

ЛЕКЦИЯ 12

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Контакт металл – полупроводник.
2. Контакт электронного и дырочного полупроводников (*p-n*-переход).
3. Вольт – амперная характеристика *p-n*-перехода.
4. Полупроводниковые биполярные транзисторы (**самостоятельно изучить**)

Полупроводниковые кристаллы играют важную роль в современной электронике. Но: широко используются не сами полупроводники, а неоднородные структуры, выполненные с использованием полупроводников.

Это структуры, содержащие границы раздела:

- *металл – полупроводник*;
- *полупроводник – диэлектрик – металл* (не будем рассматривать);
- *полупроводник – полупроводник*.

В последней структуре чаще всего используется граница раздела между полупроводниками с различным типом проводимости. Это электронно-дырочный переход или *p-n*-переход.

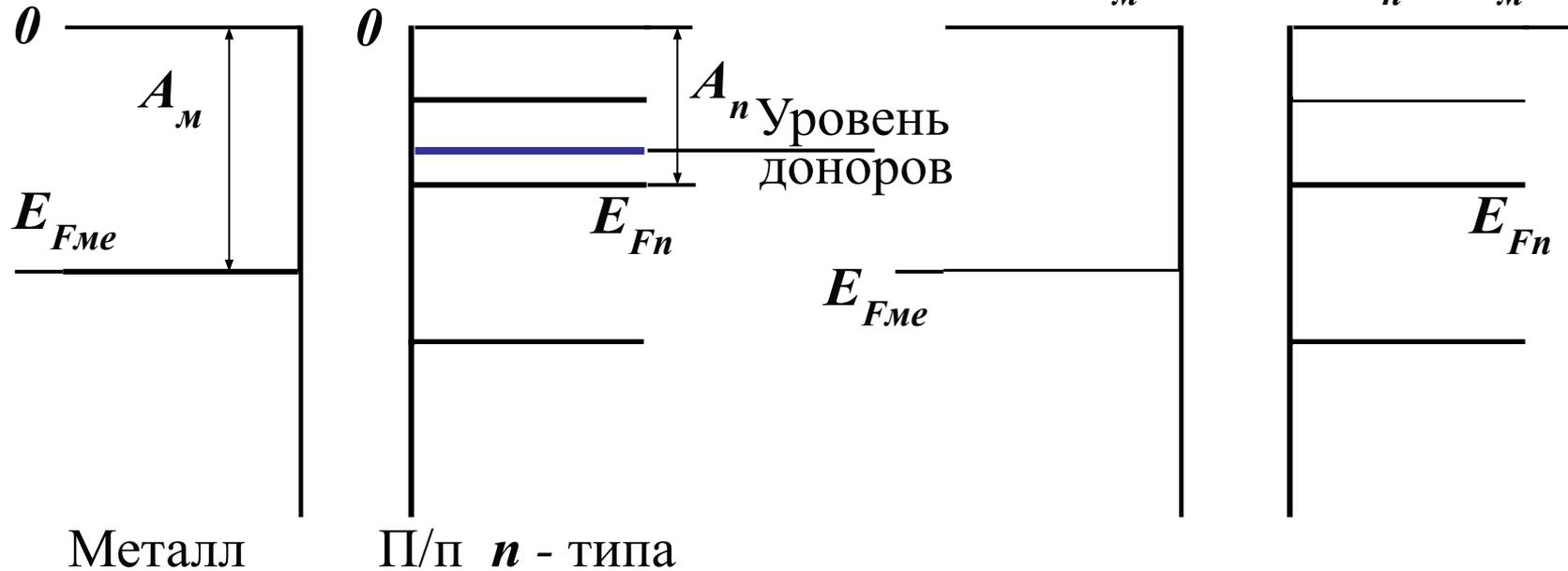
p-n-переход – наиболее типичная и наиболее широко используемая полупроводниковая структура.

p-n-переход применяется для изготовления дискретных полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и т.д.) и интегральных микросхем (ИМС). В ИМС на одном кристалле формируется множество микроминиатюрных схемных элементов: резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов.

Чаще всего эти элементы выполняются на основе того же *p-n*-перехода.

Контакт металл - полупроводник.

Рассмотрим контакт полупроводника (n -типа) и металла в предположении, что работа выхода электрона из полупроводника A_n меньше работы выхода электрона из металла A_m , то есть $A_n < A_m$.



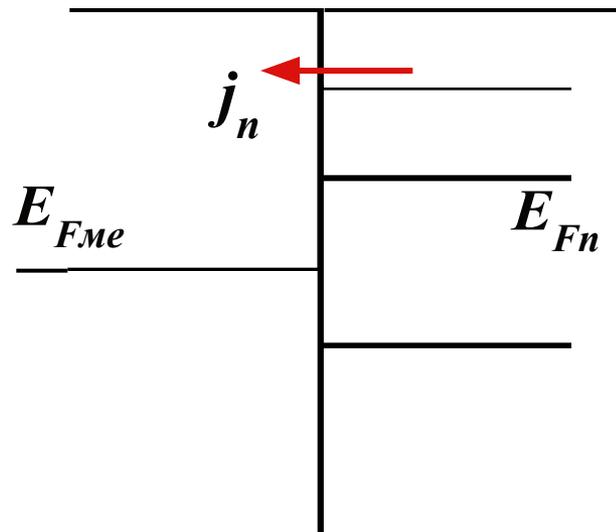
E_{Fme} – энергия уровня Ферми в металле.

E_{Fn} – энергия уровня Ферми в полупроводнике.

Обеспечим идеальный контакт металла и полупроводника, рассмотрим процессы в приграничной к контакту области.

Контакт металл - полупроводник.

Электроны будут переходить преимущественно из полупроводника в металл (уровень Ферми в полупроводнике в момент соединения с металлом лежит выше, чем в металле, $E_{Fme} > E_{Fn}$).



Избыточный перенос продолжается до полного выравнивания уровней Ферми. После этого в области контакта у *n*-полупроводника возникает слой, обедненный электронами. Этот слой заряжается положительно и обладает большим электрическим сопротивлением.

Металл заряжается отрицательно.

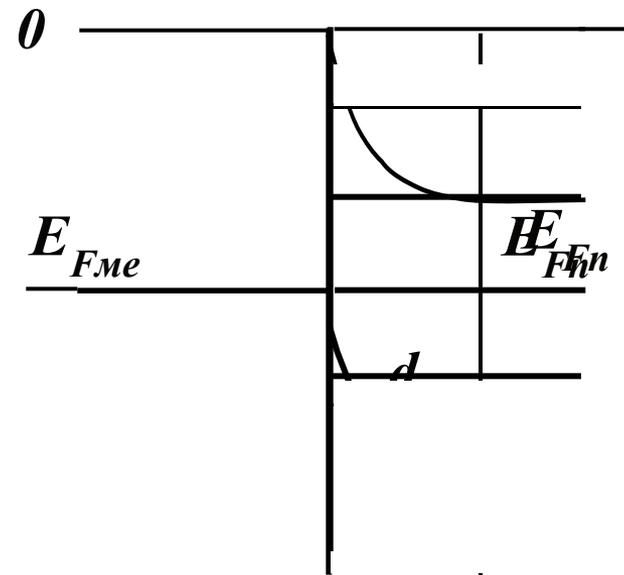
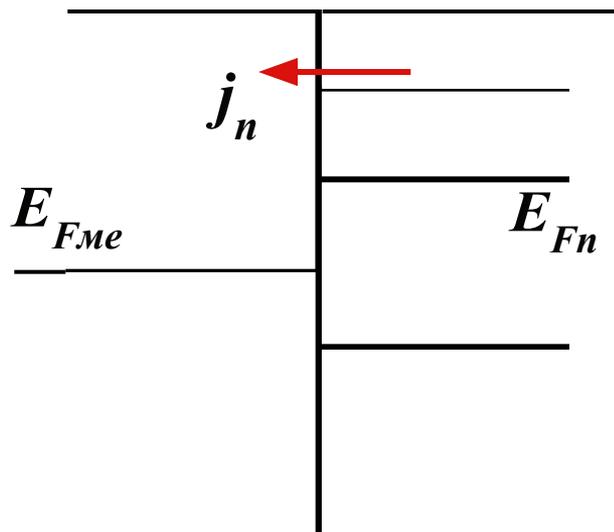
В итоге на контакте образуется слой протяженностью d , поле которого препятствует дальнейшему переходу электронов.

Контакт металл - полупроводник.

Из-за малой концентрации электронов проводимости в полупроводнике (около 10^{15} см^{-3} в сравнении с $10^{22} \text{ в см}^{-3}$ в металлах) толщина контактного слоя d в полупроводнике $\sim 10^{-6} \text{ см}$, т.е. примерно в 10 000 раз больше, чем в металле.

Контактный слой обеднен электронами в зоне проводимости, его сопротивление большое. Такой контактный слой называется *запирающим*.

Действие контактного поля слоя сводится к параллельному искривлению всех энергетических уровней полупроводника в области контакта.



Контакт металл - полупроводник.

Возможны еще 3 случая контакта металла с примесными полупроводниками:

а). $A_n > A_m$, полупроводник n – типа. При контакте электроны из металла переходят в полупроводник и образуют в контактном слое полупроводника отрицательный объемный заряд.

Контактный слой полупроводника приобретает повышенную проводимость (не является запирающим).

б). $A_m > A_p$, полупроводник p – типа. В контактном слое полупроводника наблюдается избыток основных носителей тока – дырок в валентной зоне. Контактный слой полупроводника обладает повышенной проводимостью.

в). $A_m < A_p$, полупроводник p – типа. В контактном слое полупроводника недостаток основных носителей тока – дырок в валентной зоне. Контактный слой полупроводника обладает запирающим действием.

Таким образом, запирающий контактный слой возникает при контакте **донорного** полупроводника с меньшей работой выхода, чем у металла (первый случай), и у **акцепторного** – с большей работой выхода, чем у металла (случай в).

Контакт металл - полупроводник.

Запирающий контактный слой обладает *односторонней (вентильной)* проводимостью.

При приложении к контакту внешнего электрического поля он пропускает ток практически только в одном направлении: либо из металла в полупроводник, либо из полупроводника в металл.

Если направления внешнего и контактного полей противоположны, то основные носители тока втягиваются в контактный слой из объема полупроводника. Толщина слоя и его сопротивление уменьшаются.

Это направление называется *пропускным*, электрический ток может проходить через контакт металл - полупроводник.

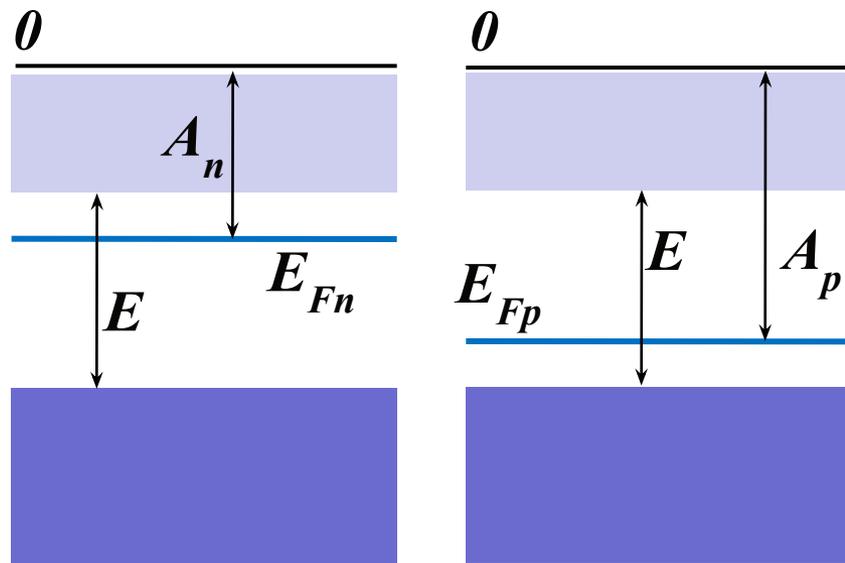
Если внешнее электрическое поле совпадает по направлению с контактным, толщина обедненного слоя и его сопротивление возрастают. Ток через контакт отсутствует. Это *запорное* направление.

Применение односторонней проводимости контактов металл – полупроводник – для выпрямления переменного тока.

Контакт электронного и дырочного полупроводников (*p-n*-переход).

Рассмотрим контакт примесных полупроводников *p*- и *n*- типа, полученных из одного и того же собственного полупроводника за счет введения донорных и акцепторных примесей

Ситуация 1. Полупроводники не приведены в состояние контакта.



E_{Fn} - энергия уровня Ферми донорного полупроводника.

E_{Fp} - энергия уровня Ферми акцепторного полупроводника.

A_n - работа выхода донорного полупроводника.

A_p - работа выхода акцепторного

полупроводника.

E - энергия активации собственного

полупроводника.

Контакт электронного и дырочного полупроводников (*p-n*-переход).

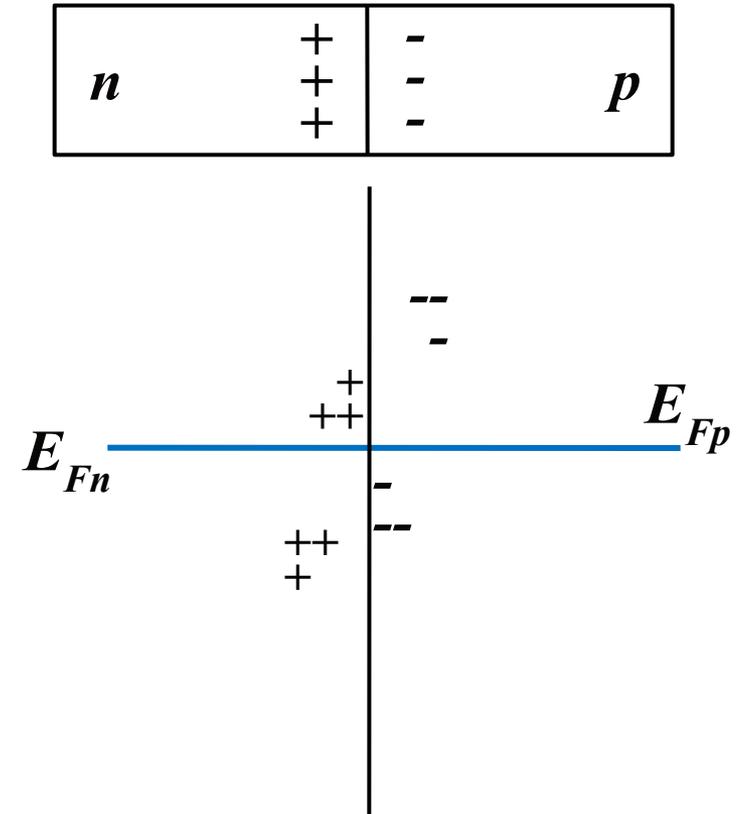
При контакте полупроводников происходит переход электронов из *n*-полупроводника в *p*-полупроводник, а дырок — в обратном направлении.

Процесс заканчивается, когда уровни Ферми в обоих полупроводниках выравниваются.

В *n*-полупроводнике из-за ухода электронов вблизи границы остается нескомпенсированный положительный объемный заряд неподвижных ионизованных донорных атомов.

В *p*-полупроводнике из-за ухода дырок вблизи границы образуется отрицательный объемный заряд неподвижных ионизованных акцепторов.

Ситуация 2. Полупроводники приведены в состояние контакта.



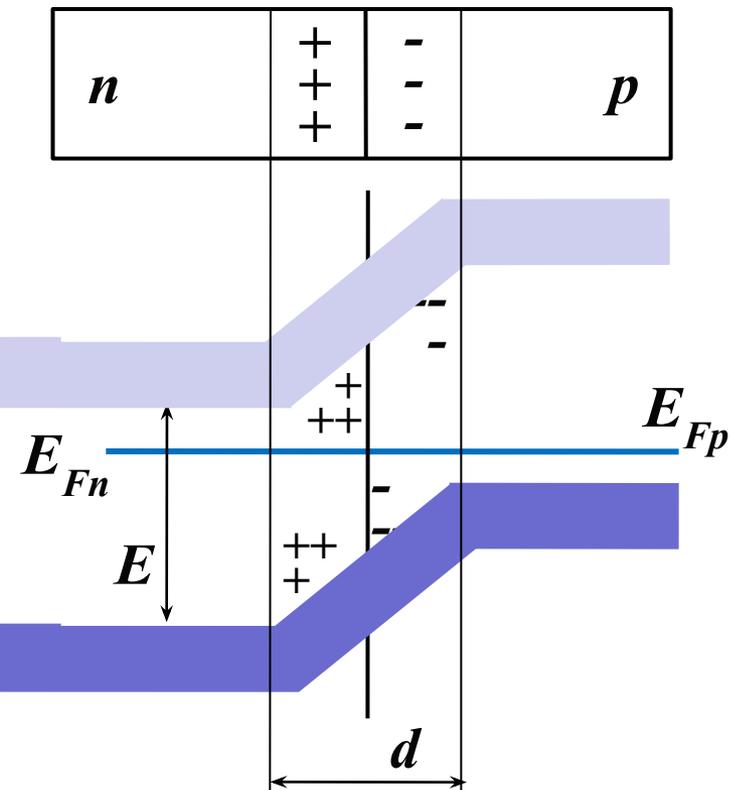
Контакт электронного и дырочного полупроводников (*p-n*-переход).

При наступлении равновесного состояния в области *p-n*-перехода происходит искривление энергетических зон, возникают энергетические барьеры как для электронов, так и для дырок.

Высота потенциального барьера $e\phi$ определяется первоначальной разностью положений уровня Ферми в обоих полупроводниках.

Все энергетические уровни *p*-полупроводника оказываются поднятыми относительно уровней *n*-полупроводника. Подъем происходит на толщине двойного слоя d .

Толщина d двойного слоя в полупроводниках составляет примерно $10^{-6} - 10^{-7}$ м, контактная разность потенциалов - десятые доли вольта.

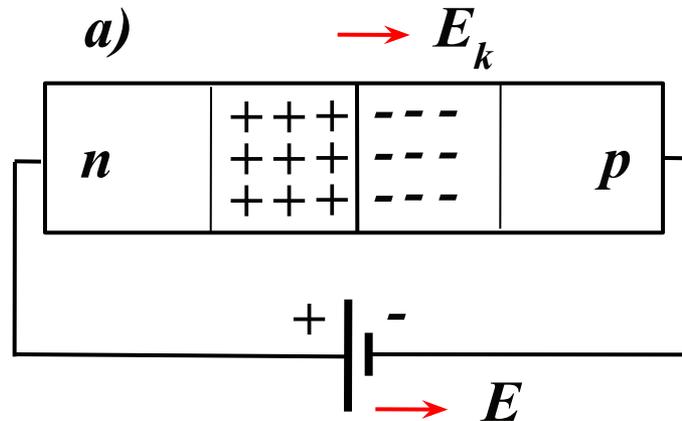


Вольт – амперная характеристика p - n -перехода.

Контактный слой сильно обеднен носителями тока. В связи с этим его удельное электрическое сопротивление много больше остальной части полупроводника.

Электрическое сопротивление слоя можно изменить с помощью внешнего поля.

Схема а). Приложенное к p - n -переходу внешнее электрическое поле направлено от n -полупроводника к p -полупроводнику, т.е. совпадает с полем контактного слоя.



Это поле вызывает направленное движение электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике от границы p - n -перехода в противоположные стороны.

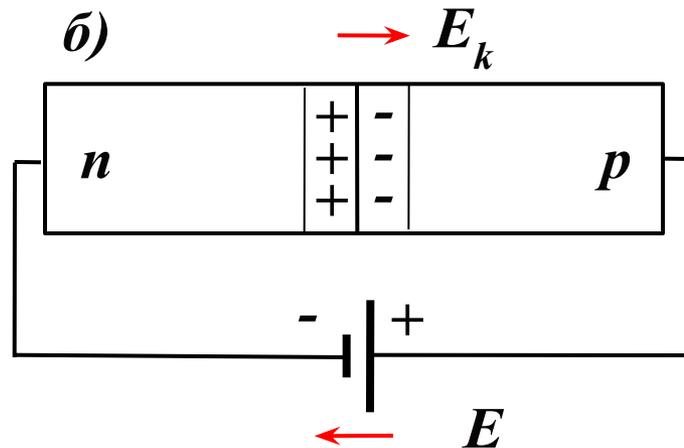
Запирающий слой расширяется, его сопротивление возрастает. Направление внешнего поля, расширяющего слой, называется *запирающим (обратным)*.

Вольт – амперная характеристика p - n -перехода.

Схема б). Приложенное к p - n -переходу внешнее электрическое поле направлено от p -полупроводника к n -полупроводнику, т.е. противоположно полю контактного слоя.

Это поле вызывает направленное движение электронов в n -полупроводнике и дырок в p -полупроводнике к границе p - n -перехода навстречу друг к другу.

В этой области они рекомбинируют, толщина контактного слоя и его сопротивление уменьшаются.



Электрический ток проходит через p - n -переход в направлении от p -полупроводника к n -полупроводнику.

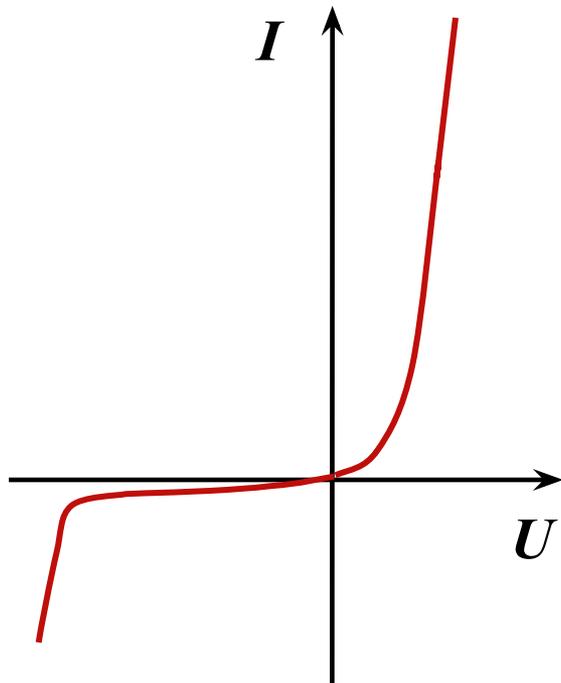
Такое направление течения тока называется *пропускным (прямым)*.

Таким образом, p - n -переход, как и контактный слой металл – полупроводник, обладает *односторонней (вентильной) проводимостью*.

Вольт – амперная характеристика p - n -перехода.

Вольт-амперная характеристика p - n -перехода – это зависимость электрического тока через p - n -переход от приложенного напряжения (рисунок).

Характеристика содержит две ветви: при $U > 0$ это круто растущая ветвь, при $U < 0$ – слабая зависимость тока через p - n -переход от приложенного напряжения.



Как уже было показано, при прямом напряжении внешнее электрическое поле способствует движению носителей тока к границе p - n -перехода.

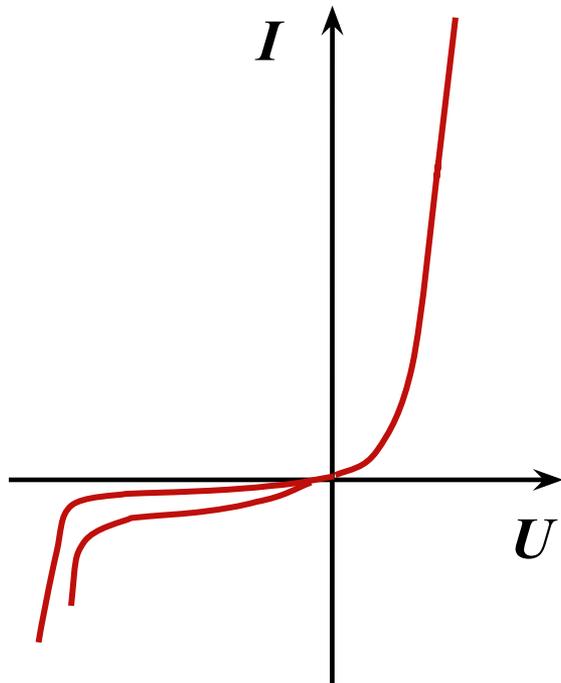
Толщина контактного слоя уменьшается, снижается и сопротивление перехода, причем тем сильнее, чем больше напряжение.

Сила тока становится большой. Это направление тока называется **прямым** (правая ветвь вольт-амперной характеристики).

Вольт – амперная характеристика p - n -перехода.

При запирающем (обратном) напряжении внешнее электрическое поле препятствует движению носителей тока к границе p - n -перехода. Толщина контактного слоя увеличивается, возрастает сопротивление перехода.

Через p - n -переход протекает небольшой по величине ток (левая ветвь вольт-амперной характеристики).



Быстрое нарастание тока означает пробой контактного слоя и его разрушение. p - n -перехода.

При включении в цепь переменного тока p - n -переходы действуют как выпрямители.

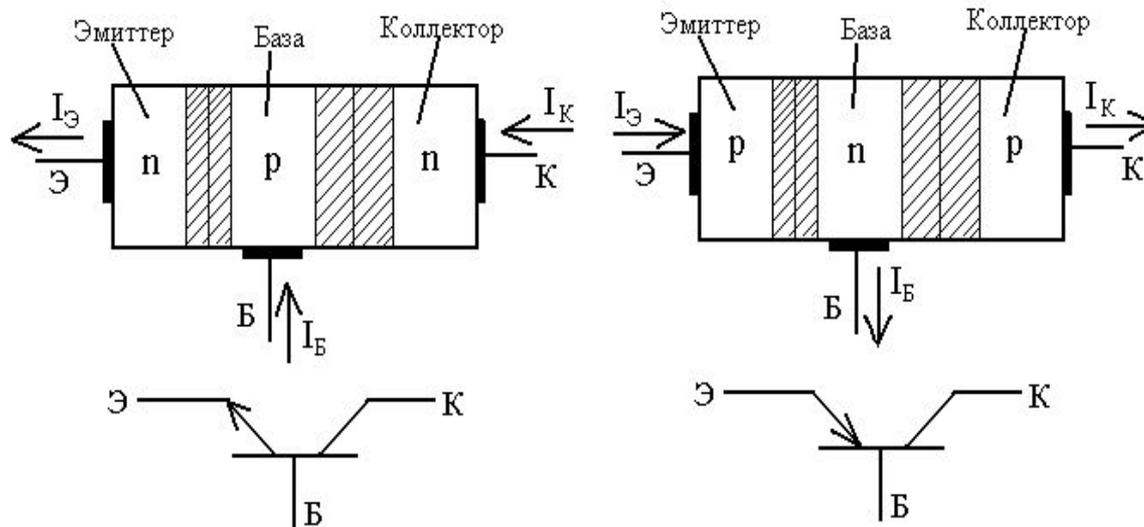
При увеличении температуры ток насыщения возрастает (пунктирная кривая).

В области высоких температур p - и n -примесные части кристалла становятся собственными и эффект выпрямления исчезает.

Полупроводниковые биполярные транзисторы (самостоятельно).

Биполярным транзистором (БТ) называется трехэлектродный полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими p - n переходами. Транзистор предназначен для усиления электрических колебаний по току, напряжению или мощности.

Слово “биполярный” означает, что физические процессы в БТ определяются движением носителей заряда обоих знаков (электронов и дырок). Два p - n -перехода образуются в результате чередования областей с разным типом электропроводности.



В зависимости от порядка чередования различают транзисторы типа n - p - n и типа p - n - p .