаяся дырка.

Этот рисунок очень схематичный и нарисован так для наглядности, на самом деле кристаллическая решетка кремния кубическая гранецентрированная (как у алмаза)



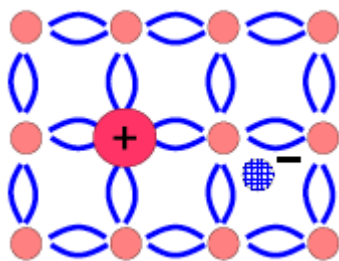
Фиг.3.1.11 Кристаллическая решетка кремния ([отсюда](#)).

Электрон может взяться только из ковалентной связи, на его месте остаётся положительный заряд. Однако, этот положительный заряд может быть компенсирован электроном с другой ковалентной связи, теперь положительный заряд как бы переместится в на новое место. Ученые называют такой блуждающий положительный заряд “дыркой”, потому что по внешним признакам он ведёт себя как положительно заряженная частица. Если свободный электрон встречается с дыркой, происходит “рекомбинация”, они взаимно компенсируют друг друга. Проводимость такого типа называется “собственной”.

Проводимость n-типа.

Если в четырёхвалентный кремний добавить в качестве примеси (легировать), например, пятивалентный мышьяк или фосфор, то атом мышьяка вступает в

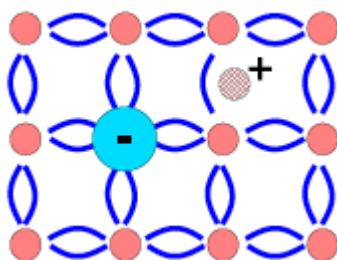
ковалентные связи с четырьмя атомами кремния, но пятый электрон атома добавки остаётся предоставлен сам себе. Он оказывается в зоне проводимости. Так возникает проводимость n-типа (от слова negative, т.е. отрицательный).



Фиг.3.1.12 Проводимость n-типа

Проводимость p-типа.

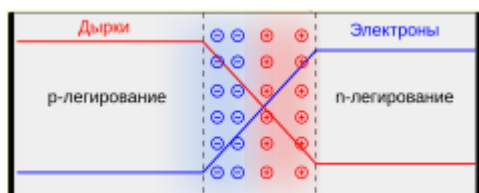
И наоборот, если четырёхвалентный кремний легировать трёхвалентным индием (или бором, алюминием), одному из четырех соседних атомов кремния не хватит ковалентного электрона и возникнет дырка. Это проводимость p-типа (от слова positive, положительный)



Фиг.3.1.13 Проводимость p-типа

P-N переход.

Интересный эффект возникает на границе контакта полупроводников с разными типами проводимости. Свободные электроны из области с n-проводимостью, блуждая, переходят в область с p-проводимостью, где рекомбинируют с дырками. То же касается дырок, которые забредают в n-область.



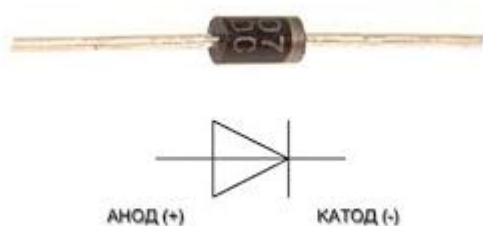
Фиг.3.1.14 P-N переход

В результате, вдоль границы контакта возникают заряженные плоскости с электрическим полем между ними. Это так называемый P-N-переход. При отсутствии внешнего поля, P-N-переход работает как барьер: положительно заряженная область отпугивает дырки, отрицательно заряженная - электроны.

Диоды.

Попробуем приложить к P-N-переходу электрическое поле. Если к n-области приложено положительное поле, а к p-области отрицательное, действие этого поля лишь усугубит барьерные свойства P-N-перехода, после чего он “запирается”. В обратном случае - отрицательное поле к n-области, положительное к p-области, отрицательное поле подавляет положительно-заряженную область P-N-перехода и поток электронов прорывается в p-область. P-N-переход “открывается” и через полупроводник течет ток.

Данная конструкция называется “диод”, название происходит от греческих слов $\delta\iota\varsigma$ (два) и $\acute{o}\delta\acute{o}\varsigma$ (путь). Диод проницаем для тока только в одном направлении, это очень полезное свойство. До того, как появились полупроводники, существовали вакуумные диоды - колбы с откачанным воздухом с двумя электродами - подогреваемым катодом и холодным анодом. С горячего катода электроны легко улетают к аноду, покидать холодный анод отказываются. В результате вакуумный диод также демонстрирует одностороннюю проводимость.



Фиг.3.1.15 Типичный диод и его обозначение на схемах.

Еще одно полезное свойство - использовать диод в качестве конденсатора. Ведь область P-N-перехода обладает определенной ёмкостью, в запертом состоянии эта ёмкость увеличивается. Таким образом мы имеем конденсатор, ёмкость которого регулируется с помощью приложенного напряжения. Такое устройство называется “варикап” (variable capacity).

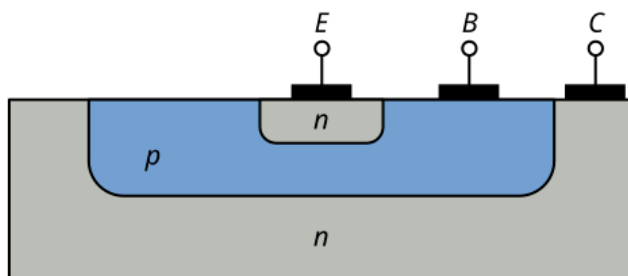
В некоторых видах полупроводников рекомбинация электронов и дырок происходит с испусканием фотона - кванта света, в отличие от обычной ситуации, когда эта энергия преобразуется в тепло. Такие устройства называются светодиодами.

Существует масса других вариантов диодов и неожиданных их применений, но это уже за рамками нашего разговора.

Триоды

Как следует из названия, в триоде три области с разными типами проводимости. В данный момент слово триод вытеснено термином транзистор (transfer resistor). А следовательно существует два варианта триодов/транзисторов: pnp и npn. Это так называемые “биполярные” транзисторы.

Биполярные транзисторы.



Фиг.3.1.16 упрощенное устройство npn - транзистора ([отсюда](#))
 обозначения: E- emitter/эмиттер, B-base/база, C-collector/коллектор.

Если просто приложить напряжение: минус на эмиттер, плюс на коллектор, то N-P-переход эмиттер-база откроется, а переход база-коллектор закроется. Тока нет.

Если теперь приложить существенно меньшее положительное напряжение на базу, то впрыскиваемые дырки начнут рекомбинировать с прибывающими из эмиттера электронами, барьер на P-N- переходе база -коллектор снизится и электроны начнут просачиваться в коллектор. Ток эмиттер-коллектор есть.

Так как базу стараются сделать тонкой и широкой, доля рекомбинирующих электронов относительно невелика и потери на транзисторе малы.

Нетрудно заметить, что ток эмиттер-коллектор сильно зависит от напряжения на базе, что позволяет использовать транзистор в качестве усилителя. Но в электронике транзисторы в основном используются в качестве вентилях/задвижек. Это устройство, которое пропускает ток, только если есть управляющий сигнал (закрывающий вентиль). Или наоборот, размыкает ток когда появляется управляющий сигнал.

PNP-транзистор работает аналогично, с точностью до знака напряжения.

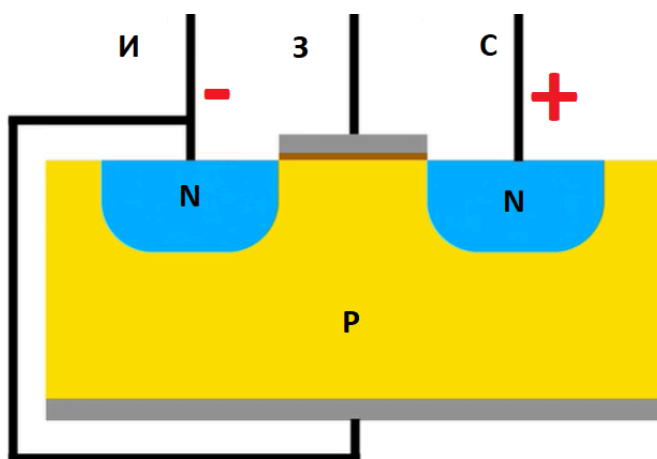


Фиг.3.1.17 обозначения биполярных транзисторов на схемах

Полевые транзисторы.

Это весьма важный тип полупроводниковых триодов, почти все транзисторы в микросхемах именно такого типа, это вызвано в основном относительной простотой и технологичностью изготовления микросхем с транзисторами такого вида.

Главным отличием полевого транзистора от биполярного является то, что для открытия биполярного транзистора необходимо протекание тока через его базу. Для полевого транзистора достаточно, чтобы на его затвор было приложено напряжение.

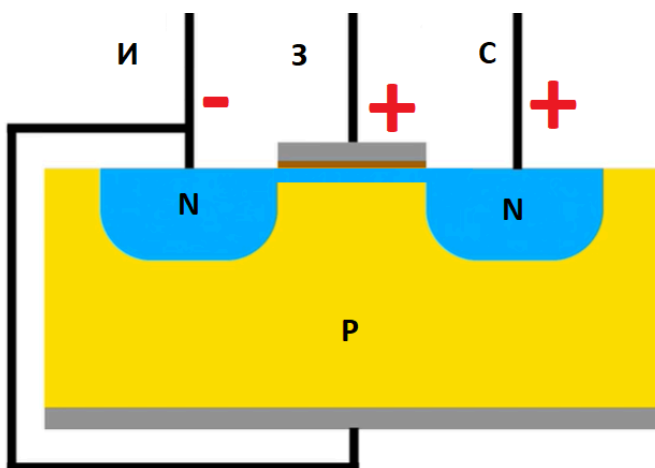


Фиг.3.1.18 Полевой транзистор с изолированным затвором (MOSFET)
И-исток (source), З-затвор (gate), С-сток (drain) ([отсюда](#))

Рассмотрим на примере наиболее употребимого варианта - с изолированным затвором (MOSFET, Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor).

Желтая область - полупроводник, легированный по P-типу. В него встроены две области с обогащением по N-типу (синие). Выводов строго говоря 4 - сток, исток, затвор и подложка, но подложка обычно соединена с истоком. Между затвором и P-областью расположен тонкий слой изолятора (коричневый).

Как мы видели раньше, между истоком и стоком находятся NPN переходы и ток идти не может. Но если на затвор подать положительное напряжение, чтобы к нему притягивались электроны, то рядом с ним формируется обогащенная свободными электронами область, по которой начинает течь ток от истока к стоку. Это называется "индуцированный канал". Транзистор открылся.



Фиг. 3.1.19 MOSFET в открытом состоянии

Очевидно, это же можно проделать и для случая PNP, тогда на истоке должно быть положительное напряжение, а на затворе и стоке - отрицательное.

Технически возможно сразу организовать проникаемую подзатворную область, в этом случае транзистор будет находиться в изначально открытом состоянии и напряжение на затвор придётся подавать, чтобы его закрыть. Это называется “транзистор со встроенным каналом”.

	Индукцированный канал	Встроенный канал
P-канал		
N-канал		

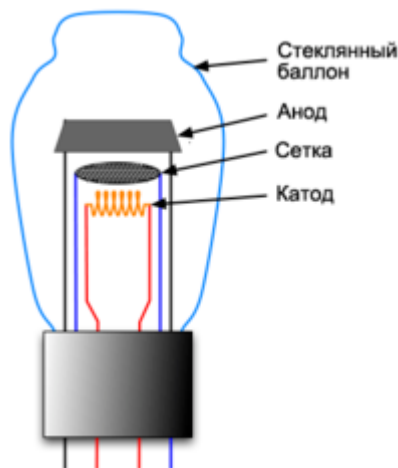
Фиг.3.1.20 изображения полевых транзисторов на схемах ([отсюда](#))

Что касается скорости переключения полевых транзисторов. Для образования индуцированного канала (так же как и для разрушения встроенного) требуется время, в течении которого свободные заряды будут мигрировать к затвору и формировать конденсатор. Это время мало, но вот у биполярных транзисторов нет никакого конденсатора и ему не требуется время на его зарядку. Так что время переключения у биполярных транзисторов в десятки раз меньше чем у биполярных.

С другой стороны, это время в любом случае очень мало (наносекунды) и пропорционально физическому размеру затвора. Чем меньше транзистор, тем быстрее он переключается, по мере миниатюризации электроники вопрос скорости переключения транзисторов становится менее актуальным.

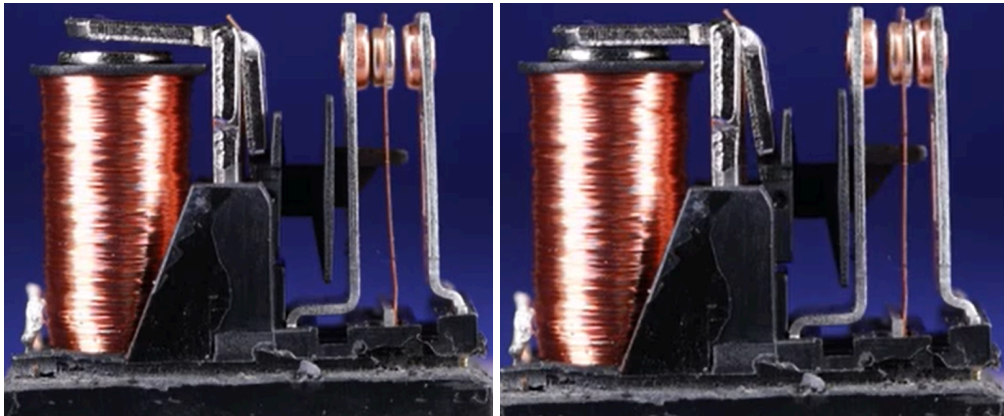
Прочее

Также как и в случае с диодом, до изобретения полупроводниковых триодов, существовали вакуумные триоды.



Фиг.3.1.21 Вакуумный триод

Также как в вакуумном диоде в нём присутствуют подогреваемый катод и холодный анод. Но между ними расположена металлическая сетка. В зависимости от напряжения на ней, сетка может либо притягивать (ускорять и пропускать основную массу через себя) электроны либо отталкивать (блокировать) их.



Фиг.3.1.22 Работа электромагнитного реле ([отсюда](#)).

До появления полупроводниковых и вакуумных вентилей, в качестве таковых использовались реле. Принцип работы реле показан на Фиг.3.1.22, большинство реле умеют работать и на замыкание и на размыкание контакта. После подачи напряжения на катушку, якорь притягивается к ней и размыкает один контакт, одновременно замыкая другой.

Несмотря на развитие полупроводников, разнообразные реле до сих пор имеют свою нишу применения.

- характеристики полупроводников чувствительны к температуре, реле нет
- реле нечувствительны к ионизирующему излучению
- хотя, вибро- и ударостойкость у реле ниже
- у реле выше стойкость к разрядам статического электричества

- реле имеет полную гальваническую развязку, слабый управляющий сигнал может управлять большими токами без риска, что что-нибудь сломается и силовое напряжение пойдёт в управляющие схемы, правда, при переключении больших токов вероятно искрообразование и деградация контактов
- с помощью реле можно коммутировать переменный ток