

ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Электроника – отрасль науки и техники, изучающая законы взаимодействия электронов и других заряженных частиц с электромагнитными полями и разрабатывающая методы создания электронных приборов, в которых это взаимодействие используется для преобразования электромагнитной энергии с целью передачи, обработки и хранения информации, автоматизации производственных процессов, создания аппаратуры, устройств и средств контроля, измерения и управления

Различают три основных направления электроники



С точки зрения применения электронных приборов и устройств в настоящее время наибольшее развитие и распространение получила техническая электроника: аналоговая и цифровая

Основные направления технической электроники



Информационная электроника составляет основу электронно-вычислительной и информационно-измерительной техники и устройств автоматики. На базе информационной электроники разрабатываются и изготавливаются электронные устройства получения, обработки, передачи, хранения и использования информации, устройства управления различными объектами и технологическими процессами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Электропроводность полупроводников

Полупроводниками называют материалы, удельное сопротивление которых при комнатной температуре (25 – 27 0С) находится в пределах от 10^{-5} до 10^{10} Ом·см и занимающими промежуточное положение между металлами и диэлектриками (металлы ток пропускают, диэлектрики – нет). Сейчас известно

множество полупроводников, их больше, чем металлов и диэлектриков.

Наиболее известны из полупроводников Si, Ge, Se, GaS – арсенид галлия.

Существенным свойством полупроводника является возможность в широких пределах изменять свою проводимость под действием температуры, облучения и введения примесей.

Удовлетворительное объяснение этому явлению дает теория электропроводности, согласно которой атом вещества состоит из ядра, окруженного облаком электронов. Электроны находятся в движении на некотором расстоянии от ядра в пределах слоев (оболочек), определяемых их энергией. Каждому из этих слоев можно поставить в соответствие определенный *энергетический уровень* электрона, причем чем дальше электрон находится от ядра, тем выше его энергетический уровень. Совокупность уровней образует *энергетический спектр*. Если электрон переходит с одного энергетического уровня на другой, то происходит либо выделение, либо поглощение энергии, причем это делается порциями – *квантами*.

В структуре атомов можно выделить оболочки, которые полностью заняты электронами (внутренние оболочки) и незаполненные оболочки (внешние). Электроны внешних оболочек слабее связаны с ядром и легче вступают во взаимодействие с другими атомами. Электроны внешних оболочек называют *валентными*.

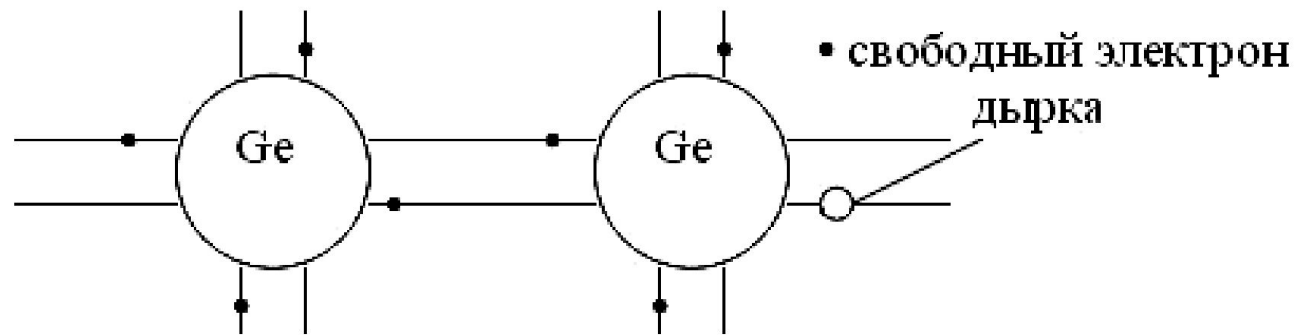
Для полупроводниковых материалов характерно кристаллическое строение, при котором между атомами возникают так называемые *ковалентные связи* за счет «присвоения» соседних валентных электронов.

В соответствии с зонной теорией по отношению к энергетическим состояниям (уровням) электронов различают *валентную* зону, *запрещенную* зону, *зону проводимости*. В такой интерпретации можно более определенно разделить все вещества на три большие группы: металлы, полупроводники, диэлектрики



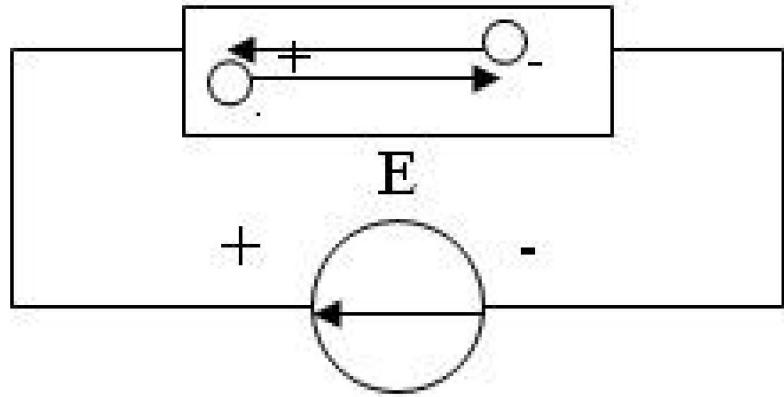
У полупроводников при некотором значении температуры часть электронов приобретает энергию тепла и оказывается в зоне проводимости. Эти электроны «делают» полупроводник электропроводным. Если электрон «покидает» валентную зону, то образуется свободный энергетический уровень, как бы вакантное место (состояние), которое назвали «дыркой». Валентные электроны соседних атомов могут переходить на эти свободные уровни, при этом создают дырки в других атомах. Такое перемещение электронов рассматривается как движение *положительных зарядов* – «дырок». Соответственно электропроводность, обусловленная движением электронов называется *электронной*, а движением дырок – *дырочной*. У абсолютно чистого и однородного вещества свободные электроны и дырки образуются попарно.

Процесс образования положительных и отрицательных зарядов в теле полупроводника можно представить следующим образом. Например, фотон выбивает электрон с его энергетического уровня, электрон становится свободным, а атом приобретает положительный заряд (становится положительно заряженным ионом). Процесс образования пары электрон – «дырка» называют *генерацией* зарядов, обратный процесс – *рекомбинацией*



Движение зарядов, обусловленное тепловой энергией, называют *диффузией*. Средний промежуток времени между генерацией и рекомбинацией характеризует так называемое время жизни носителей заряда, а расстояние, которое успевает преодолеть заряд за это время, называется *диффузионной длиной*. Эти характеристики используются для сравнения различных полупроводниковых (ПП) веществ между собой.

Собственная электропроводность полупроводников. Приложим к образцу ПП вещества электроды источника постоянного тока, т.е. создадим в нём электрическое поле с напряженностью E . В этом случае по законам электродинамики электроны и дырки должны перемещаться. Возникнут два встречно направленных потока движения носителей зарядов, в цепи потечет ток, носящий название *ток дрейфа (дрейфовый ток)*



Возникновение тока в полупроводнике

Плотности токов определяются следующим образом:

$$j_n = q_n \cdot n \cdot \mu_n \cdot E; \quad j_p = q_p \cdot p \cdot \mu_p \cdot E,$$

где j_n, j_p – плотности токов, созданных соответственно электронами и дырками;

q_n, q_p – заряды электрона и дырки; $q_n = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

n, p – удельная концентрация зарядов (количество в единице объема);

μ_n, μ_p – подвижность зарядов, т.е. средняя скорость зарядов под действием электрического поля с напряжённостью поля $E = 1$ В/см.

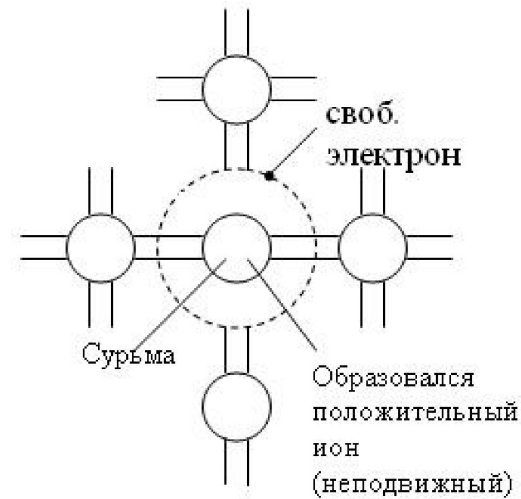
Результирующая плотность дрейфового тока:

$$j_{\text{дрейф}} = E(q_n \cdot n \cdot \mu_n + q_p \cdot p \cdot \mu_p),$$

а удельная электропроводность полупроводника:

$$\sigma = j_{\text{дрейф}} / E = q_n \cdot n \cdot \mu_n + q_p \cdot p \cdot \mu_p.$$

Примесная электропроводность полупроводника. Известно, что электропроводность полупроводника зависит от наличия примесей, которые могут быть двух видов: акцепторные и донорные. В структуре вещества примесные атомы «замещают» основные атомы кристаллической решетки, образуя ковалентные связи. Однако, если валентности основного материала и примесного разные, то могут быть два случая



Электрические переходы

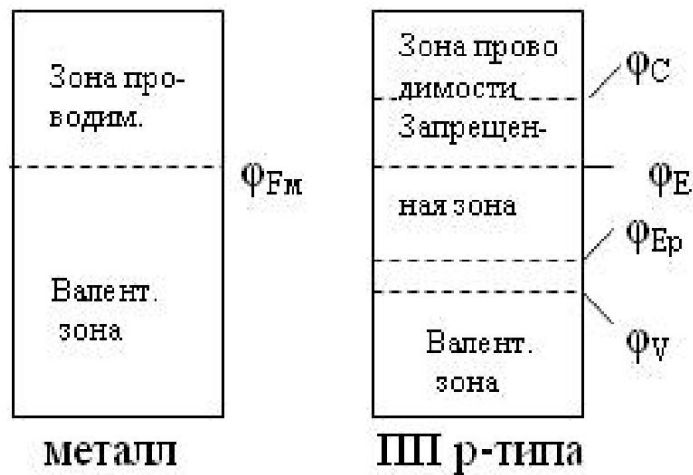
Электрический переход – это граничный слой между двумя областями материалов, физические характеристики которых различаются.

Переходы могут быть: электронно-дырочные ($p-n$ -переходы); электронно-электронные (n^+-n -переходы); дырочно-дырочные (p^+-p -переходы). Знак (+) показывает, что одна область перехода имеет повышенную концентрацию соответствующих носителей.

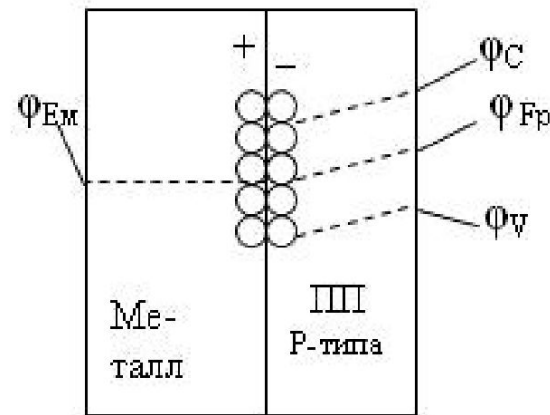
Широко используются *гетеропереходы*, в которых полупроводниковые материалы (от греч. heteros – другой) имеют различную ширину запрещенной зоны, а также ($p-i$, $n-i$, $p-i-n$)-переходы, в которых в одной области проводимость собственная, в другой – примесная.

Переходы металл-полупроводник. Свойства этих переходов играют важную роль в электронных приборах, так как электрические выводы от полупроводниковой части микросхем выполняются металлическими проводниками, которые должны допускать хотя бы кратковременное воздействие на них высоких температур при пайке. Электрические переходы образуются не механическим соединением, а по специальным технологиям.

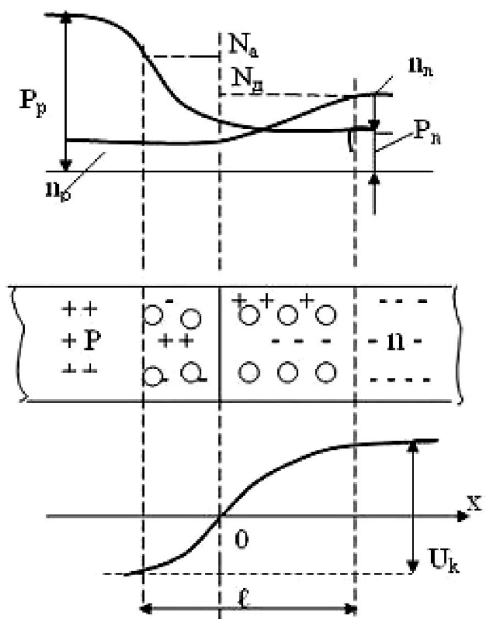
Исходное состояние



Зонная диаграмма перехода



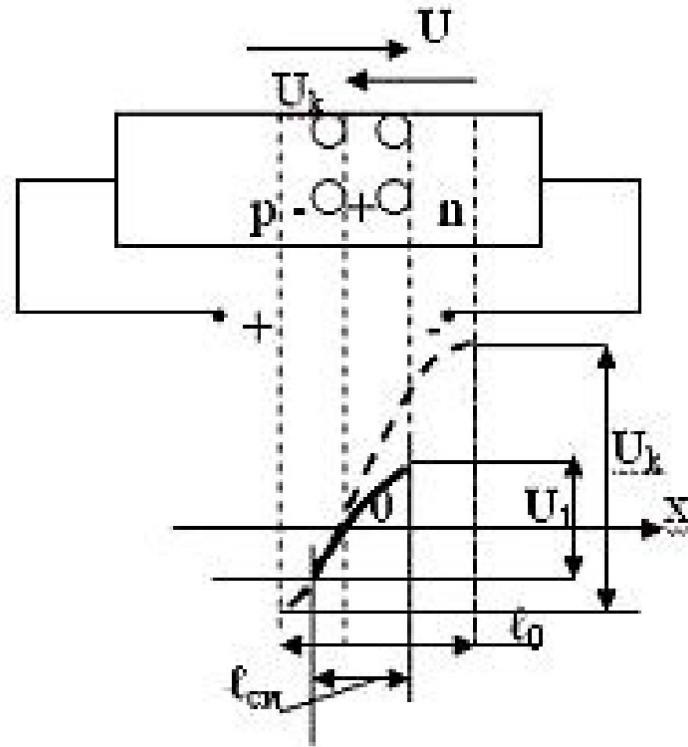
p-n-переход. *p-n-переход* – это переход между двумя областями полупроводника, имеющими различный тип проводимости. Если концентрации зарядов одинаковы ($p_p \sim n_n$), то переход называется симметричным. Обычно $n_n \gg p_p$ или $p_p \gg n_n$ (в 100 – 1000 раз) – такие переходы несимметричны.



p-n-переход без внешнего электрического поля

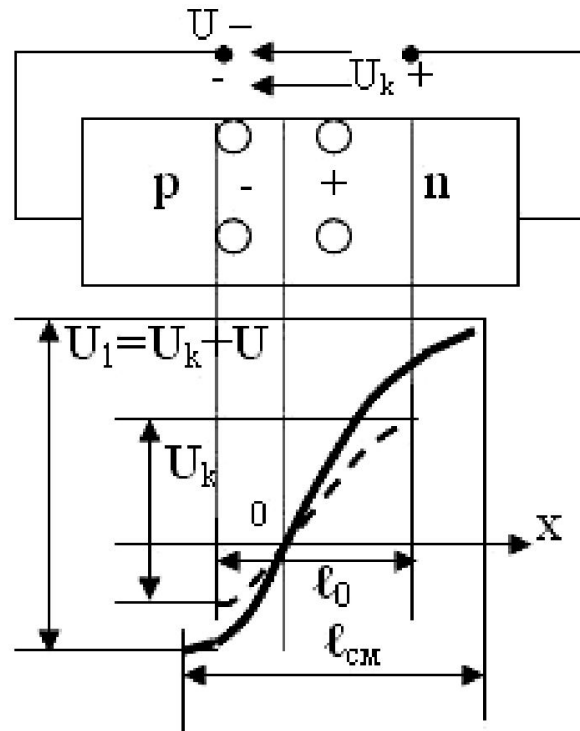
Смещение p - n -перехода

Смещением p - n -перехода называют подачу на переход напряжения постоянного тока. Если «+» источника приложить к области p , а «-» к области n (непосредственно или через другие элементы), то считается, что на переход подано *прямое смещение*. В этом случае потенциальный барьер уменьшится и станет равным $U_I = U_k - U$. Условный исходный размер p - n -перехода l_0 уменьшится вместе с уменьшением потенциального барьера ($U_I < U_k$).



p - n -переход при прямом смещении

Обратное смещение p - n -перехода. Приложим «+» к n -области, а «-» к p -области полупроводника, т.е. обеспечим обратное смещение на p - n -переходе. Теперь потенциальный барьер увеличится ($U_1 = U_k + U$), движение основных зарядов будет затруднено. Ток через переход будет обусловлен неосновными носителями зарядов, которые «вытягиваются» из областей полем обратной полярности. Этот процесс называется «экстракцией». В результате через обратносмещённый переход будет протекать малый *обратный ток*.



p - n -переход при обратном смещении

Емкость p – n -перехода

Различают две составляющих емкости:

барьерную, отражающую перераспределение зарядов в p – n -переходе, *диффузионную*, отражающую перераспределение зарядов вблизи p – n перехода. При прямом смещении проявляется в основном диффузионная емкость $C_{диф}$.

При обратном смещении большую роль играет барьерная емкость $C_{бар}$

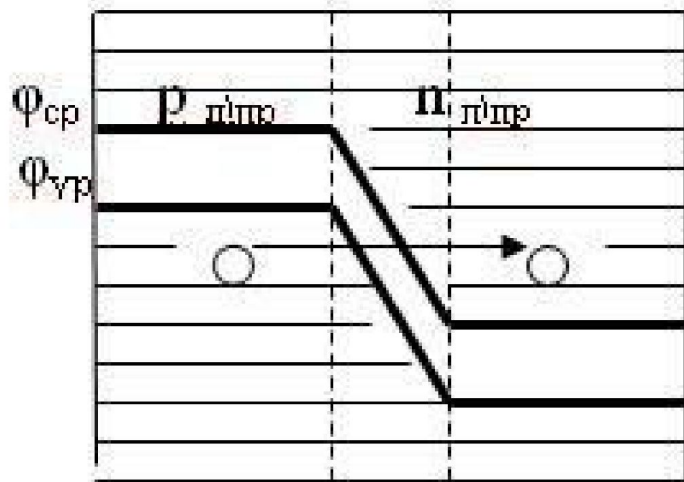
Емкость $C_{бар}$ обусловлена наличием в p – n -переходе ионов донорной и акцепторной примесей, как бы образующих две обкладки конденсатора:

$$C_{бар} = \left(\varepsilon \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{l_{см}} \right) \cdot n \sqrt{\frac{U_k}{U_k + |U|}},$$

Пробой p - n -перехода

Пробоем называется значительное уменьшение сопротивления перехода при обратном смещении, сопровождающееся возрастанием обратного тока. Различают три вида пробоя: туннельный, лавинный и тепловой.

Туннельный пробой обусловлен туннельным эффектом, т.е. прохождением электронов сквозь потенциальный барьер (из валентной зоны одного полупроводника в зону проводимости другого), высота которого больше, чем энергия носителей заряда



Зонные диаграммы
при туннельном пробое

Лавинный пробой вызывается ударной ионизацией, когда напряженность электрического поля при обратном смещении так велика, что неосновные носители заряда, движущиеся через $p-n$ -переход, ускоряются настолько, что при соударении с атомами ионизируют их.

Появляются пары электрон-дырка, которые ускоряются и ионизируют другие атомы. Процесс нарастает лавинообразно, при этом величина тока ограничивается только внешним сопротивлением.

Тепловой пробой возникает в результате разогрева $p-n$ -перехода, когда количество тепла, выделяемое током в $p-n$ -переходе, больше количества тепла, отводимого от него. Известно, что увеличение температуры приводит к увеличению интенсивности генерации электронно-дырочных пар, что выражается в увеличении обратного тока по экспоненциальному закону.

Это в свою очередь увеличивает температуру $p-n$ -перехода, в результате чего наступает тепловой пробой.