

Электрические переходы

- *Электрическим переходом* в полупроводнике называется граничный слой между двумя областями, физические характеристики которых имеют существенные физические различия.

- Различают следующие виды электрических переходов:
- *электронно-дырочный*, или *p–n-переход* – переход между двумя областями полупроводника, имеющими разный тип электропроводности;
- *переход металл – полупроводник* - переходы между двумя областями, если одна из них является металлом, а другая полупроводником *p*- или *n*-типа;
- переходы между двумя областями с одним типом электропроводности, отличающиеся значением концентрации примесей;
- переходы между двумя полупроводниковыми материалами с различной шириной запрещенной зоны (*гетеропереходы*).

Электронно-дырочный переход

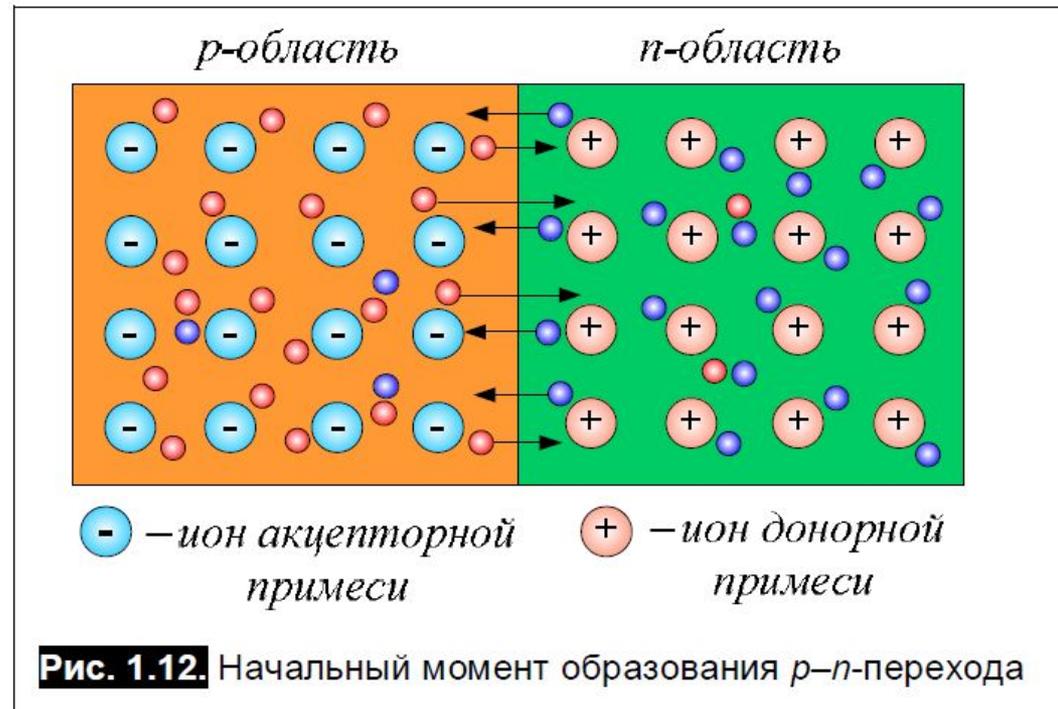
- Граница между двумя областями монокристалла полупроводника, одна из которых имеет электропроводность типа p , а другая – типа n называется электронно-дырочным переходом (n - p переходом) .
- Концентрации основных носителей заряда в областях p и n могут быть равными или существенно отличаться.

- p – n -переход, у которого концентрации дырок и электронов практически равны $N_{\text{акц}} = N_{\text{дон}}$, называют *симметричным*.
- Если концентрации основных носителей заряда различны ($N_{\text{акц}} \gg N_{\text{дон}}$ или $N_{\text{акц}} \ll N_{\text{дон}}$) и отличаются в 100...1000 раз, то такие переходы называют *несимметричными*.
- Несимметричные p – n -переходы используются шире, чем симметричные.

Несимметричный p – n -переход

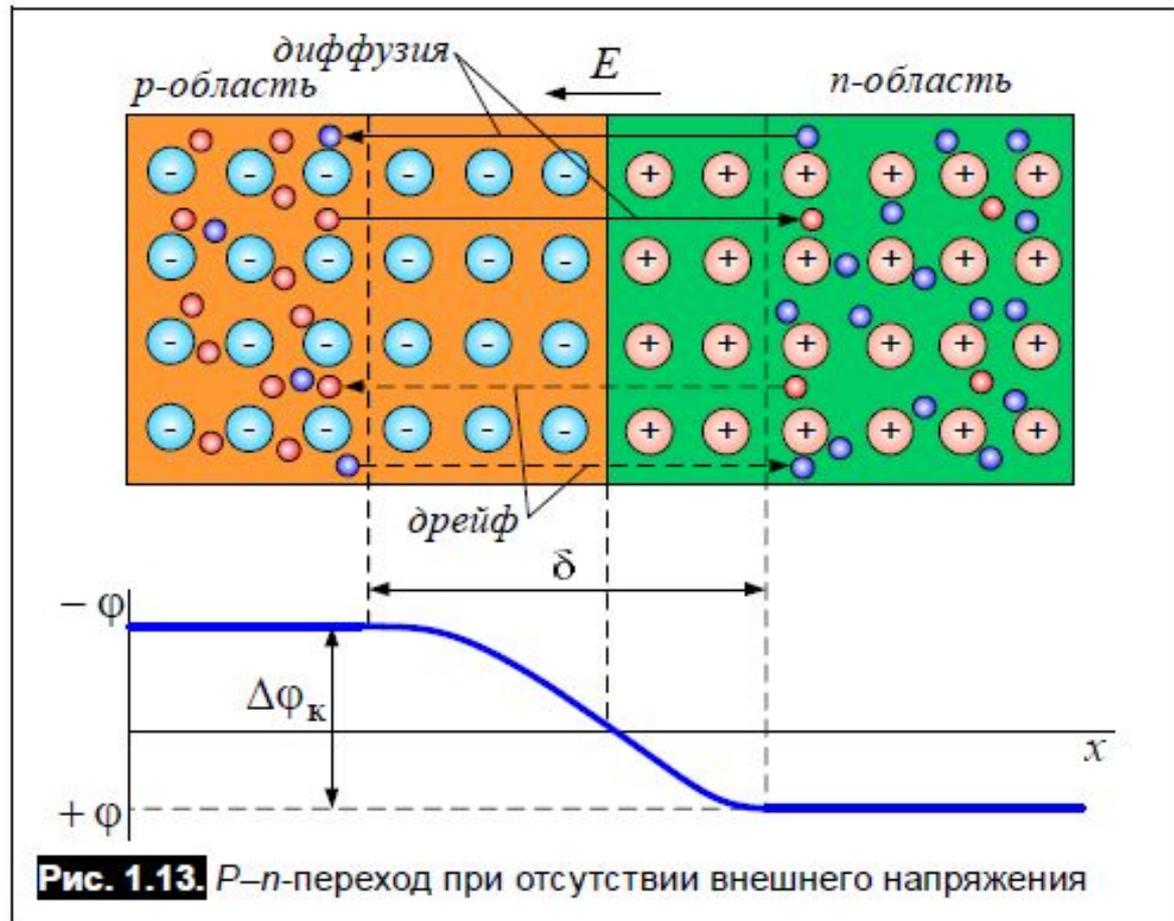
- Каждой дырке в области p соответствует отрицательно неподвижный заряженный ион акцепторной примеси,

в области n каждому свободному электрону соответствует положительно заряженный ион донорной примеси, весь монокристалл остается электрически нейтральным.



- Свободные носители электрических зарядов **под действием градиента концентрации** начинают перемещаться из мест с большой концентрацией в места с меньшей концентрацией.

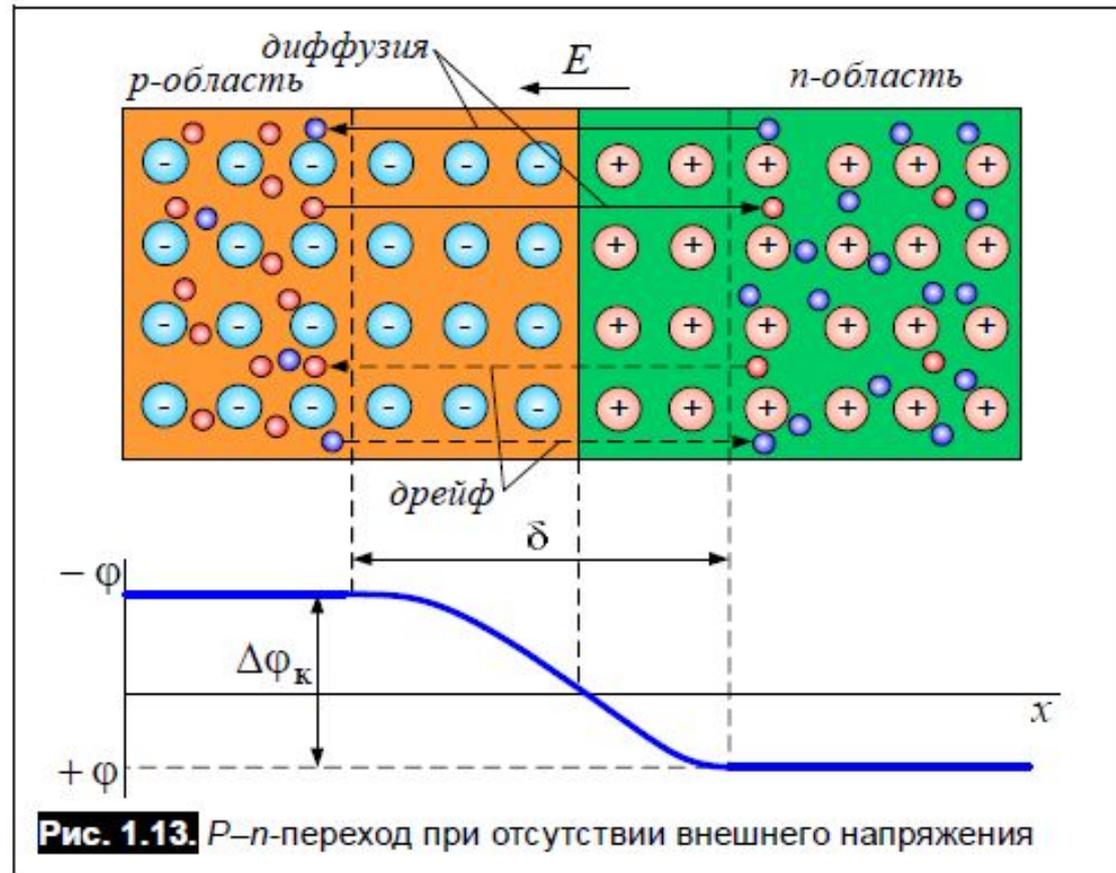
Это направленное навстречу друг другу перемещение электрических зарядов образует **диффузионный ток** p - n -перехода $I_{\text{диф}} = I_{\text{осн}}$.



- Как только дырка из области p перейдет в область n , она оказывается в окружении электронов, являющихся основными носителями электрических зарядов в области n .
- Велика вероятность того, что какой-либо электрон заполнит свободный уровень в дырке и произойдет явление рекомбинации, в результате которой останется электрически нейтральный атом полупроводника.

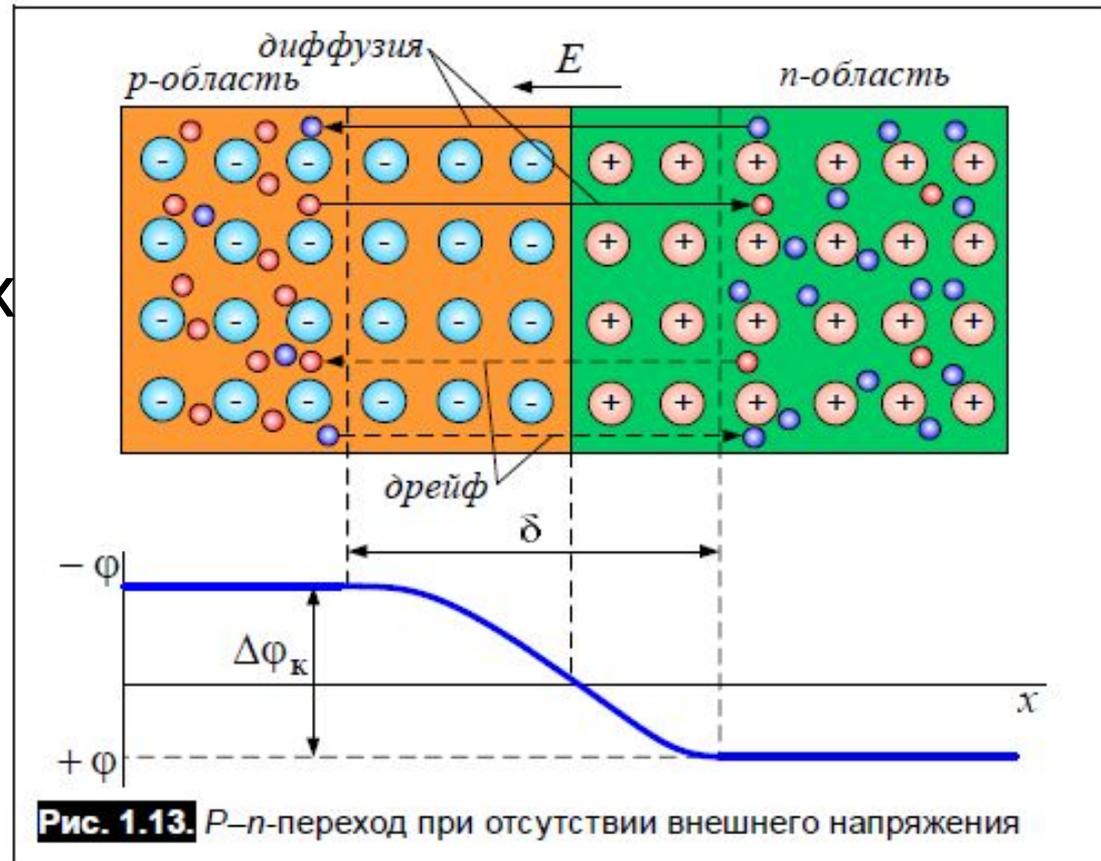
- После рекомбинации дырки и электрона электрические заряды неподвижных ионов примесей остались не скомпенсированными.

Вблизи границы раздела образуется слой пространственных зарядов.



- Между этими зарядами возникает электрическое поле с напряжённостью E , которое называют *полем потенциального барьера*,

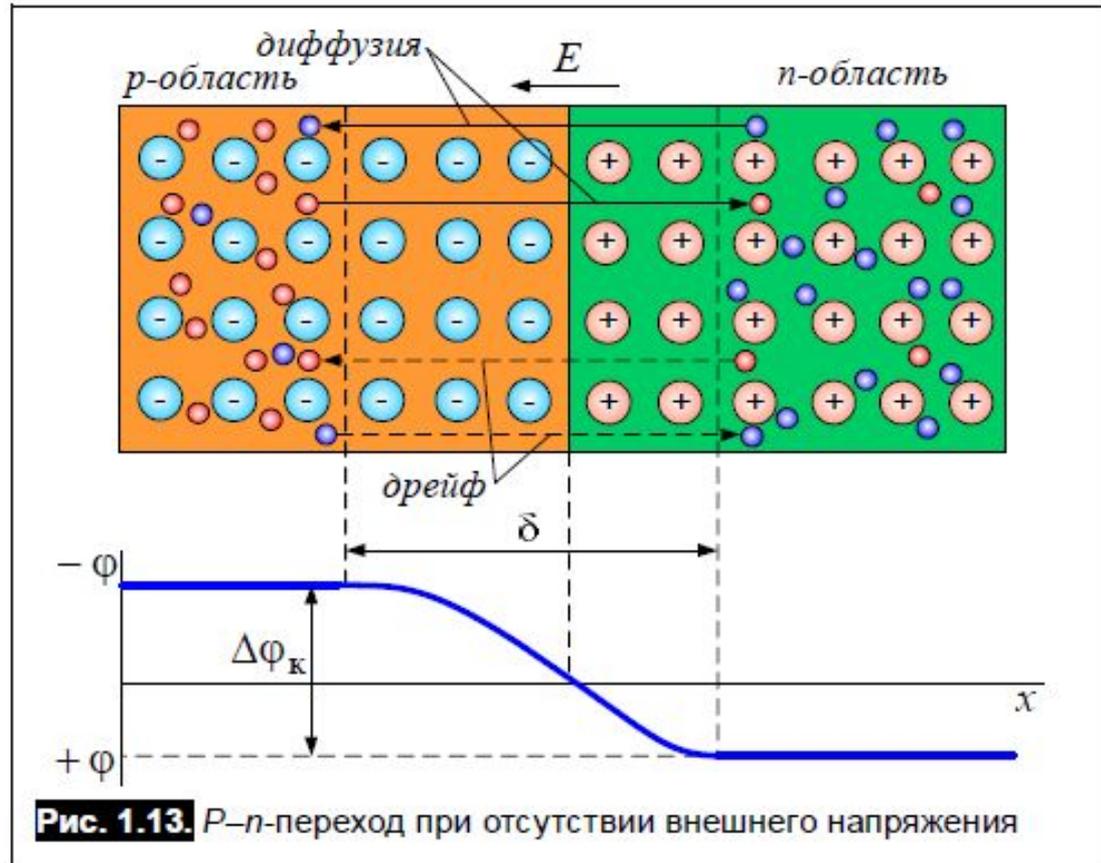
а разность потенциалов на границе раздела двух зон, обуславливающих это поле, называют *контактной разностью потенциалов* $\Delta\varphi_K$.



- Это электрическое поле начинает действовать на подвижные носители электрических зарядов.
- Таким образом, в узкой области δ , образуется слой, где практически отсутствуют свободные носители электрических зарядов и вследствие этого обладающий высоким сопротивлением - *запирающий слой*.

- Движение неосновных носителей через p - n -переход под действием электрического поля потенциального барьера обуславливает составляющую дрейфового тока

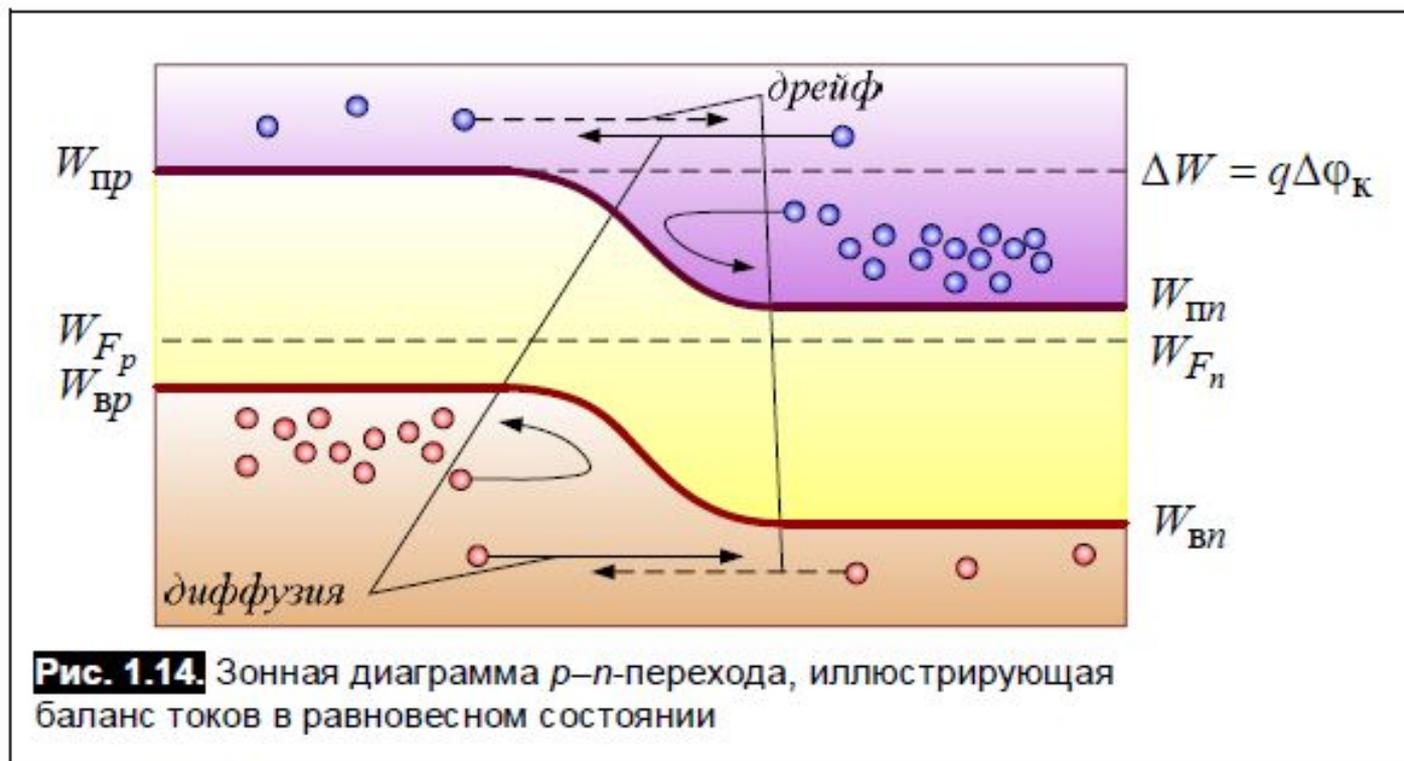
$$I_{др} = I_{неосн}$$



- При отсутствии внешнего электрического поля устанавливается динамическое равновесие между потоками основных и неосновных носителей электрических зарядов, то есть между диффузионной и дрейфовой составляющими тока $p-n$ -перехода, поскольку эти составляющие направлены навстречу друг другу

- $$I_{\text{диф}} = I_{\text{др}}$$

- При отсутствии внешнего электрического поля и при условии динамического равновесия в кристалле полупроводника устанавливается единый уровень Ферми для обеих областей проводимости.

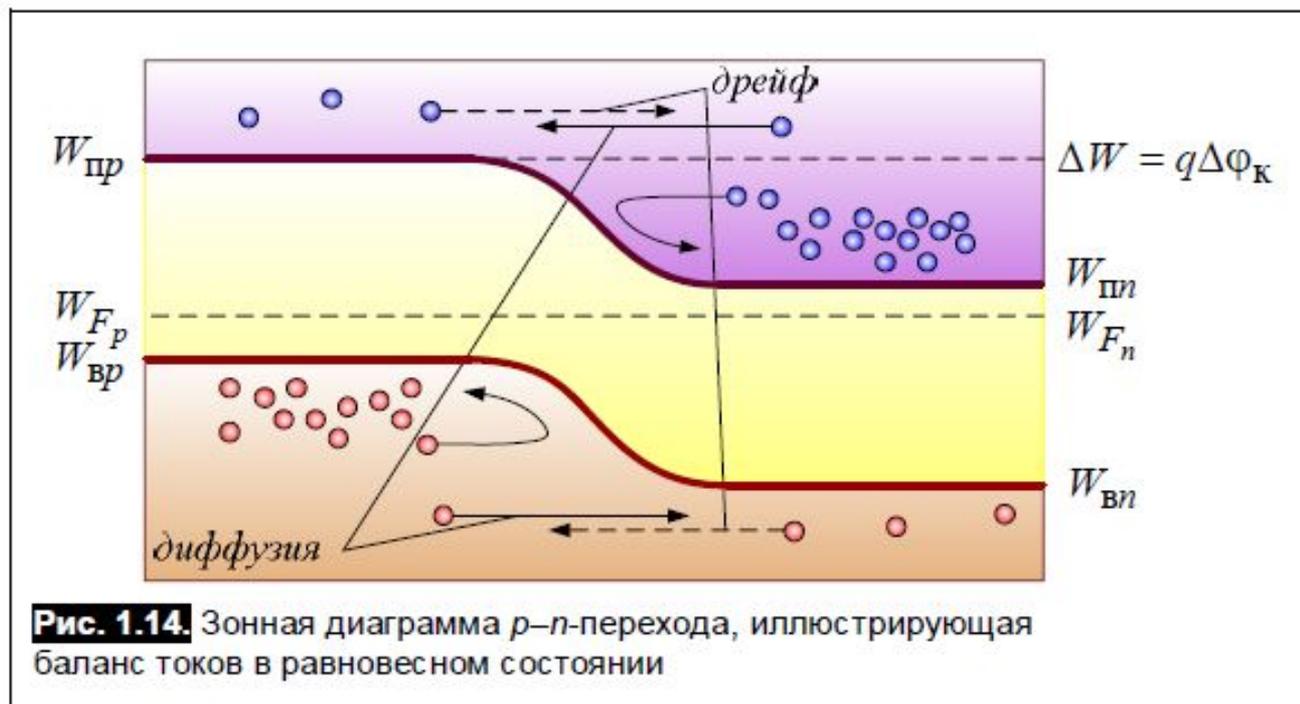


- поскольку в полупроводниках p -типа уровень Ферми смещается к потолку валентной зоны $W_{вр}$, а в полупроводниках n -типа – ко дну зоны проводимости $W_{пн}$, то на ширине p – n -перехода δ диаграмма энергетических зон искривляется и образуется потенциальный барьер:

$$\Delta\varphi_{к} = \frac{\Delta W}{q},$$

- где ΔW – энергетический барьер, который необходимо преодолеть электрону в области n , чтобы он мог перейти в область p , или аналогично для дырки в области p , чтобы она могла перейти в область n .

- Высота потенциального барьера зависит от концентрации примесей, так как при ее изменении изменяется уровень Ферми, смещаясь от середины запрещенной зоны к верхней или нижней ее границе.

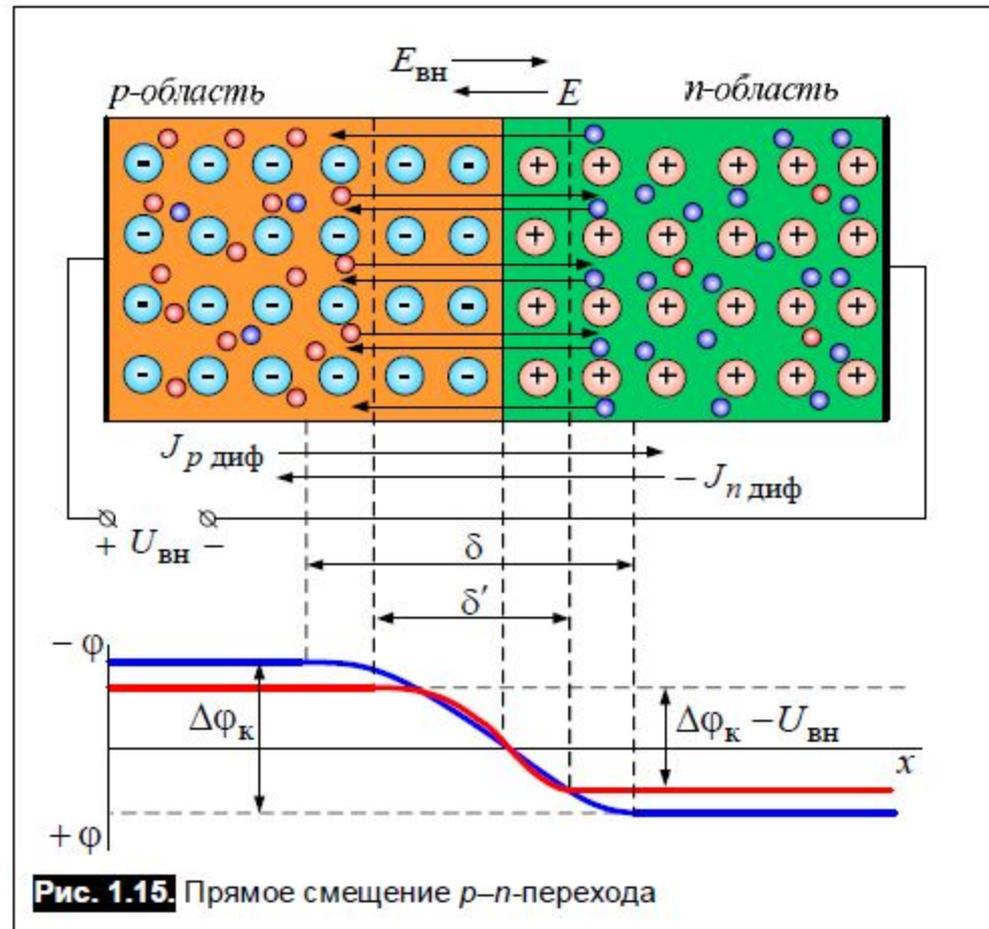


Вентильное свойство $p-n$ -перехода

- $P-n$ -переход, обладает свойством изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от направления протекающего через него тока. Это свойство называется *вентильным*, а прибор, обладающий таким свойством, называется *электрическим вентилем*.

Прямое включение p - n -перехода

- Рассмотрим p - n -переход, к которому подключен внешний источник напряжения $U_{\text{вн}}$,
- «+» к области p -типа, «-» к области n -типа.
- Такое подключение называют **прямым включением p - n -перехода** (или **прямым смещением p - n -перехода**).



- Напряженность электрического поля внешнего источника $E_{\text{вн}}$ будет направлена навстречу напряженности поля потенциального барьера E и, следовательно, приведет к снижению результирующей напряженности $E_{\text{рез}}$:

$$E_{\text{рез}} = E - E_{\text{вн}} .$$

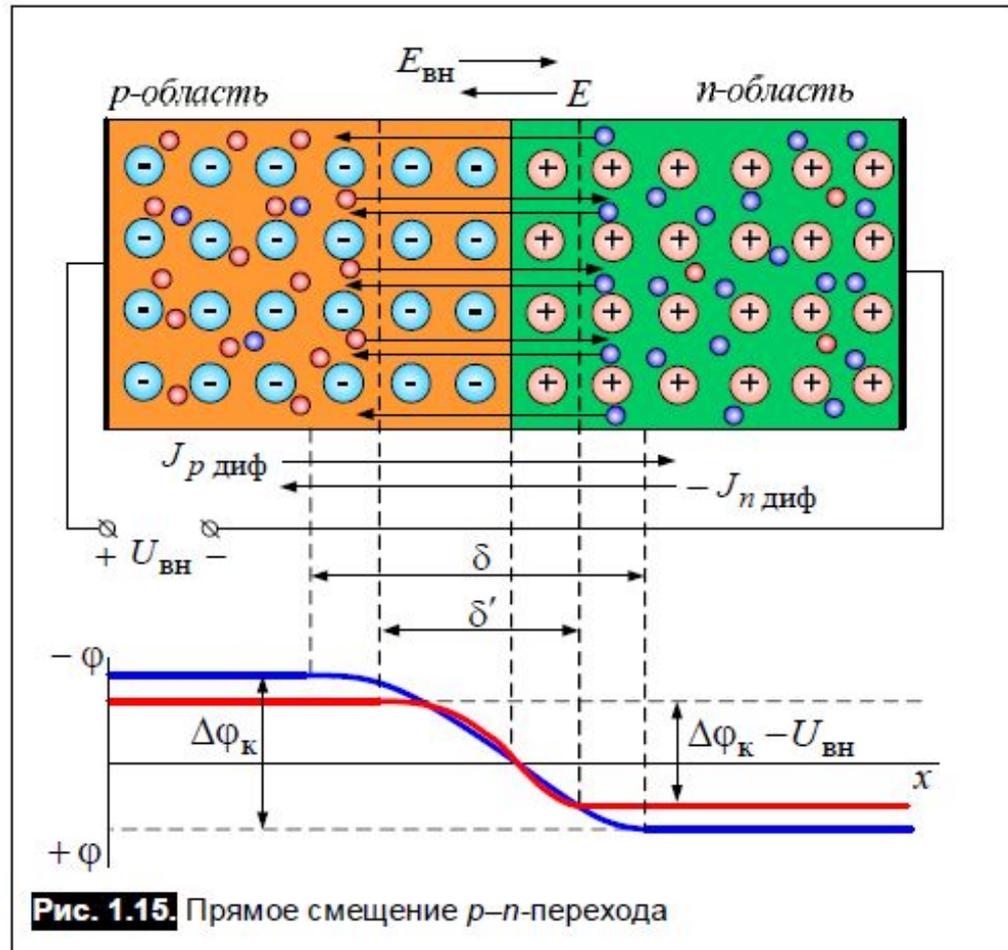


Рис. 1.15. Прямое смещение p - n -перехода

- Высота потенциального барьера снизится,
- увеличится количество основных носителей, диффундирующих через границу раздела в соседнюю область, образующих *прямой ток p-n-перехода*

$$\bullet \quad I_{\text{пр}} = I_{\text{диф}} - I_{\text{др}} \cong I_{\text{диф}} = I_{\text{осн.}}$$

- Вследствие уменьшения тормозящего действия поля потенциального барьера на основные носители, ширина запирающего слоя δ уменьшается ($\delta' < \delta$) (уменьшается его сопротивление).

- При увеличении внешнего напряжения прямой ток p – n -перехода возрастает.
- Основные носители после перехода границы раздела становятся неосновными в противоположной области полупроводника и, углубившись в нее, рекомбинируют с основными носителями этой области.
- Пока подключен внешний источник, ток через переход поддерживается непрерывным поступлением электронов из внешней цепи в n -область и уходом их из p -области во внешнюю цепь, благодаря чему восстанавливается концентрация дырок в p -области.

- Введение носителей заряда через $p-n$ -переход при понижении высоты потенциального барьера в область полупроводника, где эти носители являются неосновными, называют **инжекцией носителей заряда**.
- При протекании прямого тока из дырочной области p в электронную область n инжектируются дырки, а из электронной области в дырочную – электроны.

- Инжектирующий слой с относительно малым удельным сопротивлением называют **эмиттером**;
- слой, в который происходит инжекция неосновных для него носителей заряда, – **базой**.

При прямом смещении p - n -перехода потенциальный барьер понижается и через переход протекает относительно большой диффузионный ток.

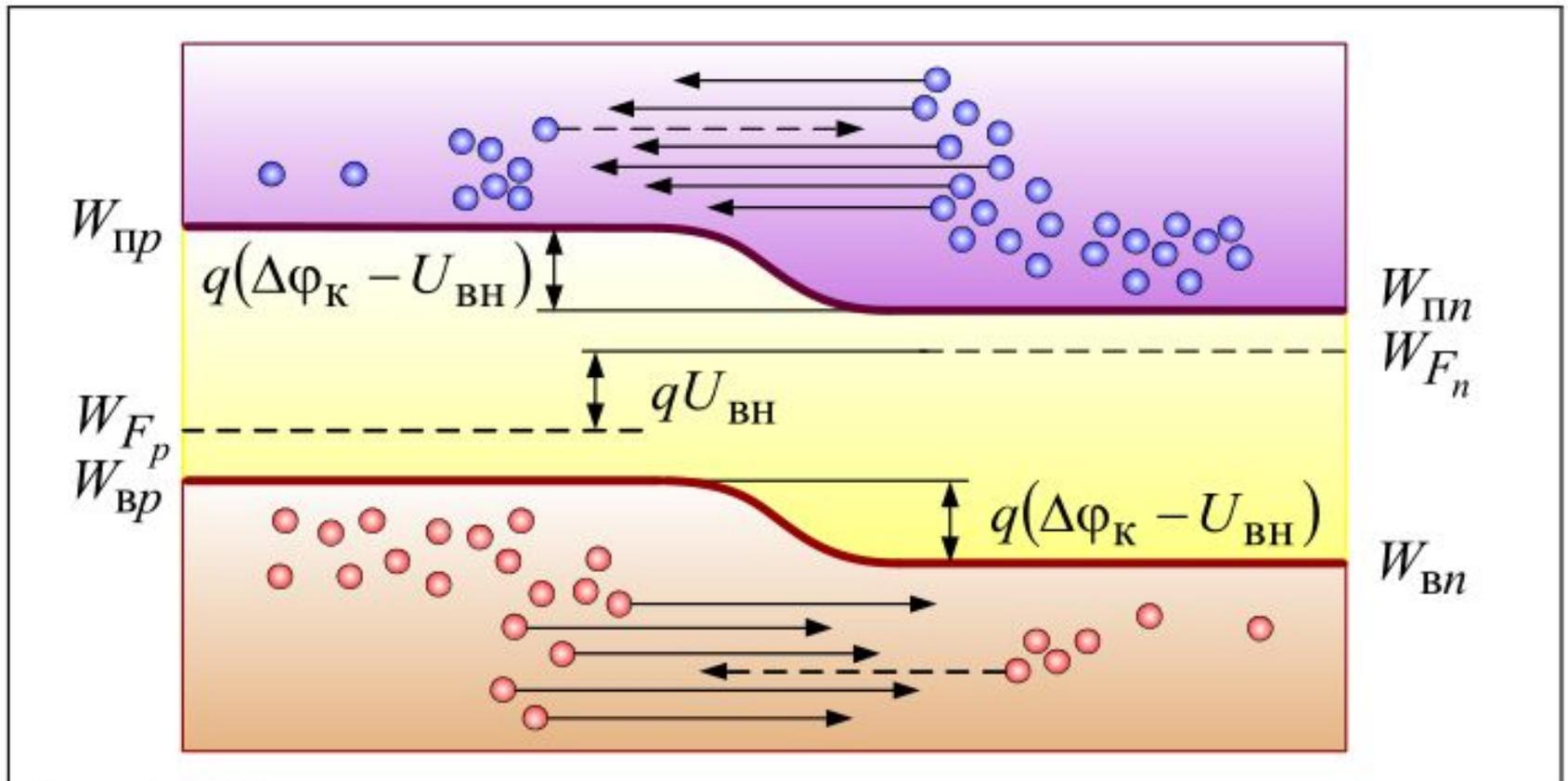
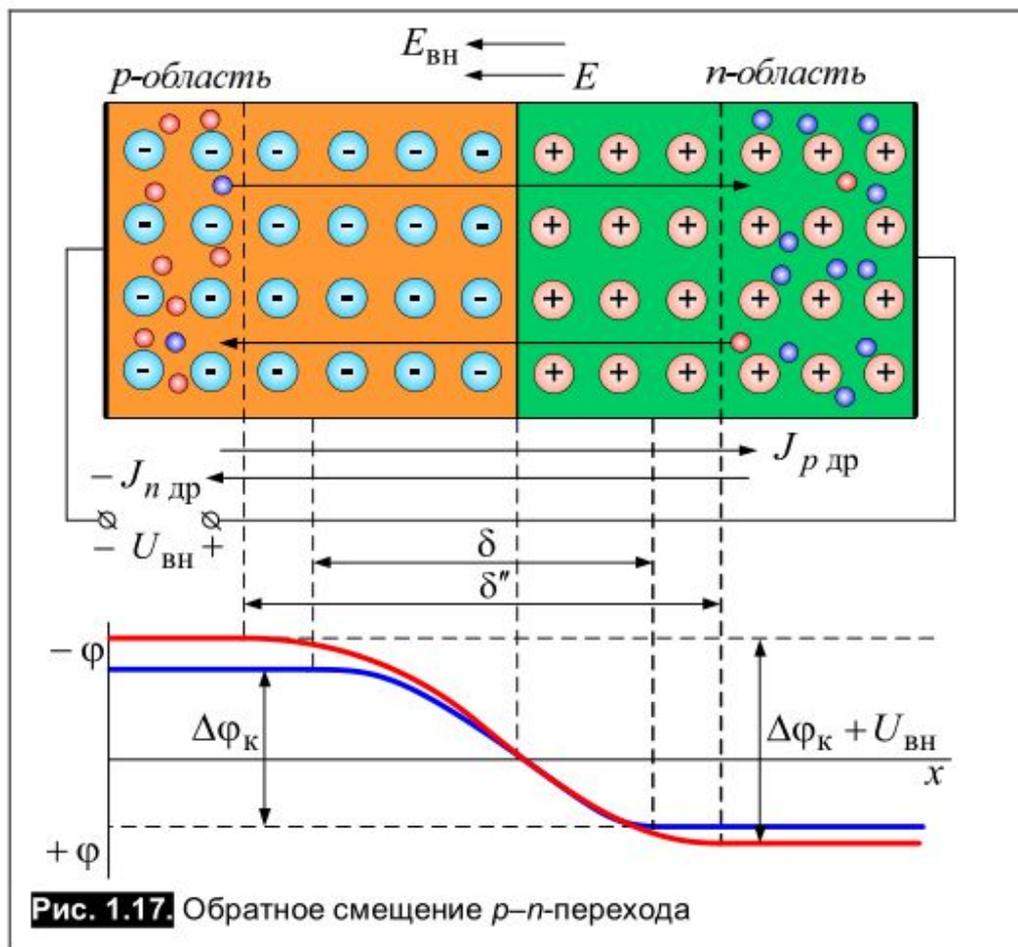


Рис. 1.16. Зонная диаграмма прямого смещения p - n -перехода, иллюстрирующая дисбаланс токов

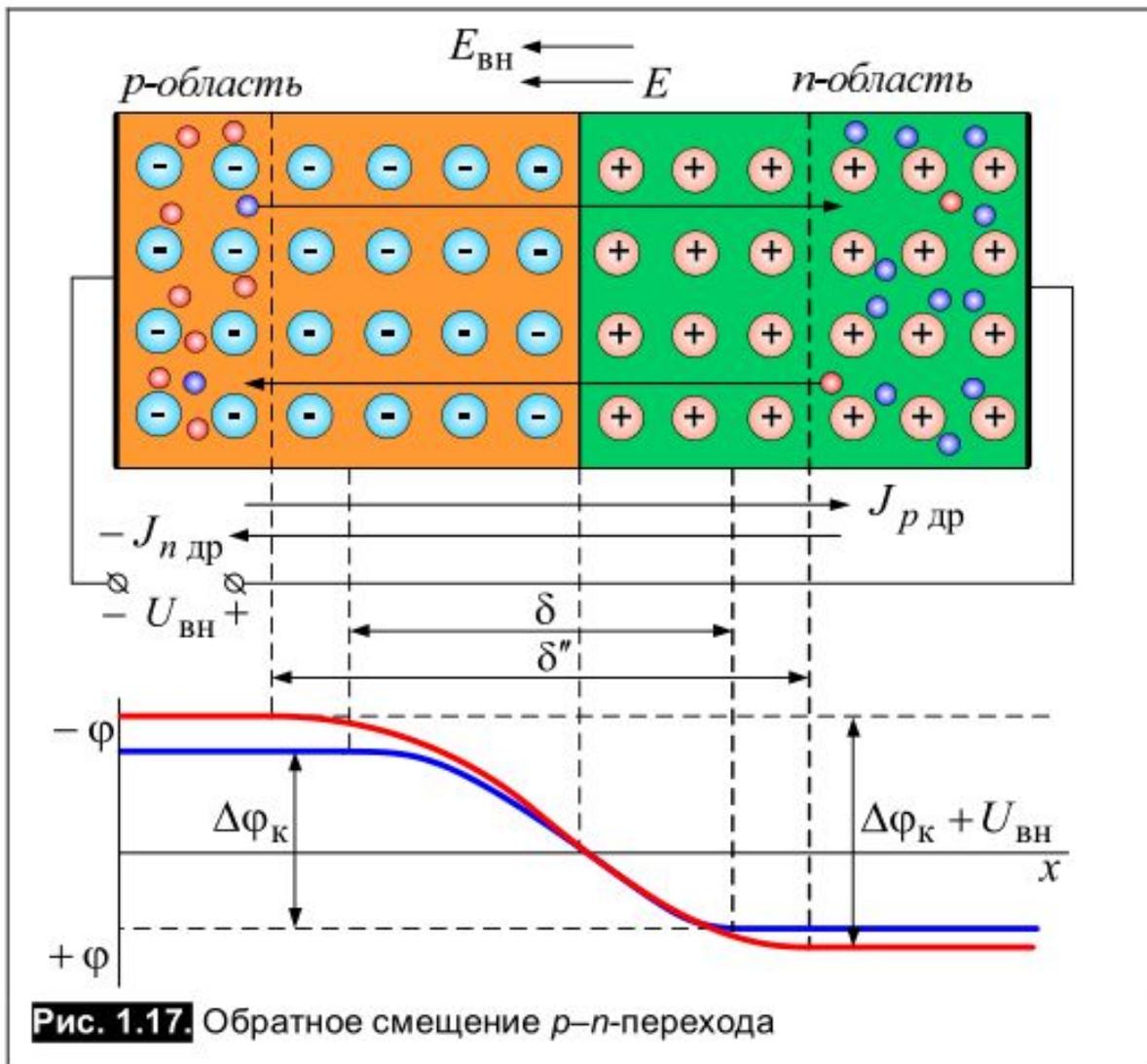
Обратное включение p - n -перехода

- Если к p - n -переходу подключить внешний источник с противоположной полярностью
- «-» к области p -типа, «+» к области n -типа, то такое подключение называют **обратным включением p - n -перехода** (или **обратным смещением p - n -перехода**).



- Напряженность электрического поля источника $E_{вн}$ будет направлена в ту же сторону, что и напряженность электрического поля E потенциального барьера;
- высота потенциального барьера возрастает, а ток диффузии основных носителей практически становится равным нулю.

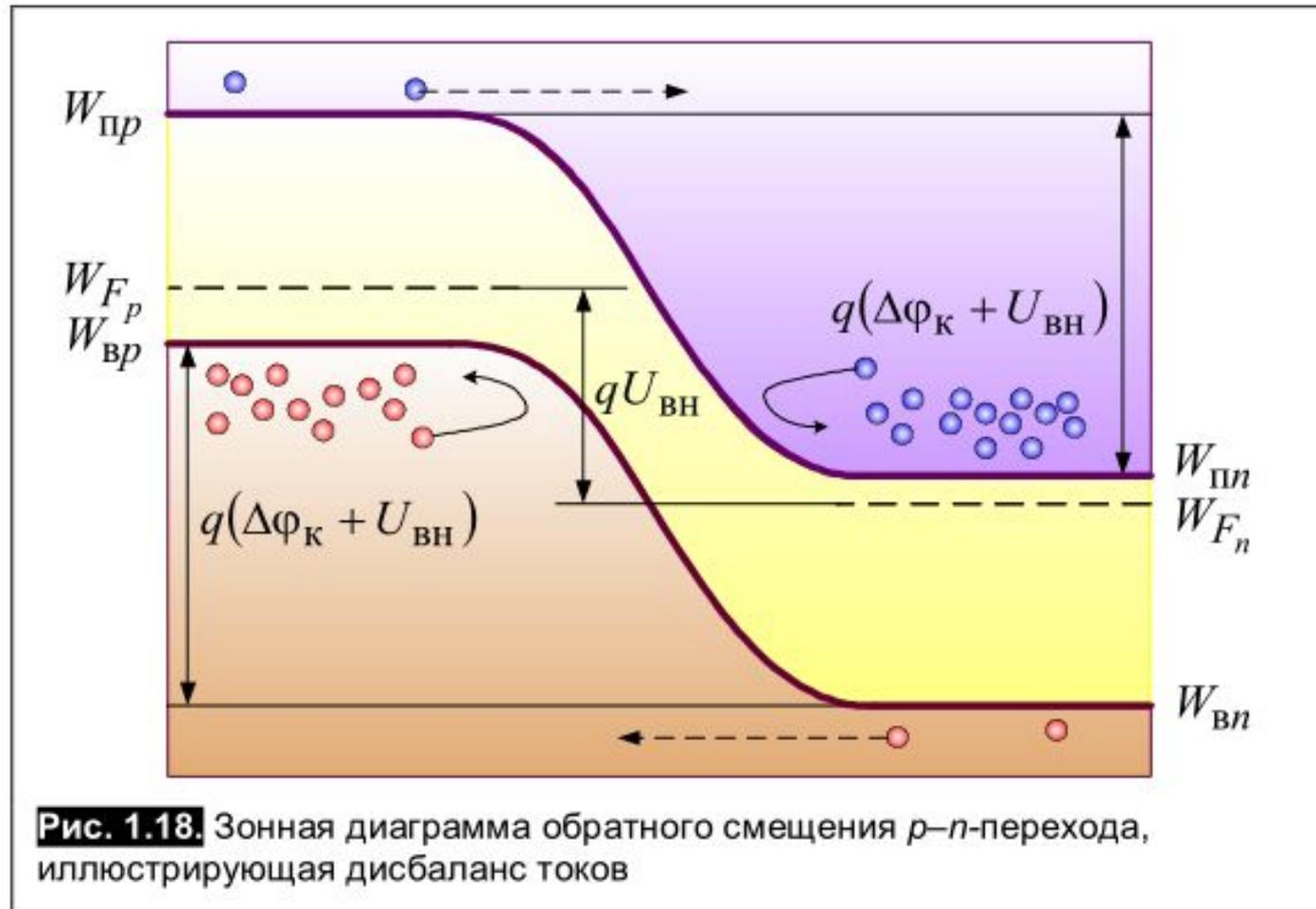
Ширина запирающего слоя δ увеличивается ($\delta'' > \delta$), а его сопротивление резко возрастает.



- Через p – n -переход будет протекать очень маленький ток, обусловленный перебросом суммарным электрическим полем на границе раздела, неосновных носителей
- Процесс переброса неосновных носителей заряда называется **экстракцией**.
- Этот ток имеет дрейфовую природу и называется **обратным током p – n -перехода**

$$\bullet \quad I_{\text{обр}} = I_{\text{др}} - I_{\text{диф}} \cong I_{\text{др}} = I_{\text{неосн.}}$$

При обратном смещении p - n -перехода потенциальный барьер повышается, диффузионный ток уменьшается до нуля и через переход протекает малый по величине дрейфовый ток.



Вольт-амперная характеристика p–n-перехода

- Вольт-амперная характеристика p–n-перехода – это зависимость тока через p–n-переход от величины приложенного к нему напряжения.
- Общий ток через p–n-переход определяется суммой четырех слагаемых:

$$I_{p-n} = I_{n \text{ диф}} + I_{p \text{ диф}} - I_{n \text{ др}} - I_{p \text{ др}}$$

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

где U - напряжение на p - n -переходе; I_0 - обратный (или тепловой) ток, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

- При прямом напряжении внешнего источника ($U > 0$) экспоненциальный член быстро возрастает, что приводит к быстрому росту прямого тока, который в основном определяется диффузионной составляющей.
- При обратном напряжении внешнего источника ($U < 0$) экспоненциальный член много меньше единицы и ток р–n-перехода практически равен обратному току I_0 , определяемому, в основном, дрейфовой составляющей.

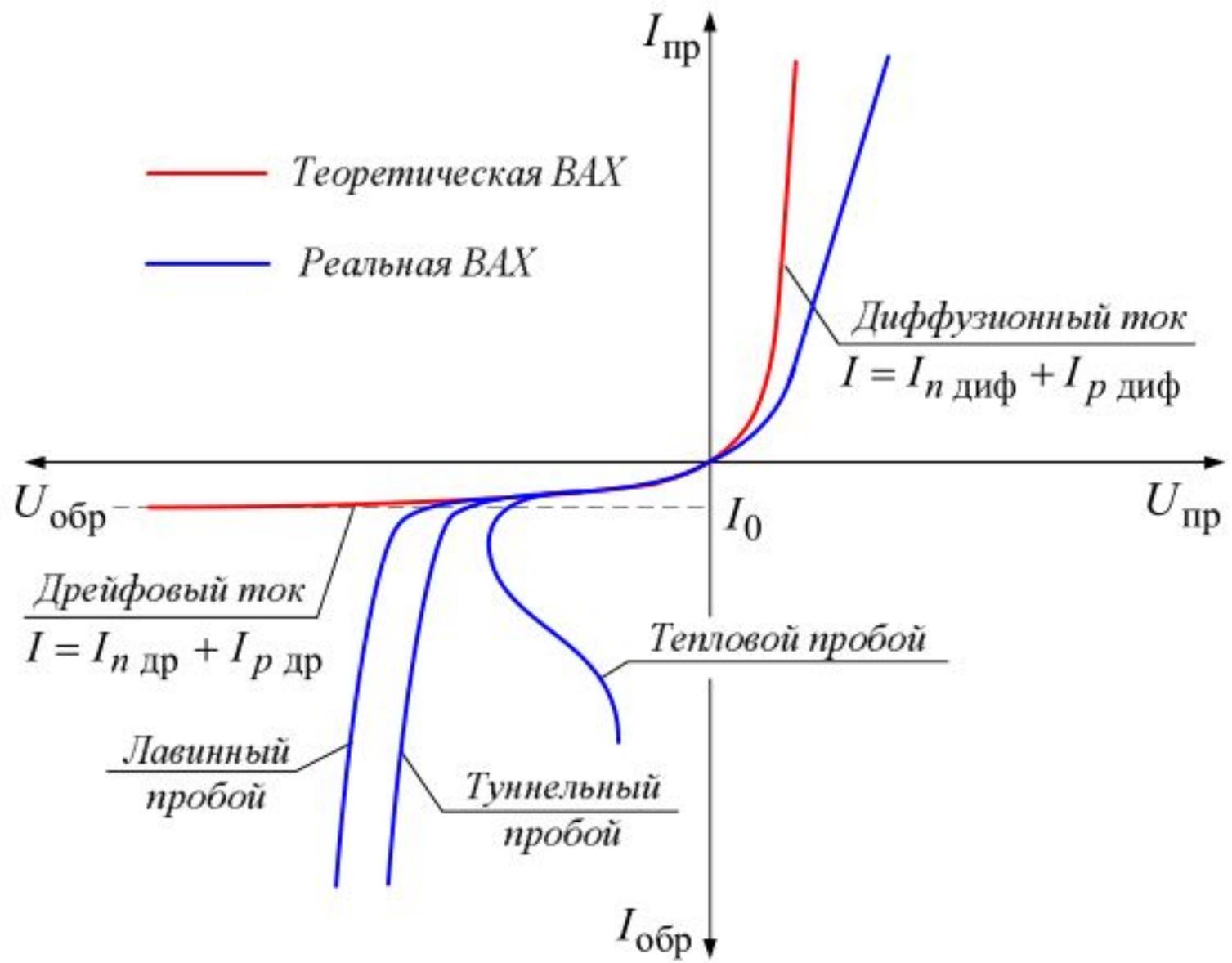


Рис. 1.19. Вольт-амперная характеристика *p-n*-перехода

- При увеличении прямого напряжения ток $p-n$ -перехода в прямом направлении вначале возрастает относительно медленно, а затем начинается участок быстрого нарастания прямого тока, что приводит к дополнительному нагреванию полупроводниковой структуры.

- Если количество выделяемого при этом тепла будет превышать количество тепла, то могут произойти в полупроводниковой структуре необратимые изменения вплоть до разрушения кристаллической решетки.

- При увеличении обратного напряжения, приложенного к $p-n$ -переходу, обратный ток изменяется незначительно, так как увеличение обратного напряжения приводит лишь к увеличению скорости дрейфа неосновных носителей без изменения их количества.
- Такое положение будет сохраняться до величины обратного напряжения, при котором начинается интенсивный рост обратного тока – так называемый *пробой $p-n$ -перехода*.

Виды пробоев p – n -перехода

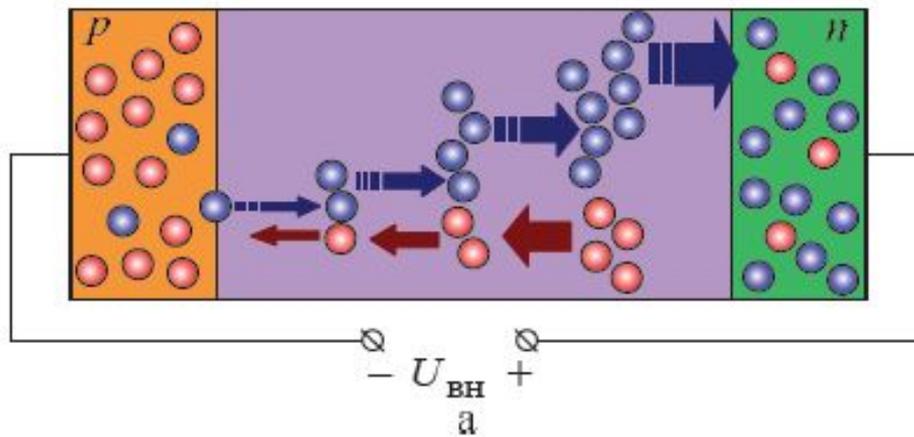
- Возможны обратимые и необратимые пробойи.
- Обратимый пробой – это пробой, после которого p – n -переход сохраняет работоспособность.
- Необратимый пробой ведет к разрушению структуры полупроводника.

- Существуют четыре типа пробоя:
- лавинный,
- туннельный,
- тепловой,
- поверхностный.

- *Лавинный и туннельный* пробои объединяются под названием – *электрический пробой*, который является **обратимым**.
- К **необратимым** относят *тепловой и поверхностный*.

- *Лавинный пробой* свойственен полупроводникам, со значительной толщиной $p-n$ -перехода, образованных слаболегированными полупроводниками.
- Пробой происходит под действием сильного электрического поля с напряженностью $E \gg (8...12) \times 10^4$ В/см.
- В лавинном пробое основная роль принадлежит неосновным носителям, образующимся под действием тепла в $p-n$ -переходе.

- Эти носители испытывают со стороны электрического поля p – n -перехода ускоряющее действие и могут разогнаться до такой скорости, что их кинетической энергии может оказаться достаточно, чтобы при соударении с атомом полупроводника ионизировать его, т.е. «выбить» один из его валентных электронов и перебросить его в зону проводимости, образовав при этом пару «электрон –дырка».



Происходит резкий рост обратного тока при практически неизменном обратном напряжении.

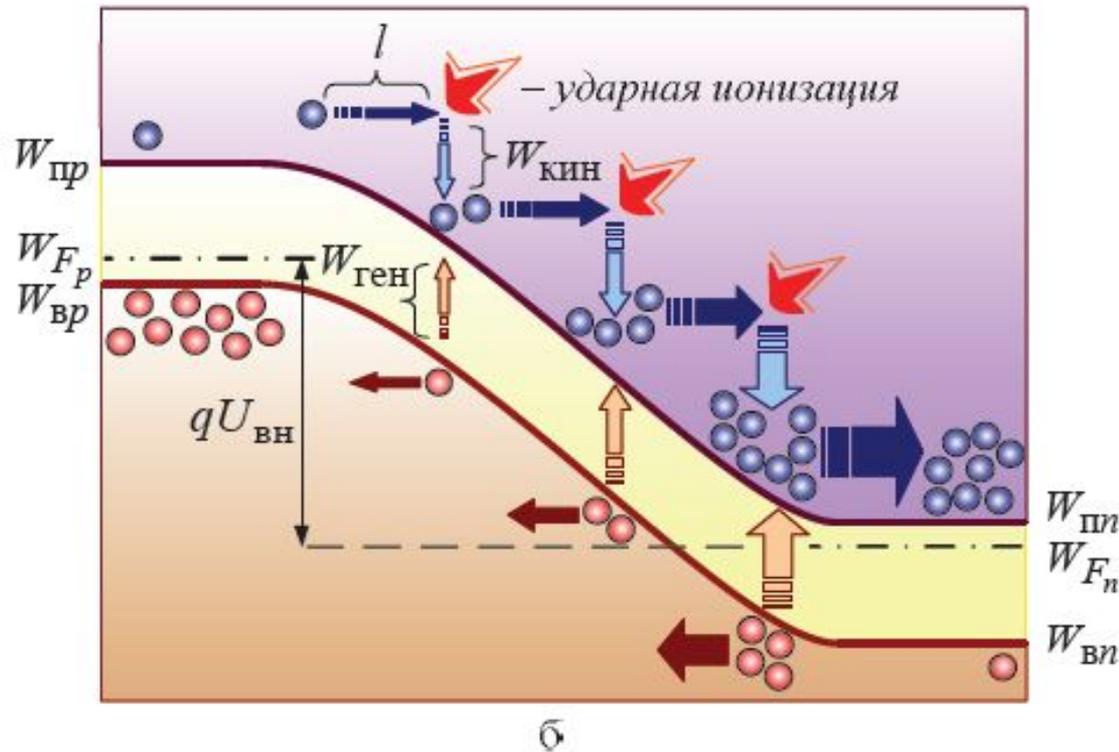


Рис. 1.20. Схема, иллюстрирующая лавинный пробой в p - n -переходе: распределение токов (а); зонная диаграмма (б), иллюстрирующая лавинное умножение при обратном смещении перехода

- *Туннельный пробой* происходит в очень тонких $p-n$ -переходах, что возможно при очень высокой концентрации примесей $N \gg 10^{19} \text{ см}^{-3}$, когда ширина перехода становится малой (порядка 0,01 мкм) и при небольших значениях обратного напряжения (несколько вольт), когда возникает большой градиент электрического поля.

- Высокое значение напряженности электрического поля, воздействуя на атомы кристаллической решетки, повышает энергию валентных электронов и приводит к их туннельному «просачиванию» сквозь «тонкий» энергетический барьер из валентной зоны p -области в зону проводимости n -области. Причем «просачивание» происходит без изменения энергии носителей заряда.

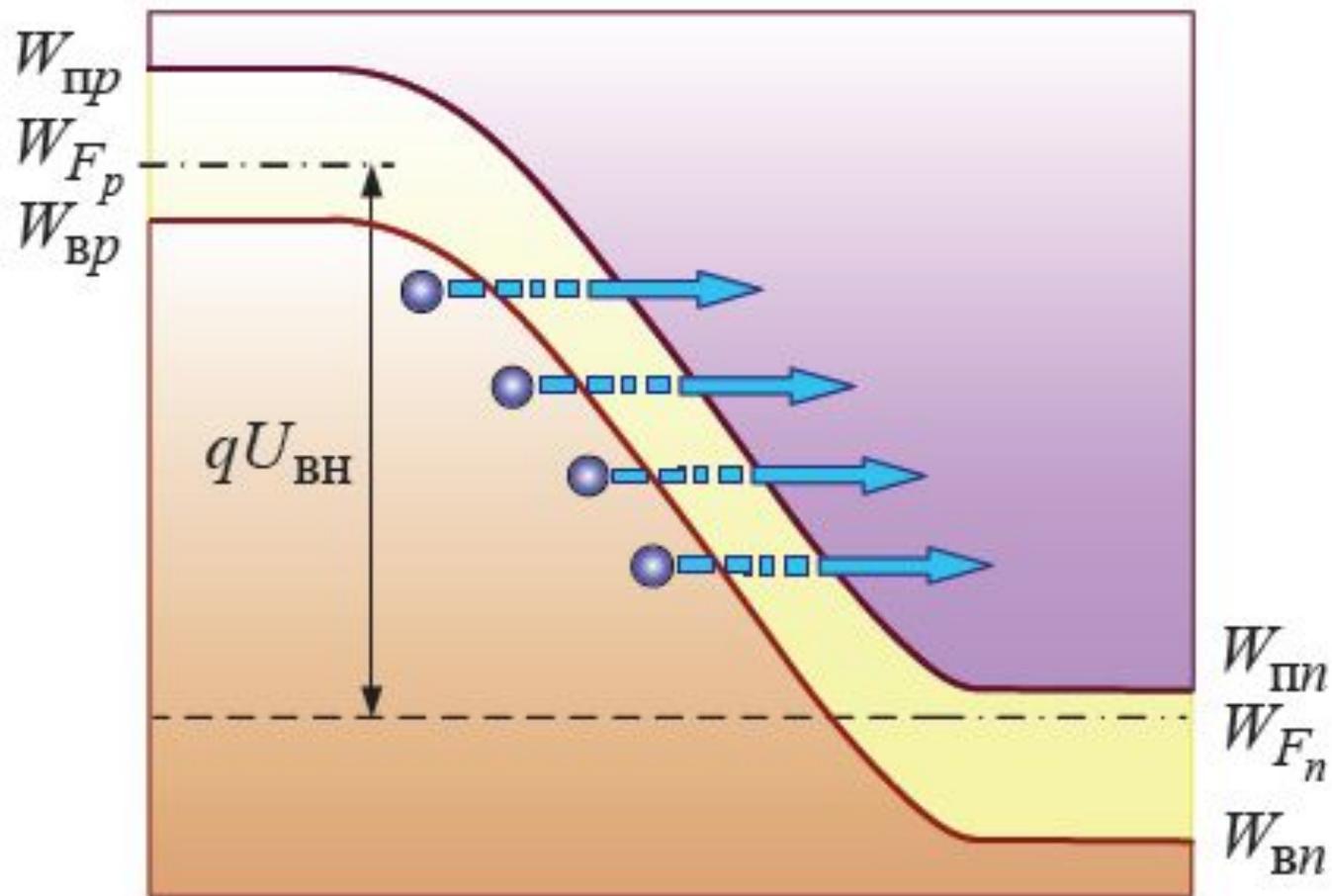


Рис. 1.21. Зонная диаграмма, иллюстрирующая туннельный пробой p - n -перехода при обратном смещении

- Если обратный ток при обоих видах электрического пробоя не превысит максимально допустимого значения, при котором произойдет перегрев и разрушение кристаллической структуры полупроводника, то они являются обратимыми и могут быть воспроизведены многократно.

- *Тепловым* называется пробой $p-n$ -перехода, обусловленный ростом количества носителей заряда при повышении температуры кристалла.
- С увеличением обратного напряжения и тока возрастает тепловая мощность, выделяющаяся в $p-n$ -переходе, и, соответственно, температура кристаллической структуры.

- Под действием тепла усиливаются колебания атомов кристалла и ослабевают связи валентных электронов с ними, возрастает вероятность перехода их в зону проводимости и образования дополнительных пар носителей «электрон – дырка».

- Если электрическая мощность в $p-n$ -переходе превысит максимально допустимое значение, то процесс термогенерации лавинообразно нарастает, в кристалле происходит необратимая перестройка структуры и $p-n$ -переход разрушается.

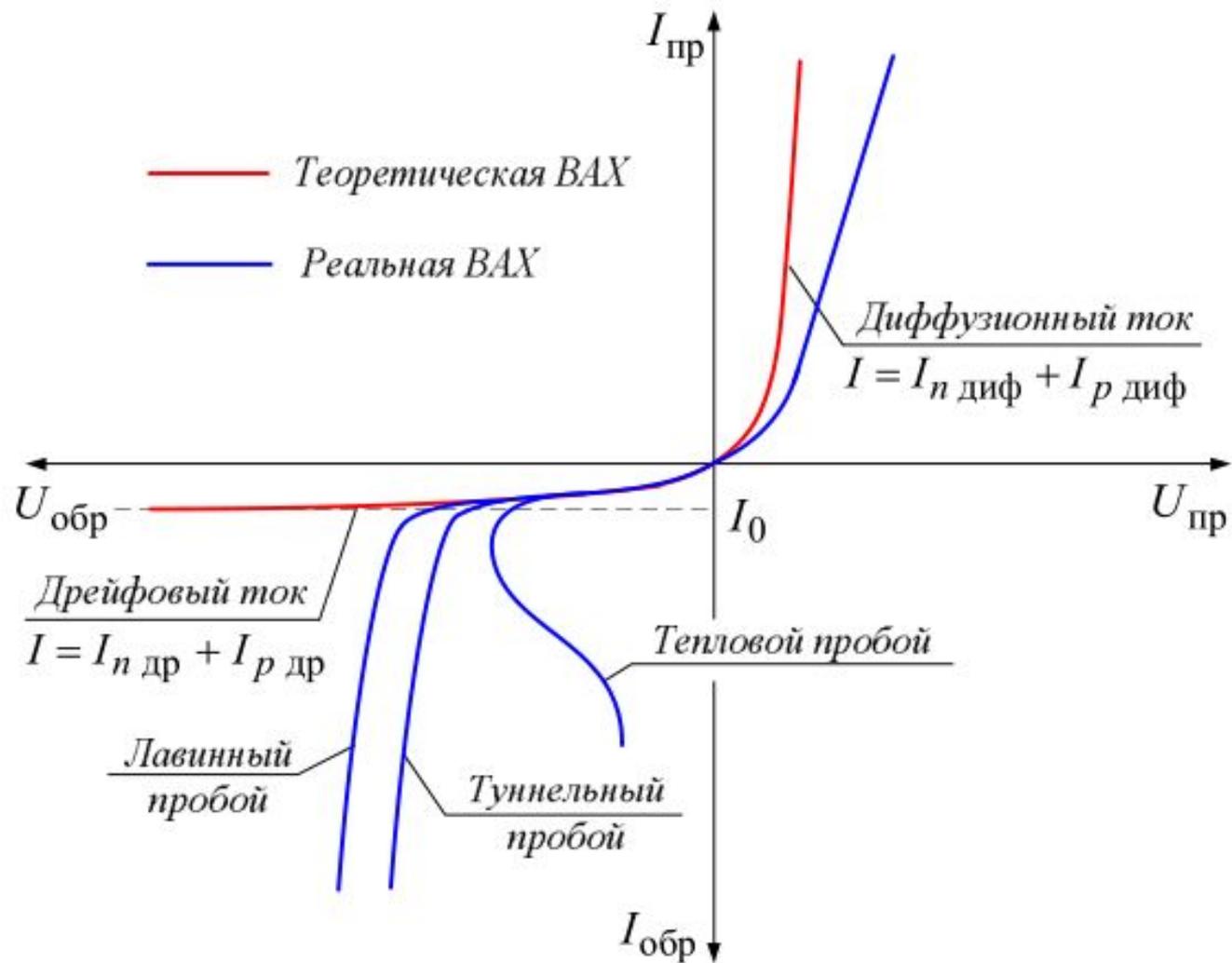


Рис. 1.19. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

Ёмкость $p-n$ -перехода

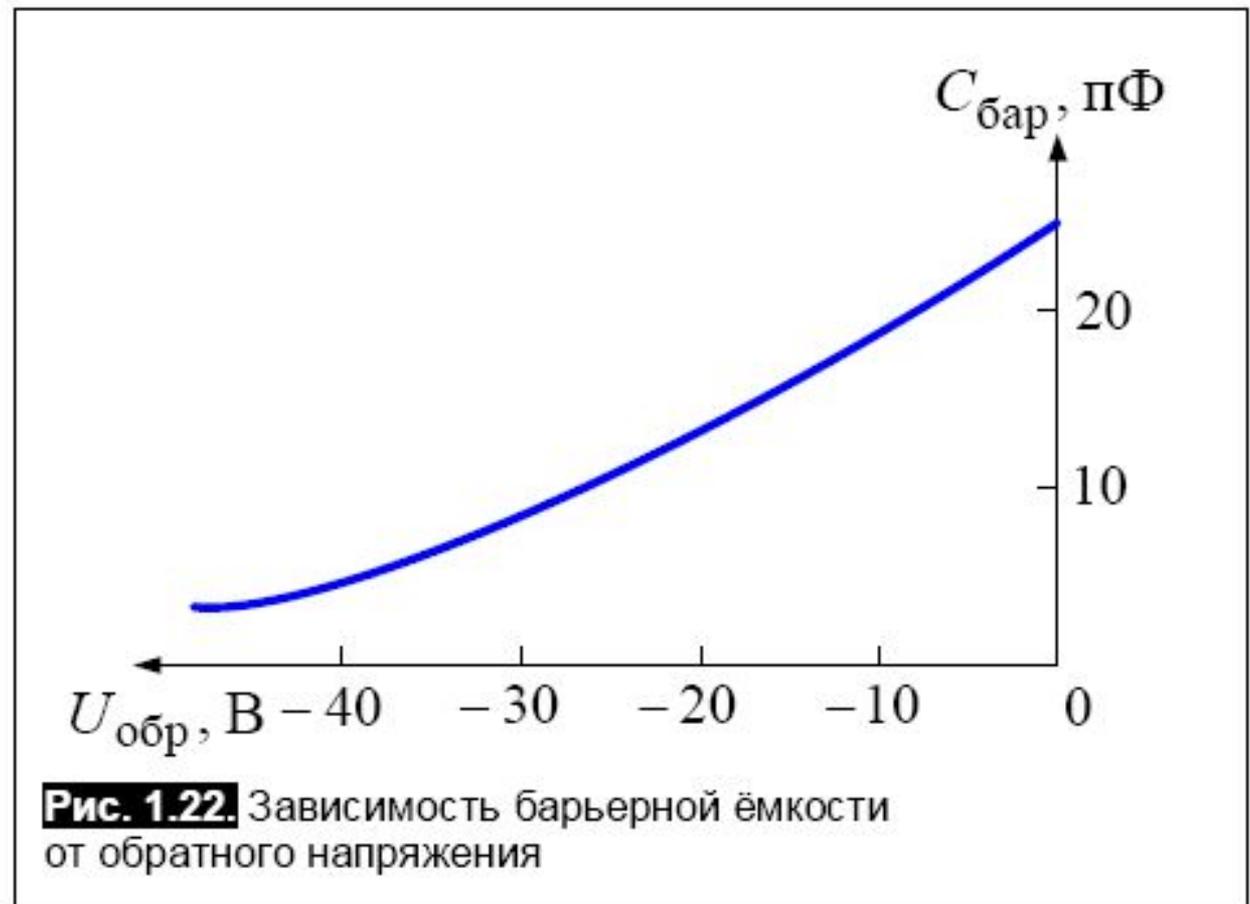
- Изменение внешнего напряжения на $p-n$ -переходе приводит к изменению ширины обедненного слоя и, соответственно, накопленного в нем электрического заряда
- Исходя из этого $p-n$ -переход ведет себя подобно конденсатору, ёмкость которого определяется как отношение изменения накопленного в $p-n$ -переходе заряда к обусловившему это изменение приложенному внешнему напряжению.

- Различают *барьерную* (или зарядную) и *диффузионную ёмкость* p - n -перехода.
- Барьерная ёмкость соответствует обратновключенному p - n -переходу, который рассматривается как обычный конденсатор, где пластинами являются границы обедненного слоя, а сам обедненный слой служит несовершенным диэлектриком с увеличенными диэлектрическими потерями:

$$C_{\text{бар}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\delta},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; ε_0 – электрическая постоянная; S – площадь p – n -перехода; δ – ширина обеднённого слоя.

- При возрастании обратного напряжения ширина перехода увеличивается и ёмкость $C_{\text{бар}}$ уменьшается.



- Диффузионная ёмкость характеризует накопление подвижных носителей заряда в n - и p -областях при прямом напряжении на переходе.
- Она практически существует только при прямом напряжении, когда носители заряда диффундируют (инжектируют) в большом количестве через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в n - и p -областях.

- Ёмкость $C_{\text{диф}}$ представляет собой отношение зарядов к разности потенциалов:

$$C_{\text{диф}} = \frac{\Delta Q_{\text{диф}}}{\Delta U_{\text{пр}}} .$$

- Диффузионная ёмкость значительно больше барьерной, но использовать ее не удастся, т.к. она шунтируется малым прямым сопротивлением $p-n$ -перехода.
- Таким образом, $p-n$ -переход можно использовать в качестве **конденсатора переменной емкости**, управляемого величиной и знаком приложенного напряжения.

Контакт «металл – полупроводник»

- Контакт «металл – полупроводник» возникает в месте соприкосновения полупроводникового кристалла n - или p - типа проводимости с металлами. Происходящие при этом процессы определяются соотношением работ выхода электрона из металла A_M и из полупроводника A_P .

- Под *работой выхода электрона* понимают энергию, необходимую для переноса электрона с уровня Ферми на энергетический уровень свободного электрона.
- Чем меньше работа выхода, тем больше электронов может выйти из данного тела.

- В результате диффузии электронов и перераспределения зарядов нарушается электрическая нейтральность прилегающих к границе раздела областей, возникает контактное электрическое поле и контактная разность потенциалов

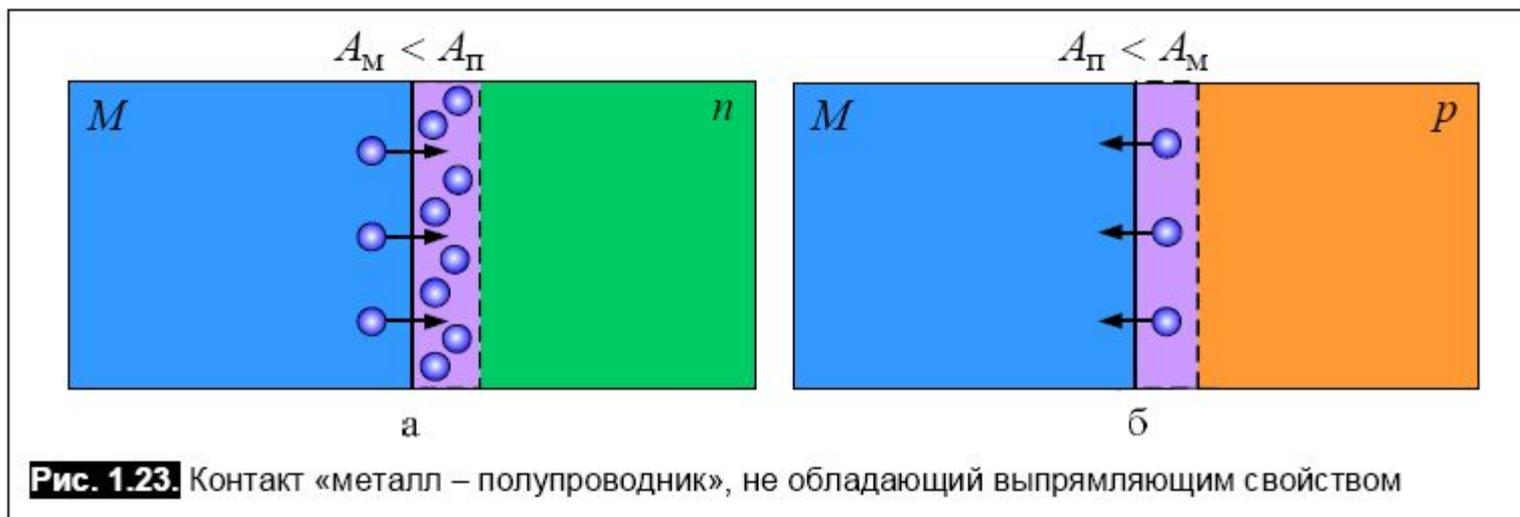
$$\varphi_{\text{КОНТ}} = \frac{(A_{\text{М}} - A_{\text{П}})}{q}.$$

- Переходный слой, в котором существует контактное электрическое поле при контакте «металл – полупроводник», называется *переходом Шоттки*, по имени немецкого ученого В. Шоттки, который первый получил основные математические соотношения для электрических характеристик таких переходов.

- Контактное электрическое поле на переходе Шоттки сосредоточено практически в полупроводнике, так как концентрация носителей заряда в металле значительно больше концентрации носителей заряда в полупроводнике.
- Перераспределение электронов в металле происходит в очень тонком слое, сравнимом с межатомным расстоянием.

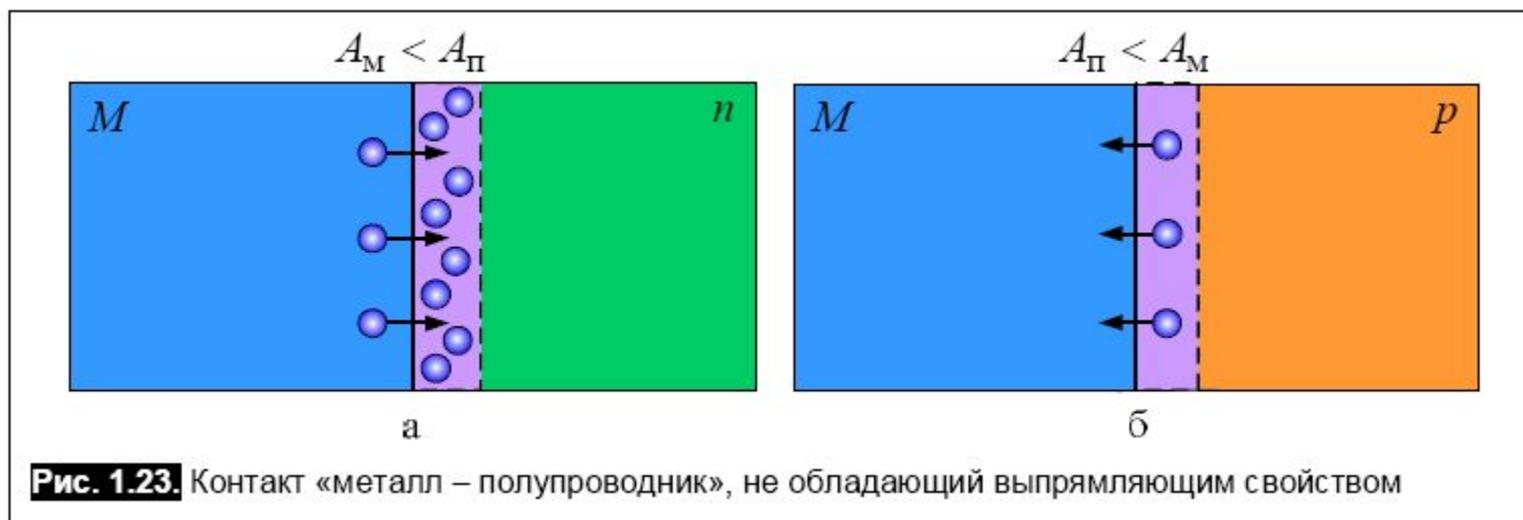
- В зависимости от типа электропроводности полупроводника и соотношения работ выхода в кристалле может возникать **обеднённый, инверсный или обогащённый слой носителями электрических зарядов.**

- 1. $A_M < A_{\Pi}$, полупроводник n -типа (а). В данном случае будет преобладать выход электронов из металла (M) в полупроводник, поэтому в слое полупроводника около границы раздела накапливаются основные носители (электроны), и этот слой становится обогащенным, т.е. имеющим повышенную концентрацию электронов.

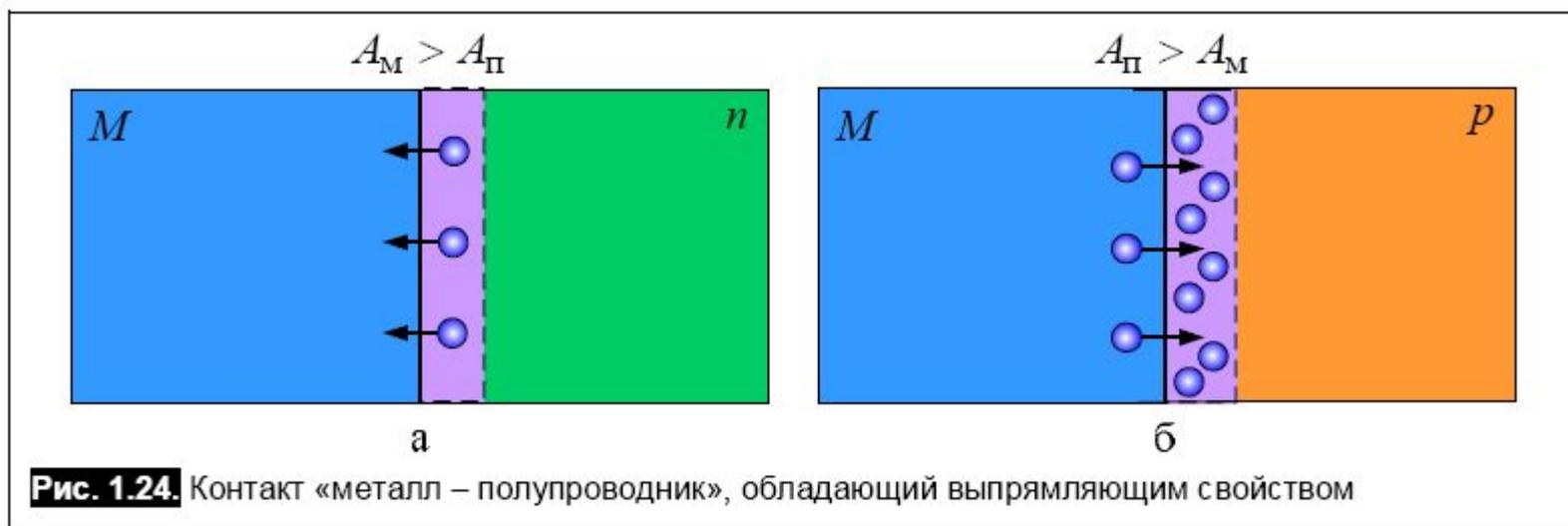


- Сопротивление этого слоя будет малым при любой полярности приложенного напряжения, и, следовательно, такой переход не обладает выпрямляющим свойством. Его иначе называют *невыпрямляющим переходом*.

- 2. $A_{\text{П}} < A_{\text{М}}$, полупроводник p -типа (**б**). В этом случае будет преобладать выход электронов из полупроводника в металл, при этом в приграничном слое также образуется область, обогащенная основными носителями заряда (дырками), имеющая малое сопротивление. Такой переход также не обладает выпрямляющим свойством.

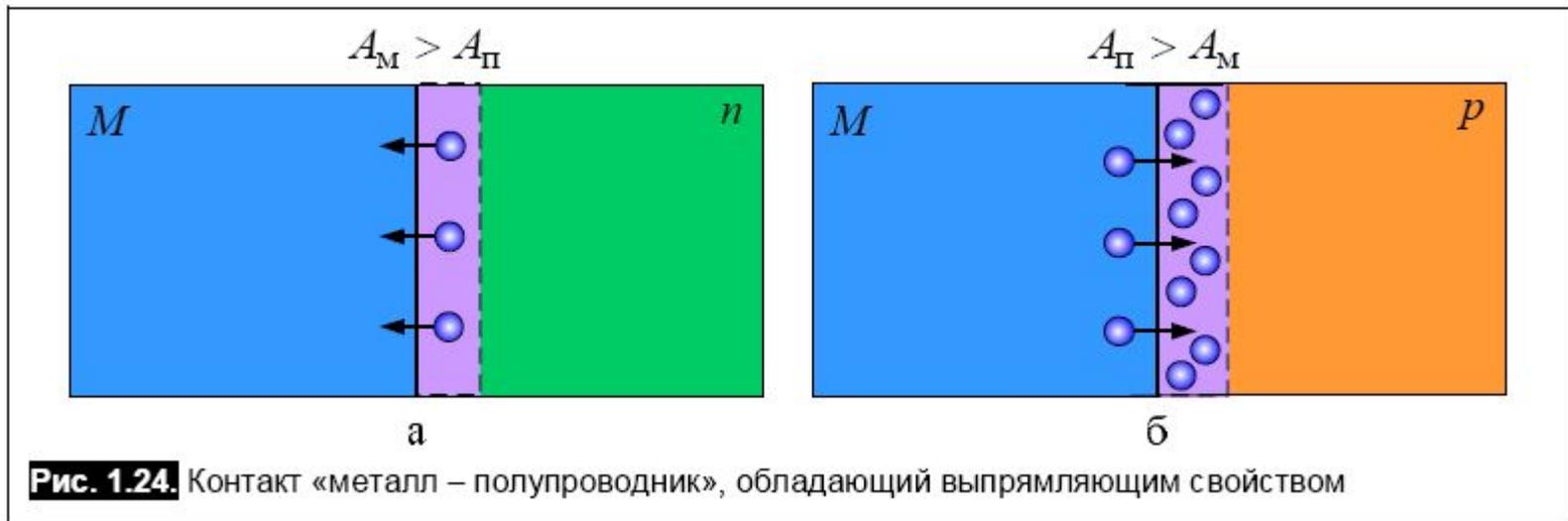


- 3. $A_M > A_{\Pi}$, полупроводник n -типа (а). При таких условиях электроны будут переходить из полупроводника в металл и в приграничном слое полупроводника образуется область, обедненная основными носителями заряда и имеющая большое сопротивление.



- Создается сравнительно высокий потенциальный барьер, высота которого будет существенно зависеть от полярности приложенного напряжения.
- Если $A_p \gg A_m$, то возможно образование инверсного слоя (*p*-типа). Такой контакт обладает выпрямляющим свойством.

- 4. $A_{\text{п}} > A_{\text{м}}$, полупроводник p -типа (б). Контакт, образованный при таких условиях обладает выпрямляющим свойством, как и предыдущий.



Свойства омических переходов

- Основное назначение омических переходов – электрическое соединение полупроводника с металлическими токоведущими частями полупроводникового прибора.
- Омический переход имеет меньшее отрицательное влияние на параметры и характеристики полупроводникового прибора, если выполняются следующие условия:

- вольт-амперная характеристика омического перехода линейна;
- отсутствует накопление неосновных носителей в омическом переходе или вблизи него;
- минимальное сопротивление омического перехода.