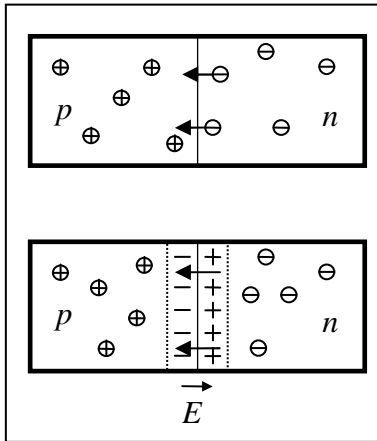


Лекции 21 - 22. Контактные явления в полупроводниках.

p-n -переход. Распределение электронов и дырок в p-n-переходе. Ток основных и неосновных носителей через p-n -переход. Вольтамперная характеристика p-n -перехода. Выпрямляющие свойства p-n -перехода.

Полупроводниковый *p-n*- переход.

Полупроводниковым *p-n*- переходом называют тонкий слой, образующийся в месте контакта двух областей полупроводников акцепторного и донорного типов. Обе области полупроводника электрически нейтральны, поскольку как сам материал полупроводника, так и примеси электрически нейтральны. Отличия этих областей в том, что *p*-область содержит свободно перемещающиеся дырки, а *n*-область свободно перемещающиеся электроны.

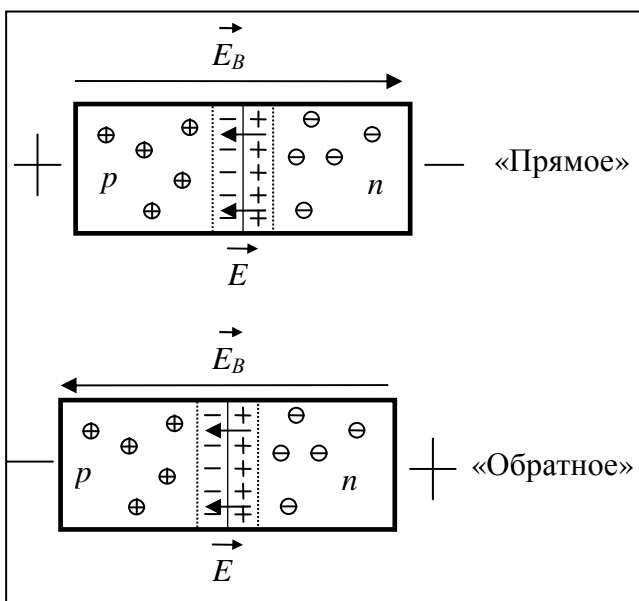


Концентрации свободных электронов и дырок по обе стороны от границы контакта разные, что приводит к появлению диффузии электронов из *n*-области в *p*-область, а дырок, наоборот, из *p*-области в *n*-область. Электроны, проникая в *p*-область рекомбинируют с дырками, а дырки в *n*-области рекомбинируют с электронами. Каждый из типов носителей переносит соответствующий электрический заряд, что приводит к тому, что вблизи границы раздела *p*-область получает избыточный отрицательный заряд, а *n*-область – положительный. Таким образом, на границе раздела полупроводников появляется двойной электрический слой, в котором вектор напряженности \vec{E} направлен от *n*-области к *p*-области. Поэтому появившееся электрическое поле препятствует движению электронов и дырок.

С этим электрическим полем можно связать потенциальную энергию дырки и электрона в соответствующих областях. Получается, что дырка для перехода из *p*-области в *n*-область должна «забраться» на потенциальный порог высоты W . На аналогичный порог должен «забраться» электрон для перехода из *n*-области в *p*-область. Вероятность такого прохода пропорциональна множителю Больцмана:

$$P = P_0 e^{-\frac{W}{kT}}$$

Следовательно, рассмотренные переходы основных носителей сформируют силу тока основных носителей через *p-n*-переход:



$$I_{OCH} = I_0 e^{-\frac{W}{kT}}$$

Неосновные носители – электроны в *p*-области и дырки в *n*-области свободно преодолевают контактное поле. В состоянии равновесия ток основных носителей будет компенсироваться током неосновных носителей. Поэтому

$$I_{HEOCH} = I_{OCH} = I_0 e^{-\frac{W}{kT}}$$

Если к *p-n*-переходу приложить внешнюю разность потенциалов U так, что со стороны *p*-области будет больший потенциал, (так называемое «прямое» включение *p-n*-перехода), то внешнее поле \vec{E}_B ослабит существующее внутреннее поле \vec{E} , поэтому ток основных носителей возрастет в соответствии с формулой:

$$I_{OCH} = I_0 e^{-\frac{(W-eU)}{kT}}$$

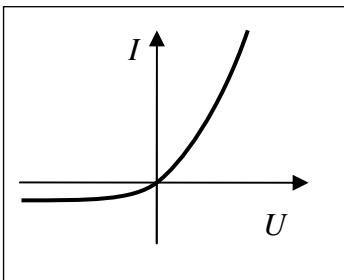
При включении $p-n$ -перехода в прямом направлении дырки в p -области будут двигаться к границе раздела, и электроны из n -области также будут двигаться к границе раздела. На границе они будут рекомбинировать. Ток на всех участках цепи обеспечивается основными носителями, сам $p-n$ -переход обогащен носителями тока. Проводимость $p-n$ -перехода будет большой. Ток неосновных носителей при этом практически не изменится, так как он определяется малым числом неосновных носителей в каждой области. Тогда суммарный ток через $p-n$ -переход равен сумме тока основных и неосновных носителей, направленных противоположно друг другу

$$I = I_{OCH} - I_{HEOCH} = I_0 e^{\frac{(W-eU)}{kT}} - I_0 e^{\frac{-W}{kT}} = I_0 e^{\frac{W}{kT}} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$

или

$$I = I_{HEOCH} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right).$$

Если к $p-n$ -переходу приложить внешнюю разность потенциалов «наоборот» (так называемое «обратное» включение $p-n$ -перехода), то внешнее поле \vec{E}_B

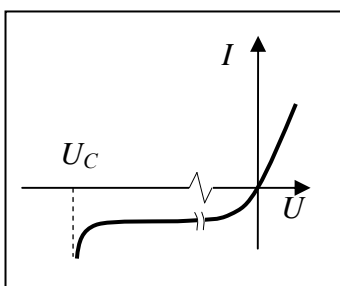


увеличит существующее на границе поле. Ток основных носителей от этого уменьшится. Ток неосновных носителей при этом практически не изменится, так как он лимитируется малым числом неосновных носителей. При включении $p-n$ -перехода в обратном направлении дырки в p -области будут двигаться от границы раздела, и электроны из n -области также будут двигаться от границы раздела. На границе раздела областей в итоге не останется основных носителей тока. Ток на этой границе будет обеспечиваться очень малым числом неосновных носителей, образовавшихся вблизи тонкого $p-n$ -перехода. Проводимость $p-n$ -перехода будет малой.

В этом смысле говорят, что $p-n$ -переход пропускает ток преимущественно в одном направлении. В прямом направлении сила тока основных носителей увеличивается с увеличением напряжения, в обратном направлении сила тока неосновных носителей при небольших значениях напряжения практически не изменяется.

Пробой $p-n$ -перехода.


Если продолжать увеличение напряжения обратной полярности, то при некотором напряжении U_C , называемом напряжением пробоя, произойдет *пробой* $p-n$ -перехода. Это связано с тем, что в закрытом состоянии $p-n$ -перехода почти все приложенное напряжение действует в



тонком пограничном слое. Поэтому в нем сформируется большая напряженность электрического поля, способная ускорить электрон на малом расстоянии до энергий достаточных для «выбивания» электрона из ковалентной связи; далее уже оба электрона будут ускорены, они выбьют еще электроны и так далее. Получится подобие электронной лавины, приводящей к пробоевому переходу. Пробою соответствует участок около U_C на вольтамперной характеристике. Этот участок вблизи U_C имеет участок плавного нарастания тока, что позволяет использовать явление пробоя, вернее предпробойное состояние для стабилизации напряжения.

Некоторые примеры применения $p-n$ -перехода в технике.

1) Выпрямление тока и детектирование сигналов. Для этих целей используют полупроводниковый диод, главная часть которого является $p-n$ -переходом.

Общее условное обозначение диода . Диодный выпрямитель или диодный мост - основной компонент блоков питания практически всех электронных устройств.

2) *Стабилизаторы напряжения.* Явление пробоя p - n -перехода используют для стабилизации напряжения. Стабилитроны на основе p - n -перехода изготавливаются промышленностью на разные напряжения стабилизации (пробоя) до сотен вольт.

3) *Светоиспускающие диоды.* Принцип работы светоиспускающих диодов - устройств, преобразующих энергию электрического тока в световую энергию, основан на испускании кванта электромагнитного излучения при рекомбинации дырок и электронов на границе раздела. Можно так подобрать ширины зон в полупроводнике, что будут испускаться кванты электромагнитного излучения требуемой частоты, а именно в диапазоне длин волн от инфракрасного до ультрафиолетового излучения. Светоиспускающие диоды обладают очень высоким КПД, достигающим 80%. Светоиспускающие диоды очень долговечны, так как не содержат нитей накаливания, катодов и других быстро изнашиваемых узлов, в отличие от, например, ламп накаливания или же газоразрядных ламп. Светоиспускающие диоды широко используют как миниатюрные экономичные источники света, излучающие в заданном частотном диапазоне, как заменитель сигнальных лампочек, а последнее время и как экономичные осветительные приборы.

4) *Лазерные светоиспускающие диоды.* Принцип действия лазерных светоиспускающих диодов аналогичен принципу работы светоиспускающих диодов, но с некоторыми отличиями. Инверсная населенность уровней формируется в области p - n -перехода вырожденных полупроводников, когда концентрация электронов с высокой энергией из n -области значительно превосходит концентрацию электронов с низкой энергией в p -области. В качестве зеркал лазерного резонатора используют отполированные торцы самого полупроводникового кристалла, одно из них делают частично прозрачным для выхода излучения из резонатора.

Лазерные диоды - очень миниатюрны (имеют размер порядка 1 см), экономичны, обеспечивают весьма сильный световой поток, достаточный для оплавления полимерных пленок при записи информации. Лазерные диоды используют в оптических устройствах записи и чтения информации, лазерных принтерах, системах передачи информации по стекловолоконным кабелям и т.д.

5) *Источники тока на p - n -переходе.* В настоящее время широко применяются источники тока на p - n -переходе как генераторы электрического тока, в которых источником энергии служит: либо энергия падающего на p - n -переход электромагнитного излучения - так называемые *полупроводниковые солнечные элементы*, или тепловая энергия, подводимая к p - n -переходу - так называемые *полупроводниковые тепловые элементы*.

Полупроводниковые солнечные элементы. Принцип работы полупроводниковых солнечных элементов основан на явлении внутреннего фотоэффекта при освещении p - n -перехода. Поглощенный в области p - n -перехода квант создаёт пару электрон - дырка, электрическое поле перемещает дырку в p -область, а электрон - в n -область. Поэтому при облучении p - n -перехода потоком квантов в p -области будут накапливаться дырки, а в n -области - электроны. Если солнечный элемент включить в замкнутую электрическую цепь, то потечет ток, который может быть использован.

Полупроводниковые солнечные элементы обычно получают в виде пластины полупроводника p -типа, на которую нанесен тонкий прозрачный слой металла, который можно считать полупроводником n -типа; затем на слой металла наносят прозрачные защитные покрытия. Световые кванты, пройдя эти покрытия и тонкий слой металла, поглощаются в области p - n -перехода. Ток «отводят» от полупроводниковой пластины и от тонкого металлического покрытия. Такой элемент обеспечивает напряжение порядка долей вольта и ток порядка нескольких миллиампер. Обычно элементы соединяют в батарею (солнечная батарея), используя последовательное и параллельное соединение элементов.

Полупроводниковые тепловые элементы. Принцип работы полупроводниковых тепловых элементов полностью аналогичен работе полупроводниковых солнечных элементов с тем отличием, что в области p - n -перехода пары электрон - дырка образуются за счет его нагрева. Полупроводниковые тепловые элементы обычно соединяют последовательно в батарее. При

этом p - n -переходы, нагреваемые каким либо источником тепла, оказываются с одной стороны конструкции, а p - n -переходы, охлаждаемые обычно водой или потоком воздуха, - с другой.

Полупроводниковые охладители. Принцип действия основан на поглощении энергии при образовании пары электрон-дырка. Полупроводниковые холодильники широко применяются в технике, когда надо создать миниатюрный легкий холодильник, например, в системах охлаждения датчиков инфракрасного излучения, полупроводниковых лазеров и т.д.

б) *Полупроводниковый транзистор.* Если соединить три области полупроводника с разными типами основных носителей, то возможно создание прибора способного усиливать сигналы, токи и напряжения, так называемого полупроводникового *транзистора*. В зависимости от того, как чередуются области, транзисторы бывают двух типов: p - n - p и n - p - n .

По сравнению с радиолампами транзисторы более компактны (сейчас транзисторы, входящие в состав микросхем, имеют размеры порядка микрометра, а одна микросхема содержит до 10^6 - 10^8 транзисторов). Транзисторы прочны (так как не содержат сеток и стеклянных деталей), долговечны (так как не содержат сильно нагретых деталей) и технологичны (транзисторы, входящие в состав микросхем, производят напылением и отжигом сразу по 10^5 - 10^8 и более штук).

К недостаткам полупроводниковых транзисторов и других полупроводниковых приборов следует отнести их чувствительность к перегреву и, особенно, радиации. Поэтому устройства, предназначенные для работы в условиях сильной радиации, до сих пор иногда конструируют, используя радиолампы.

В заключении отметим, что появление полупроводникового транзистора произвело самую большую техническую революцию в двадцатом веке, поскольку появилась возможность создавать компактные и надежные элементы компьютеров и другой электронной техники, без которых жизнь в наше время оказалась бы просто немыслимой. Важно заметить, что «родились» транзисторы в результате, казалось бы, очень далеких от практических нужд физических исследований характеристик полупроводников - веществ, которые плохо проводят электрический ток и потому, как тогда принято было считать, не найдут широкого применения.

Контакт металла и полупроводника

В современных полупроводниковых приборах помимо контактов с электронно-дырочным переходом применяются также контакты между металлом и полупроводником. Процессы в таких переходах зависят работы выхода электронов. Чем меньше работа выхода, тем больше электронов может выйти из данного тела. Рассмотрим процессы в различных металло-полупроводниковых переходах.

1) Если в контакте металла с полупроводником n -типа работа выхода электронов из металла A_M меньше, чем работа выхода из полупроводника A_P , то будет преобладать выход электронов из металла в полупроводник. Поэтому в слое полупроводника около границы накапливаются основные носители заряда (электроны). Сопротивление этого слоя будет малым при любой полярности приложенного напряжения, и, следовательно, такой переход не обладает выпрямляющими свойствами. Его называют *невыпрямляющим (омическим)* контактом.

Подобный же невыпрямляющий диод получается в контакте металла с полупроводником p -типа, если работа выхода электронов из полупроводника меньше, чем из металла. В этом случае из полупроводника в металл уходит больше электронов, чем в обратном направлении, и в приграничном слое полупроводника также образуется область, обогащенная основными носителями (дырками), имеющая малое сопротивление.

Оба типа невыпрямляющих контактов широко используются в полупроводниковых приборах при устройстве выводов от n - и p -областей. Для этой цели подбирают соответствующие металлы.

2) Если в контакте металла с полупроводником n -типа $A_P < A_M$, то электроны будут переходить главным образом из полупроводника в металл и в приграничном слое полупроводника образуется область, обедненная основными носителями, и поэтому имеющая большое сопротивление.

Здесь создается довольно высокий потенциальный барьер, высота которого будет существенно меняться в зависимости от полярности приложенного напряжения. Такой переход обладает выпрямляющими свойствами. Подобные переходы в свое время исследовал немецкий ученый В. Шотки и теперь барьеры в таких переходах именуется *барьерами Шотки*, а диоды с этим барьером - *диодами Шотки*. В диодах Шотки (в металле, куда приходят электроны из полупроводника) отсутствуют процессы накопления и рассасывания зарядов неосновных носителей, характерные для *p-n*-переходов. Поэтому диоды Шотки обладают значительно более высоким быстродействием, нежели обычные диоды, так как накопление и рассасывание зарядов - процессы инерционные, т. е. требуют времени.

Аналогичными свойствами обладает контакт металла с полупроводником *p*-типа при $A_M < A_P$.

Контакт двух проводников.

При контакте двух проводников (металлов) также может появиться контактная разность потенциалов, вызванная разностью энергий Ферми. В металлах это приводит к возникновению термодинамических явлений.

Термоэлектрические явления, совокупность физических явлений, обусловленных взаимосвязью между тепловыми и электрическими процессами в металлах (и полупроводниках). Термоэлектрическими явлениями являются эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона.

Эффект Зеебека состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, возникает ЭДС (термо-ЭДС), если места контактов поддерживают при разных температурах. В простейшем случае, когда электрическая цепь состоит из двух различных проводников, она называется термоэлементом, или *термопарой*. Величина термо-ЭДС зависит только от температур горячего T_2 и холодного T_1 контактов и от материала проводников. В небольшом интервале температур термо-ЭДС можно считать пропорциональной разности температур $\mathcal{E} = \alpha \cdot (T_2 - T_1)$. Коэффициент α называется *термоэлектрической способностью пары* (термосилой, коэффициентом термо-ЭДС, или удельной термо-ЭДС). Он определяется материалами проводников, но зависит также от интервала температур; в некоторых случаях с изменением температуры α меняет знак.

Качественно объяснить явление возникновения термо-ЭДС можно следующим образом. При контакте двух металлов с разной энергией Ферми $E_{1F} > E_{2F}$, электроны из области с большей энергией Ферми начнут переход в область с меньшей энергией до тех пор, пока энергия Ферми на границе не примет одинаковые значения. При этом электроны перенесут отрицательный электрический заряд, что вызовет появление электрического поля в области контакта, препятствующего движению электронов. Следовательно, в области контакта появится контактная разность потенциалов $U = \frac{E_{1F} - E_{2F}}{e}$. Концентрации свободных электронов по обе стороны от зоны контакта можно приближённо оценить через разность потенциалов соотношением

$n_2 = n_1 e^{-\frac{eU}{kT}}$, поэтому $U = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$. Рассматривая замкнутую цепь из двух проводников, контакты которых находятся при разных температурах T_1 и T_2 , получает суммарную термо-ЭДС цепи

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_2 - T_1).$$

Термопары применяют для измерения температуры. Батареи термопар используют как источники ЭДС для питания физических приборов.

Эффект Пельтье обратен явлению Зеебека в следующем смысле. При протекании тока в цепи из различных проводников, в местах их контактов, в дополнение к теплоте по закону Джоуля-Ленца, выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество теплоты Q , пропорциональное протекающему через контакт количеству электриче-

ства (то есть силе тока I и времени t): $Q = \Pi \cdot I \cdot t$. Коэффициент Пельтье Π зависит от природы находящихся в контакте материалов и температуры.

Причина возникновения явления Пельтье заключается в следующем. На контакте двух веществ имеется контактная разность потенциалов, которая создаёт внутреннее контактное поле. Если через контакт протекает электрический ток, то это поле будет либо способствовать прохождению тока, либо препятствовать. Если ток идёт против контактного поля, то внешний источник должен затратить дополнительную энергию, которая выделяется в контакте, что приведёт к его нагреву. Если же ток идёт по направлению контактного поля, то он может поддерживаться этим полем, которое и совершает работу по перемещению зарядов. Необходимая для этого энергия отбирается у вещества, что приводит к охлаждению его в месте контакта

Эффект Томсона - одно из термоэлектрических явлений, заключающееся в том, что в однородном неравномерно нагретом проводнике с постоянным током, дополнительно к теплоте, выделяемой в соответствии с законом Джоуля - Ленца, в объёме проводника будет выделяться или поглощаться дополнительная *теплота Томсона* в зависимости от направления тока. Количество теплоты Томсона пропорционально силе тока, времени и перепаду температур, зависит от направления тока.

Объяснение эффекта в первом приближении заключается в следующем. Если вдоль проводника, по которому протекает ток, существует градиент температуры, причём направление тока соответствует движению электронов от горячего конца к холодному, то при переходе из более горячего сечения в более холодное, электроны передают избыточную энергию окружающим атомам (выделяется теплота), а при обратном направлении тока, проходя из более холодного участка в более горячий, пополняют свою энергию за счёт окружающих атомов (теплота поглощается).

Таким образом, причина всех термодинамических явлений - нарушение теплового равновесия в потоке носителей (то есть отличие средней энергии электронов в потоке от энергии Ферми). Абсолютные значения всех термоэлектрических коэффициентов растут с уменьшением концентрации носителей; поэтому в полупроводниках они в десятки и сотни раз больше, чем в металлах и сплавах.