

Лекция № 6

Элементы квантовой статистики И физики твёрдого тела (часть-1)



План лекции

- Зонная теория твёрдого тела.
- Собственная проводимость полупроводников.
- Примесная проводимость полупроводников.
- Фотопроводимость полупроводников.
- Контактные явления с точки зрения зонной теории.

Деление твердых тел на проводники, полупроводники и диэлектрики

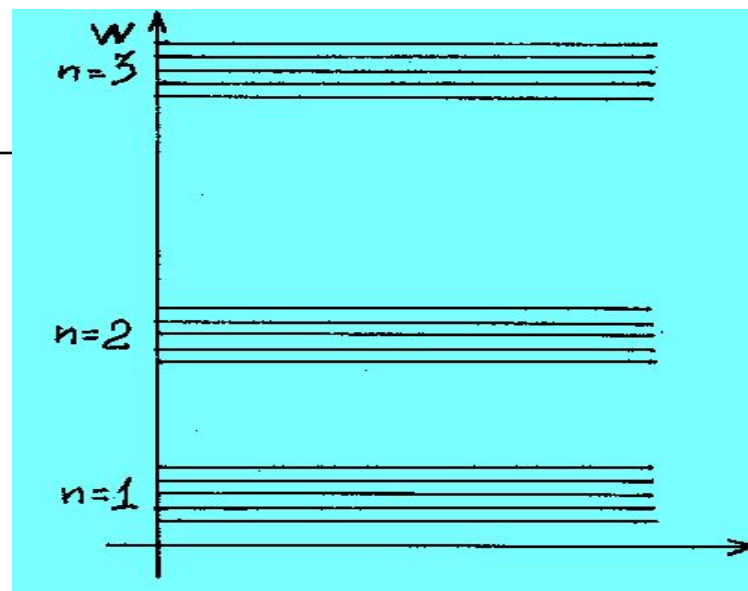
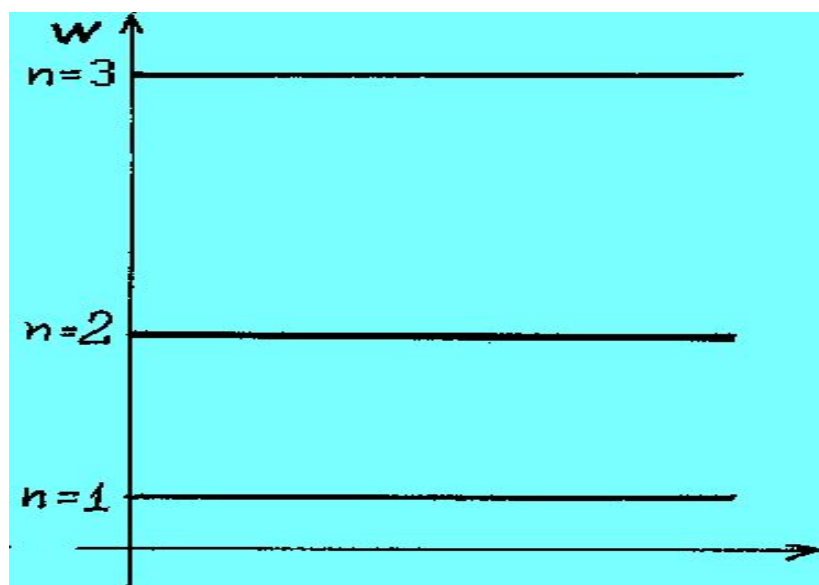


С позиций зонной теории различие в электрических свойствах твердых тел объясняется:

- а) шириной запрещенных зон;
- б) различным заполнением электронов разрешенных энергетических зон, а именно валентной зоны.

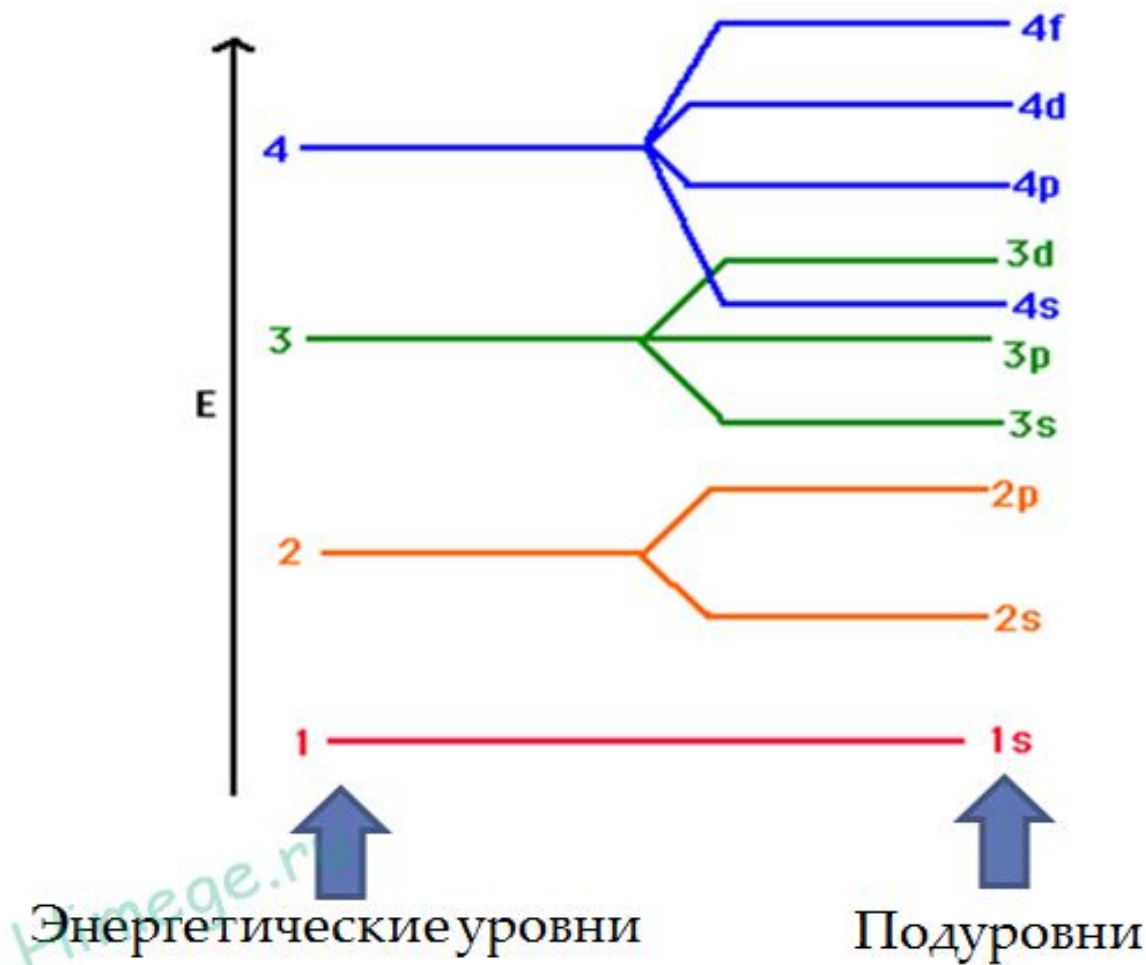
Необходимое условие проводимости — наличие свободных электронов в валентной зоне.

Понятие о зонной теории проводимости

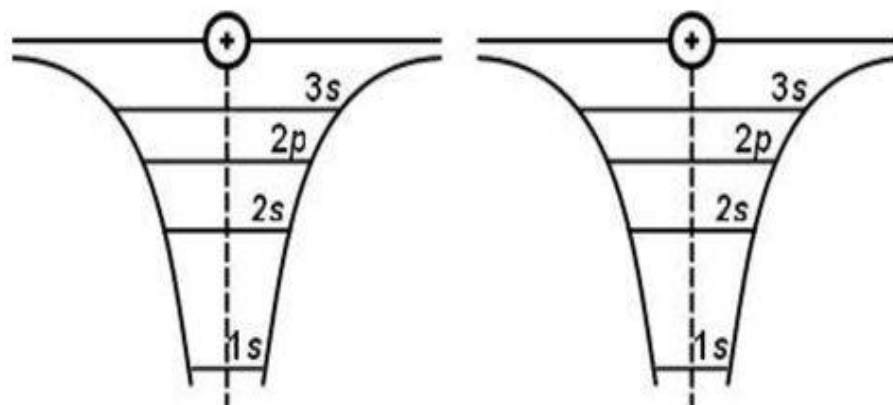


Классическая теория проводимости не смогла объяснить некоторые явления, например, **сверхпроводимость и удельную теплоемкость металлов**. Эти явления может объяснить **зонная теория проводимости**.

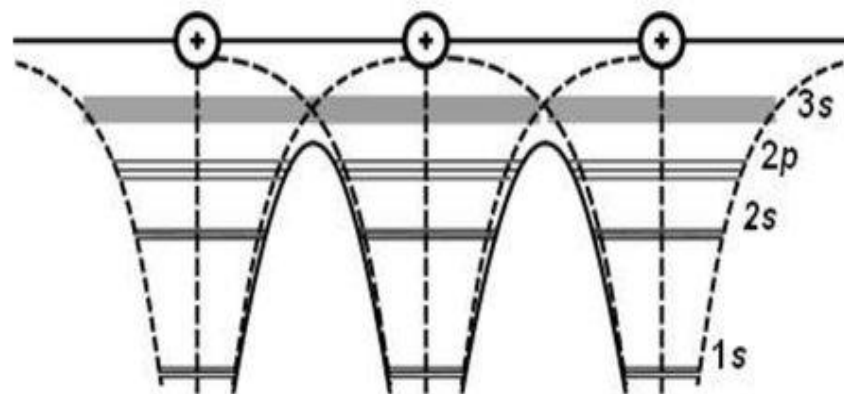
Уровень энергии электрона в атоме расщепляется на ряд близко расположенных подуровней. Это объясняется взаимодействием атомов (ионов) в кристаллической решетке.



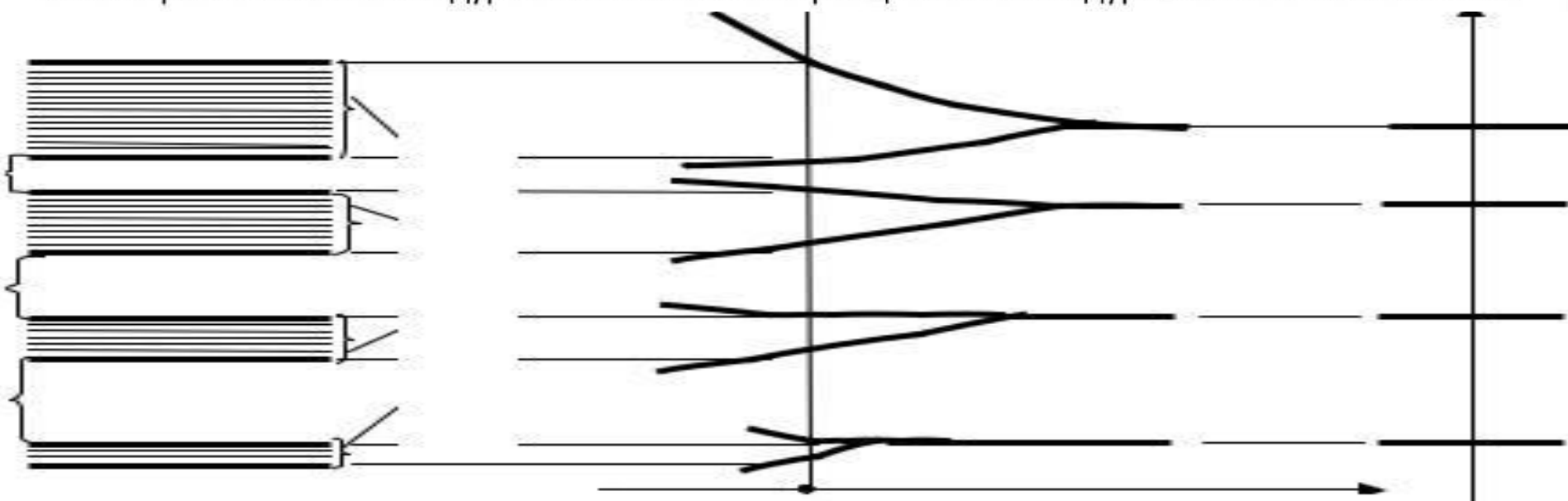
- Уровни в изолированном атоме

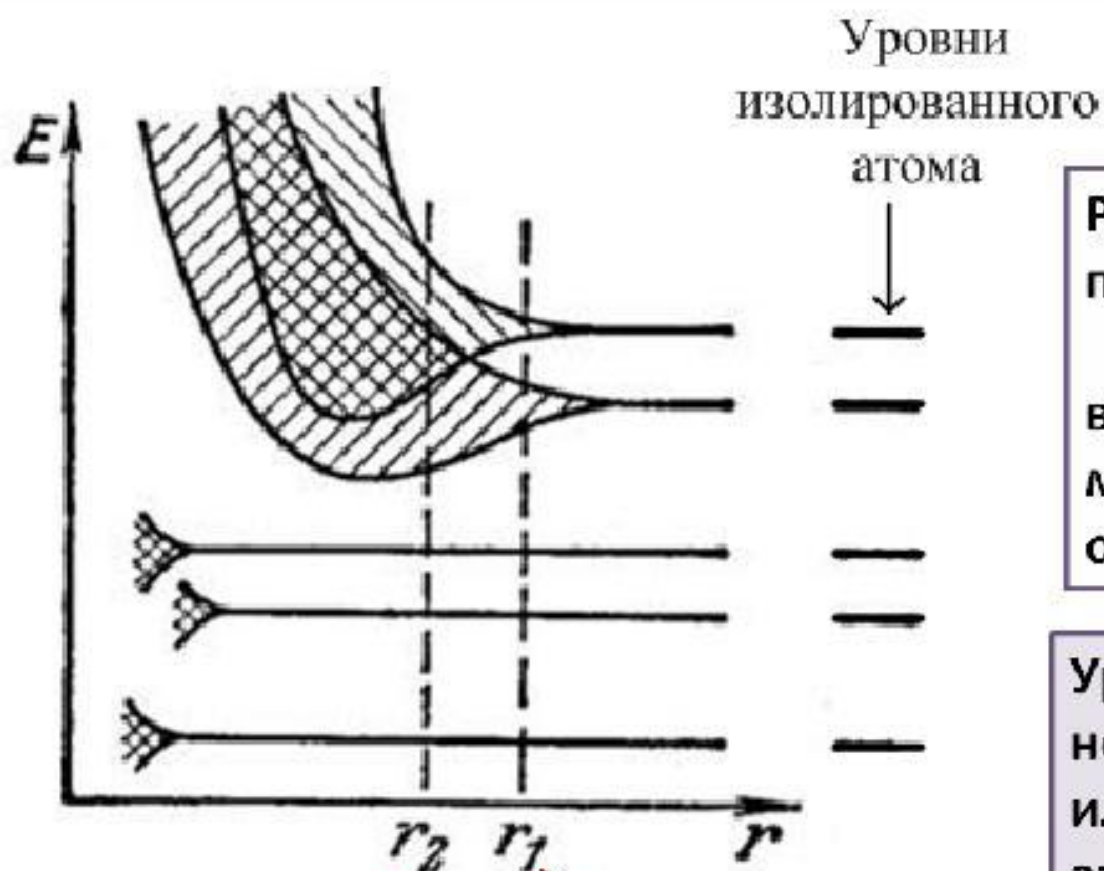


- Образование зон в твердом теле



Таким образом, каждый энергетический уровень изолированного атома расщепляется на ряд близко расположенных подуровней. Эта система расщепленных подуровней называется зоной.





Уровни
изолированного
атома

Расщепление обусловлено
принципом Паули:

в объединённой системе не
может быть двух электронов в
одинаковом состоянии

Уровни расщепляются
независимо от того, заняты они
или свободны в изолированном
атоме

В зависимости от равновесного
расстояния r между атомами возможны
ситуации:

соседние зоны
перекрываются

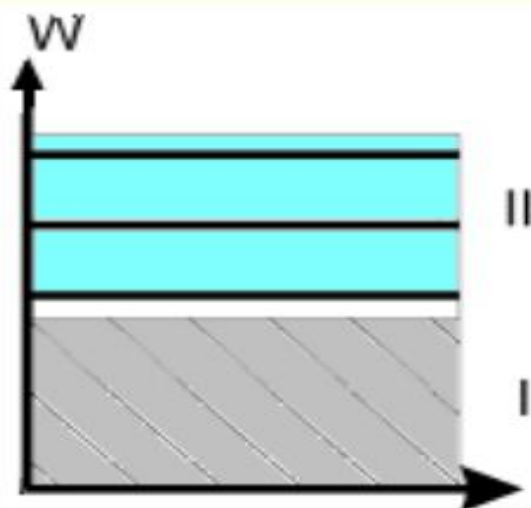
зоны не перекрываются, разделяясь
запрещённой зоной

В зависимости от распределения электронов вещества делятся на три класса:

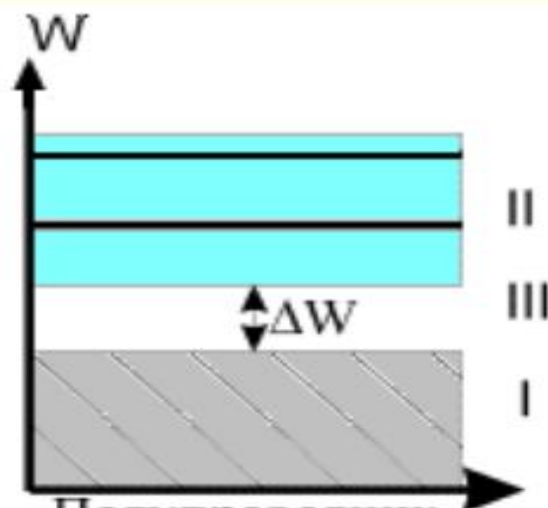
а) диэлектрик;

б) полупроводники;

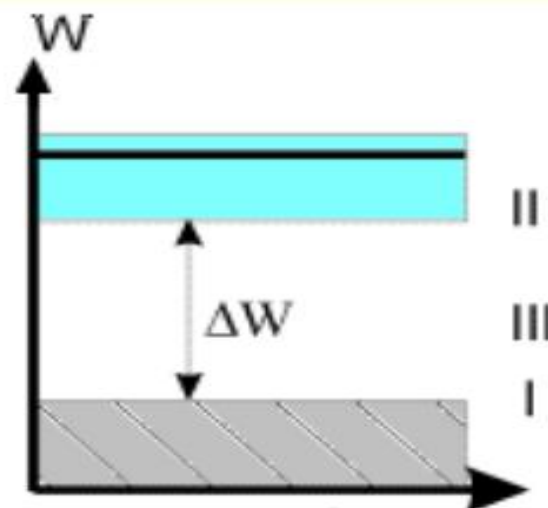
в) проводники (металлы)



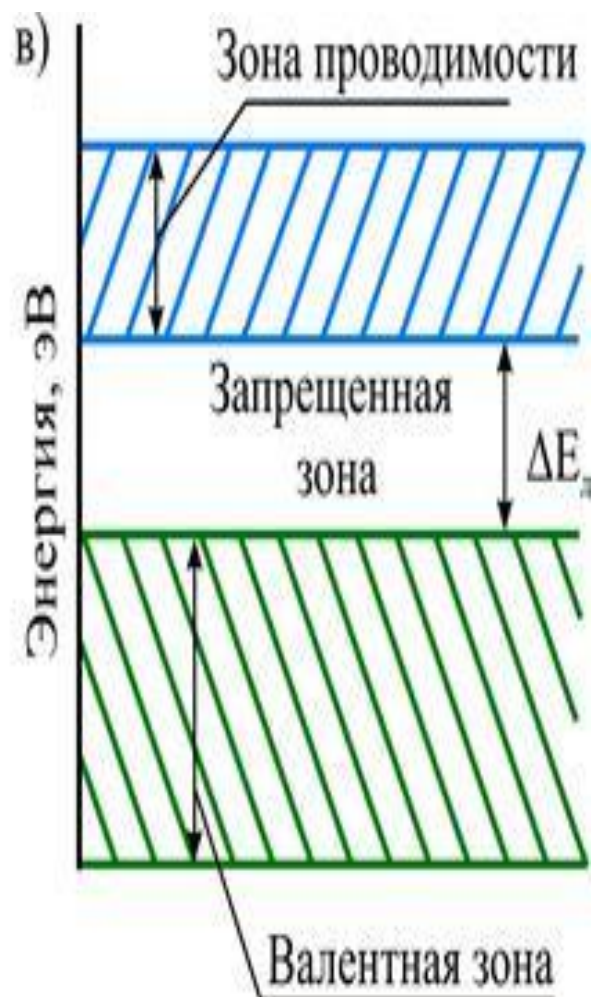
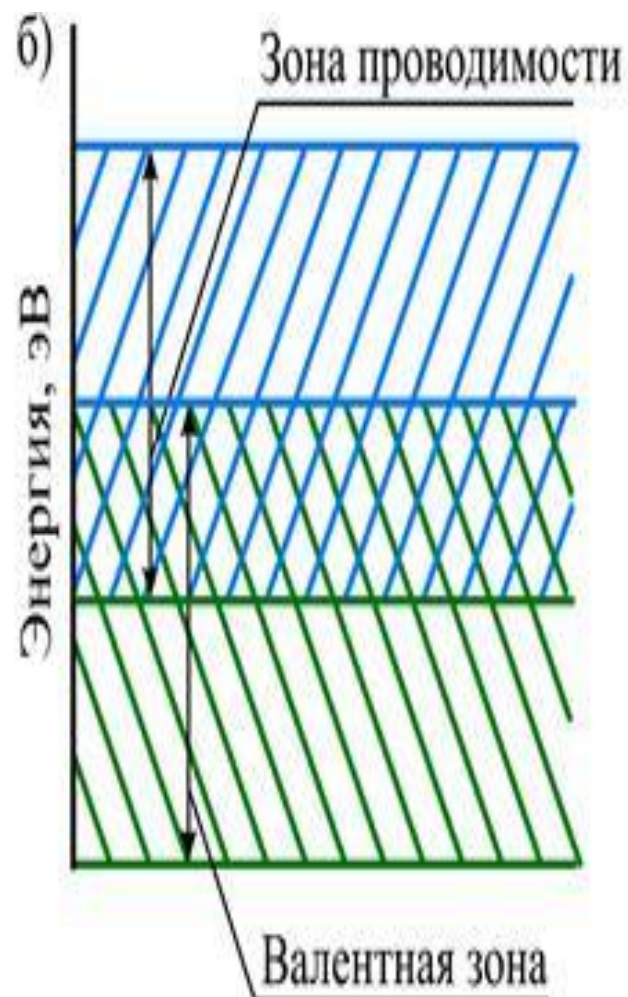
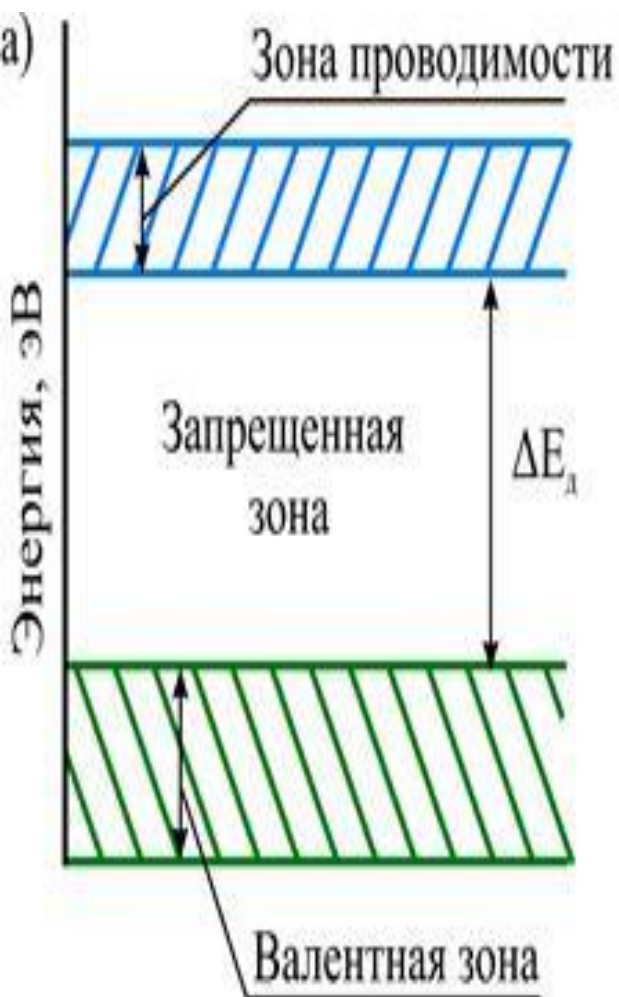
Металл (проводник)
 $\Delta W=0$
(даже при $T=0K$)



Полупроводник
 $\Delta W=1.5-3$ эВ
Уже при комнатной
температура электроны
могут попадать в зону
проводимости



Изолятор (диэлектрик)
 $\Delta W=20$ эВ
При нормальных усло-
виях запрещенная зона
непреодолима.



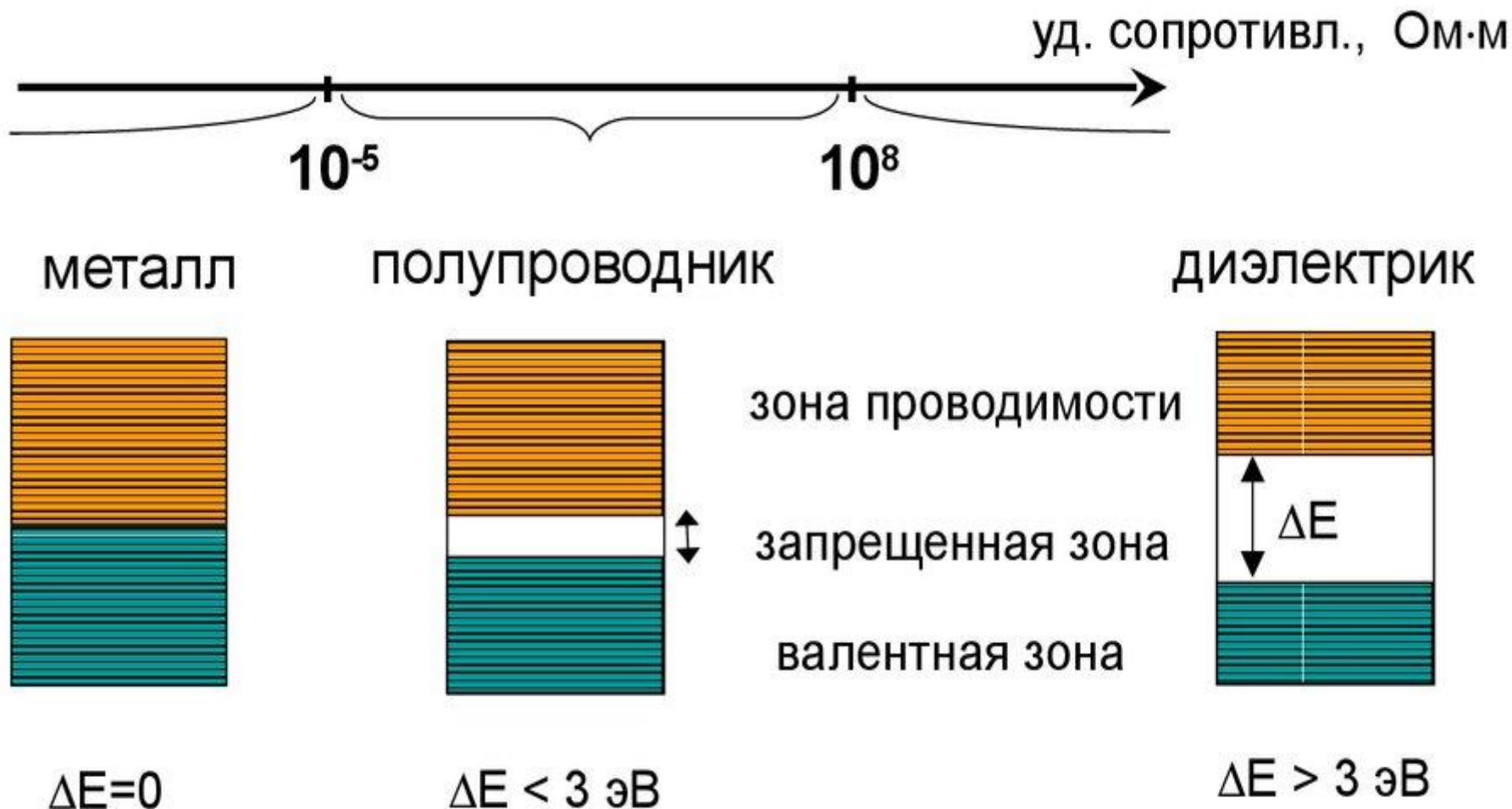
Валентная зона — разрешенная зона энергий, возникшая из тех уровней, на которых находятся валентные электроны в основном состоянии атомов.

Свободная зона — зона возбужденных уровней энергии.

Зона проводимости — зона, валентные электроны которой участвуют в создании тока проводимости.

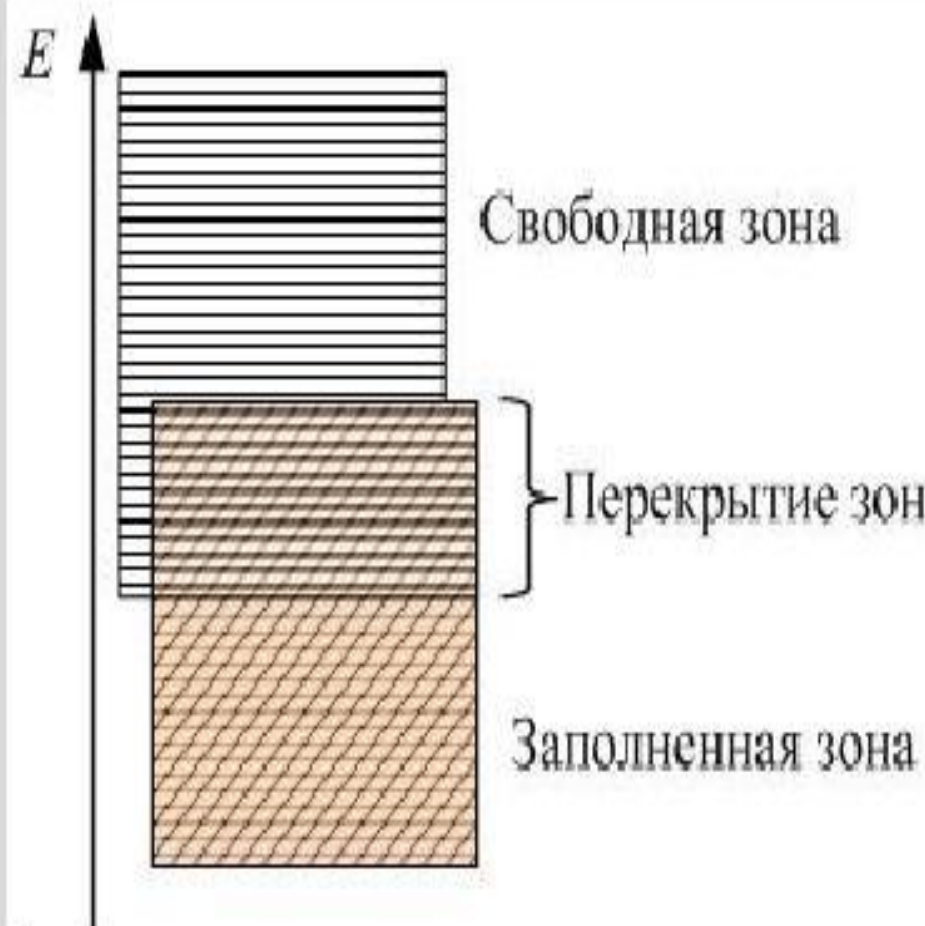
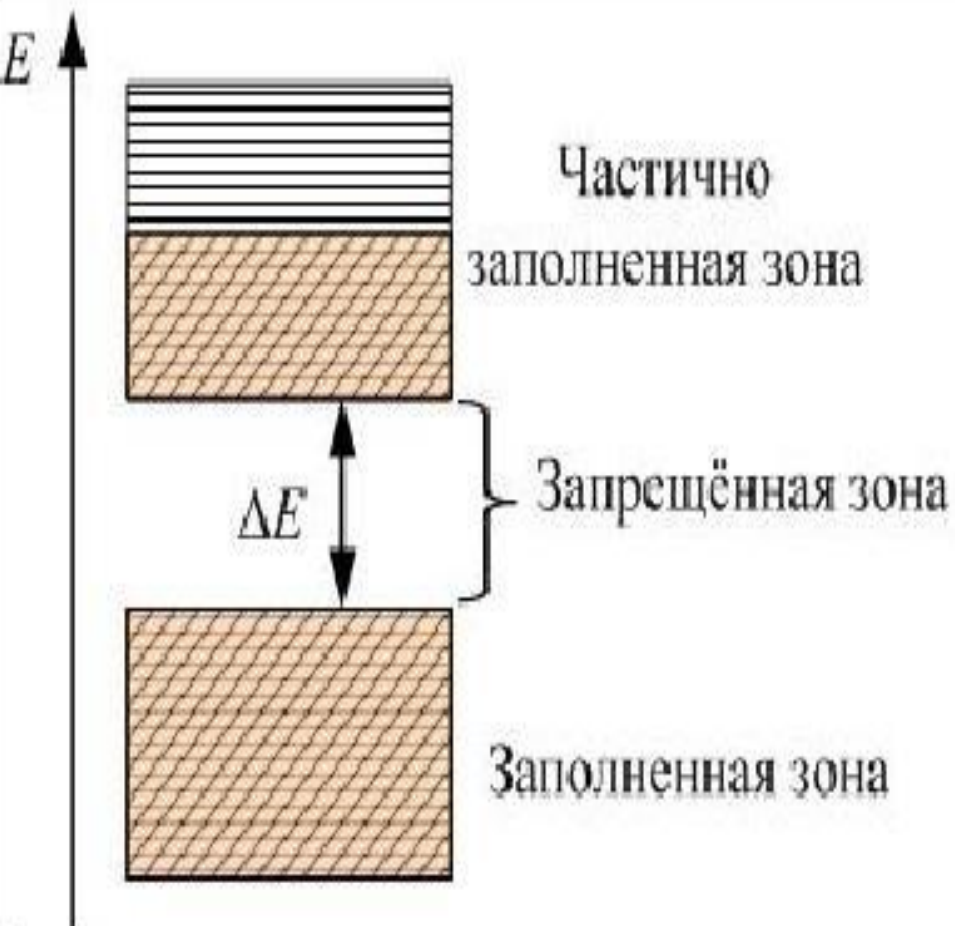


Элементы зонной теории



Металлы, полупроводники, диэлектрики отличаются типом химической связи, зонной диаграммой, величиной удельного сопротивления

Металлы



валентные электроны могут свободно перемещаться по всему объёму

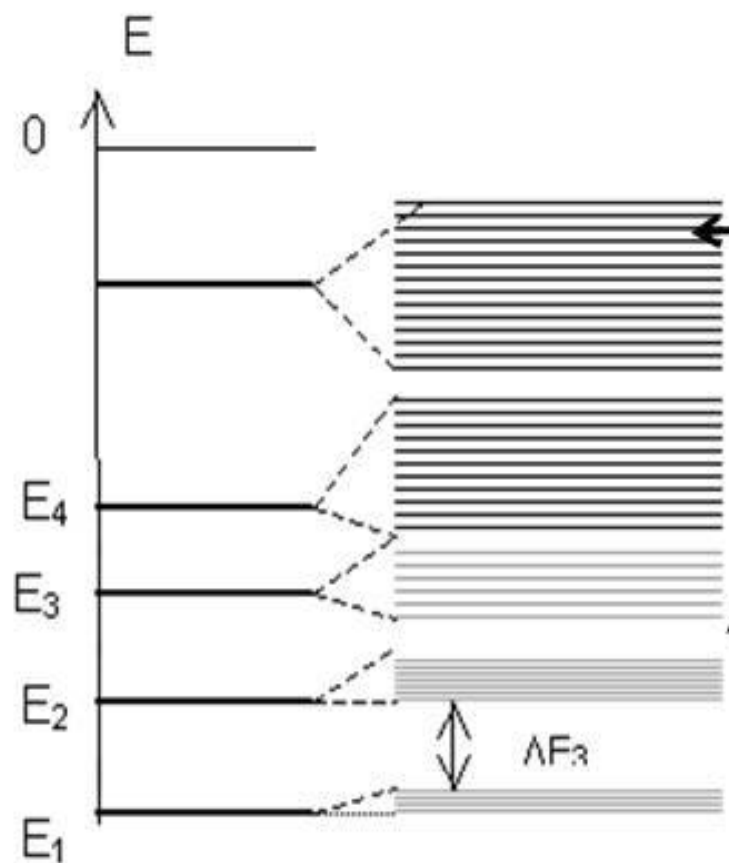
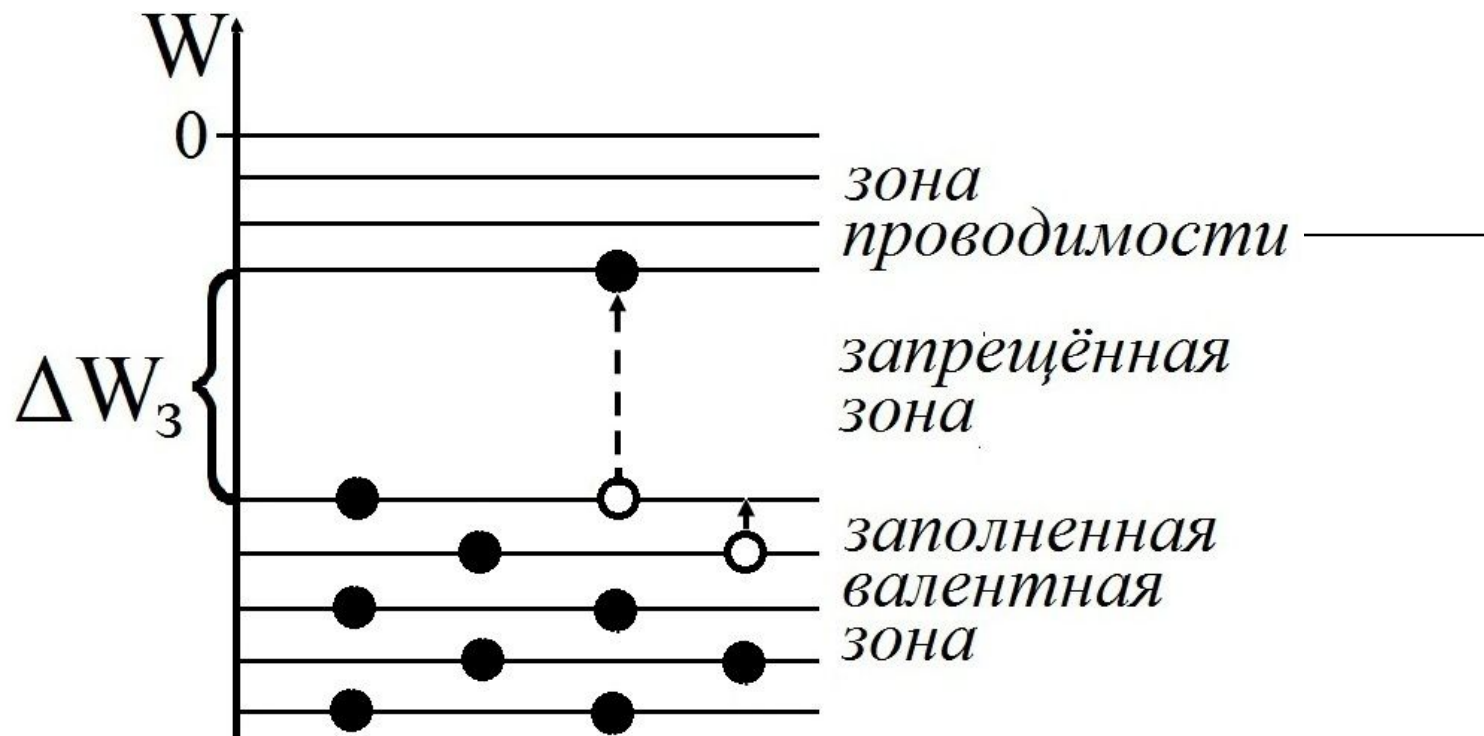


Рис. 1.2. Энергетический спектр электронов в кристалле

Энергетические зоны разделены запрещенными зонами — интервалами запрещенных значений энергии.

На каждом энергетическом уровне могут находиться два электрона, обладающие противоположно направленными спинами.



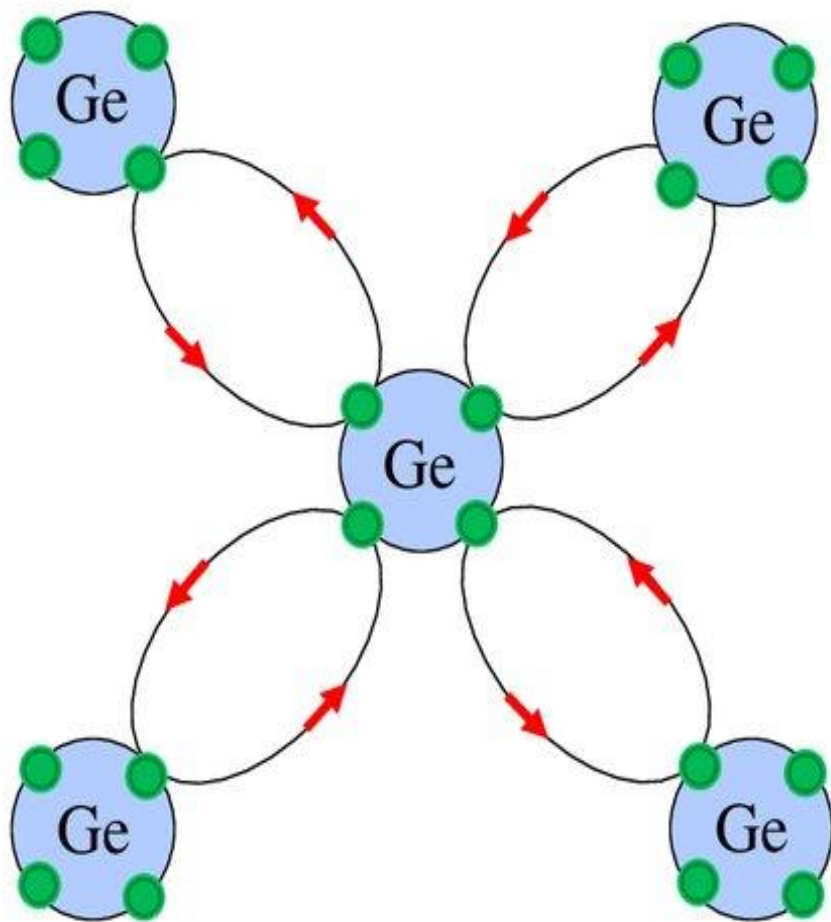
Электроны, находящиеся в составе атома, образуют валентную зону, свободные электроны – **зону проводимости**.

Между валентной зоной и зоной проводимости существует **запрещенная зона**, нахождение электронов в которой запрещено.

Полупроводники. Общие свойства.

Германий - наиболее широко применяется.

На внешней оболочке германия 4 валентных электрона.



Электроны соседних атомов вступают в химические связи.

При $T = 0$ К в чистом германии свободных электронов нет.

Поэтому (при $T = 0$ К) германий хороший изолятор.

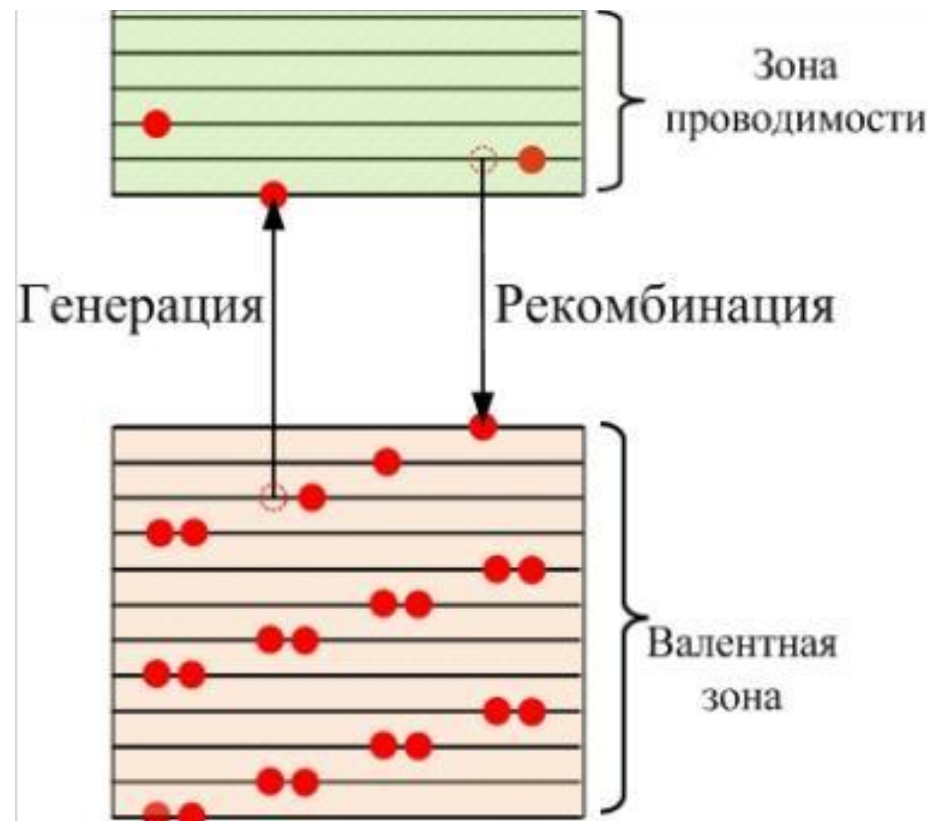
Германий рассеян в природе и дорого стоит.

Кремний – примерно такая же схема. Четыре электрона находятся на внешней оболочке.

В полупроводнике существует динамическое равновесие между двумя процессами:

Генерация свободных электронов и дырок под действием теплового движения;

Рекомбинация, при которой дырки и электроны, встретившись, взаимно уничтожаются как свободные носители заряда

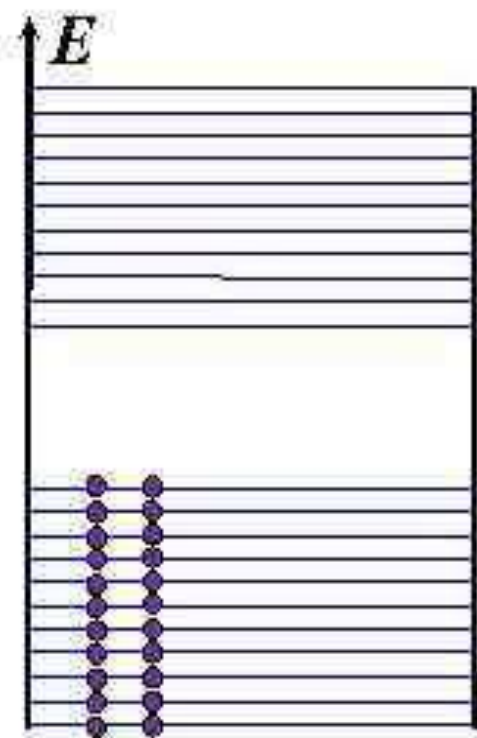


Собственные полупроводники. Проводимость

По типу электропроводности различают *собственные* и *примесные* полупроводники.

Собственные - химически чистые полупроводники, их проводимость - *собственная* проводимость.

При $T = 0\text{ K}$ и отсутствии других внешних факторов собственные полупроводники ведут себя как диэлектрики.



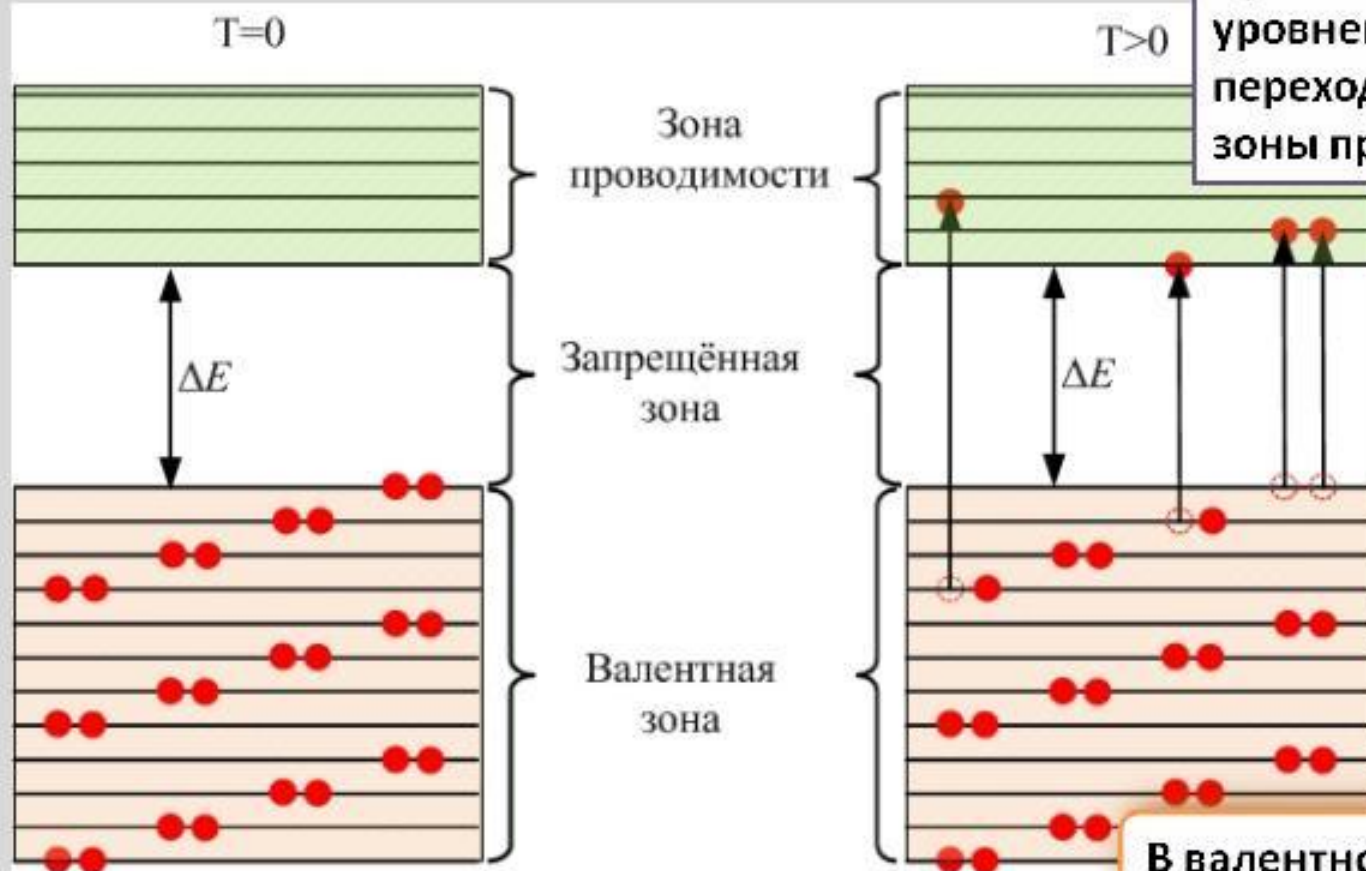
При повышении температуры электроны с верхних уровней валентной зоны могут быть переброшены на нижние уровни зоны проводимости.

При наложении на кристалл электрического поля они приходят в движение и создают электрический ток.

Проводимость собственных полупроводников, которая обеспечивается электронами, - это электронная проводимость или проводимость *n - типа*.

Собственная проводимость полупроводников

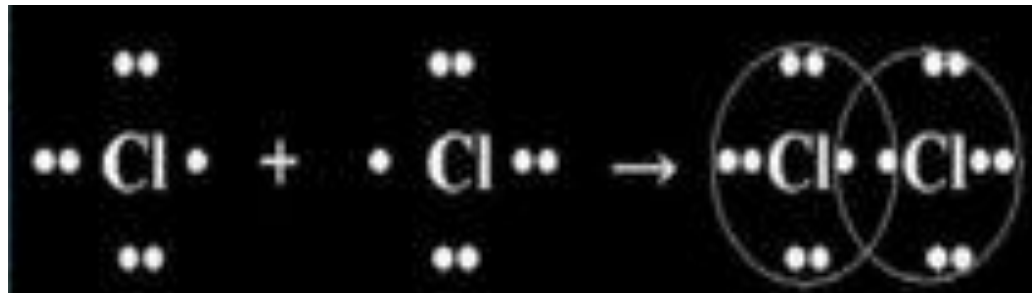
Собственные полупроводники – химически чистые,
без примесей



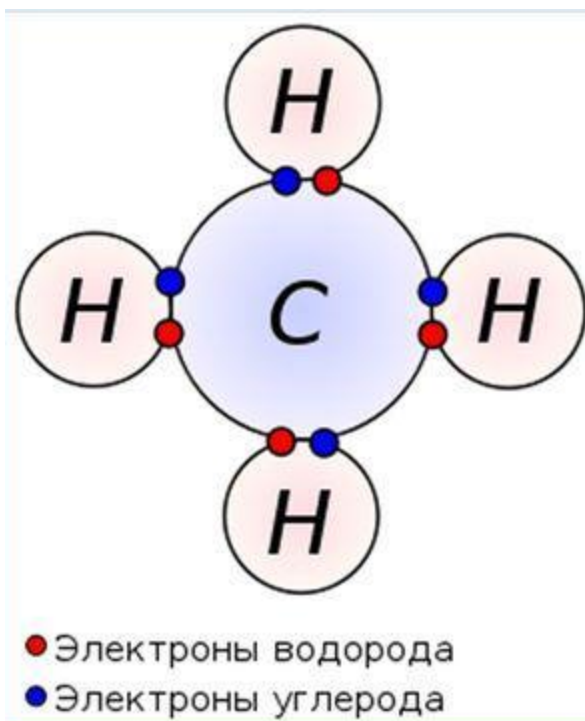
При $T>0$ электроны с верхних уровней валентной зоны переходят на нижние уровни зоны проводимости

В валентной зоне возникают вакансии – дырки
Дырка – это отсутствие электрона, разорванная ковалентная связь

- **Собственными полупроводниками**, называют полупроводники, кристаллическая решетка которых в идеальном случае не содержит примесных атомов другой валентности.
- Атомы в кристаллической решетке полупроводника расположены упорядоченно на таких расстояниях друг от друга, что их **внешние электронные оболочки перекрываются** и у электронов соседних атомов появляются общие орбиты, посредством которых образуются **ковалентные СВЯЗИ**.



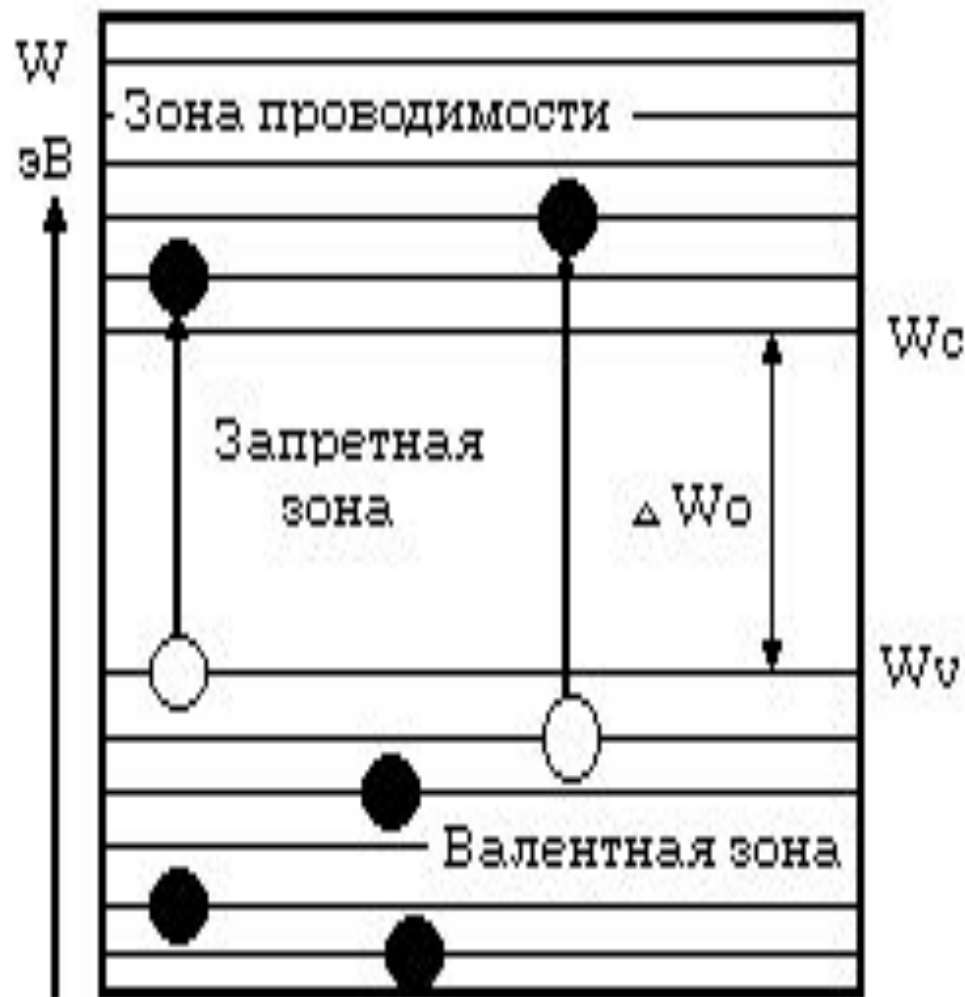
Если валентность атомов равна четырем, то вокруг каждого из атомов, помимо четырех собственных, вращаются еще четыре «чужих» электрона, вследствие чего вокруг атомов образуются прочные электронные оболочки, состоящие из **ВОСЬМИ обобществленных валентных электронов**.



- Энергетические расстояния между уровнями зоны в реальных случаях не превышают 10^{-17} эВ (разрешенные зоны практически можно считать сплошными).
- Нижние энергетические уровни атомов обычно не образуют зон, так как внутренние электронные оболочки слабо взаимодействуют в твердом теле.

В связи с этим нижние уровни сохраняют свою «индивидуальность», и их показывают на зонной диаграмме в виде штриховой линии, где каждый штрих как бы соответствует одному атому.

Собственная проводимость полупроводников



- Электропроводность химически чистых п/п называется **собственной проводимостью**
- Примеры: **Ge, Se, Si.**

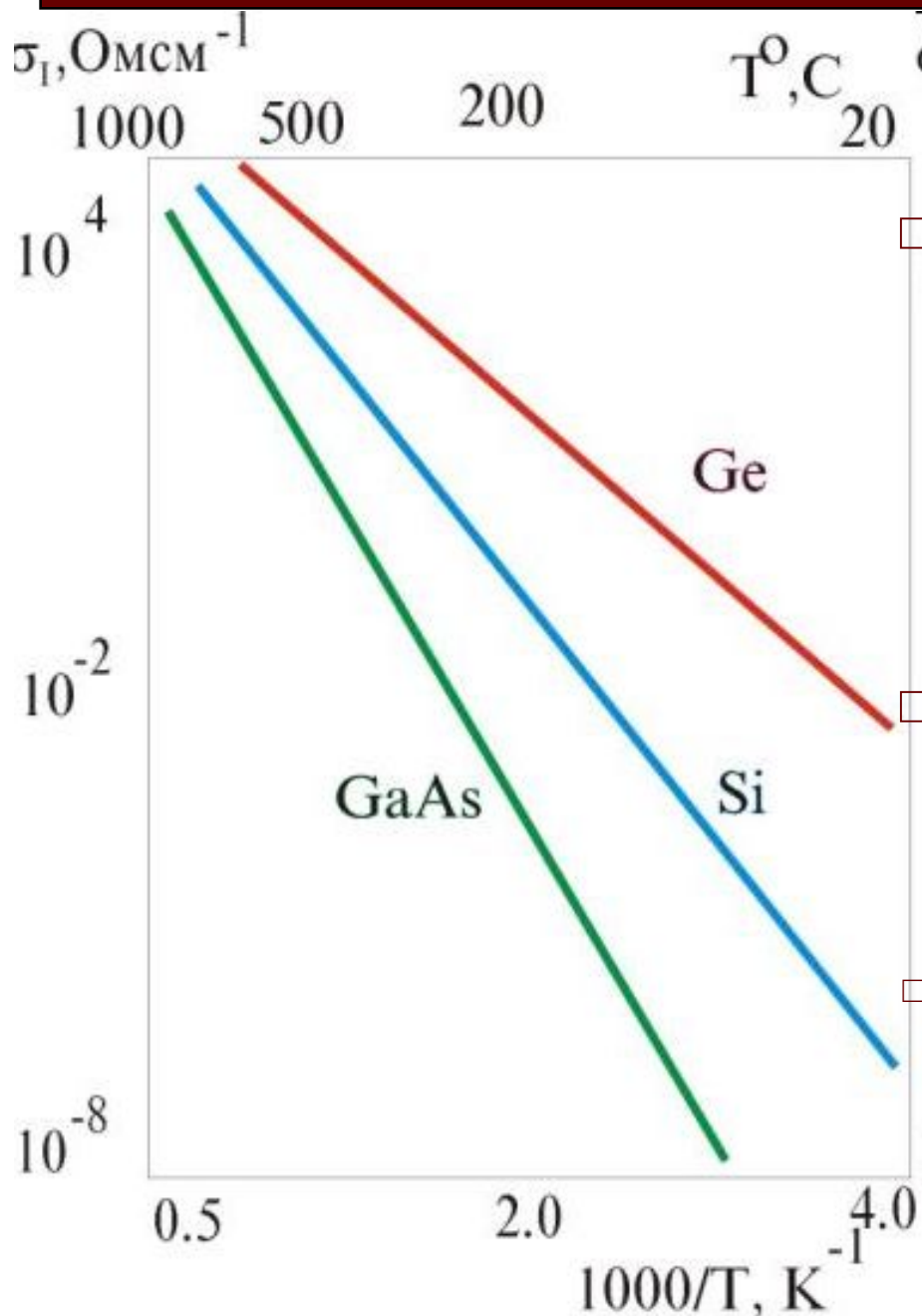
Проводимость полупроводников

- Изменение электропроводности может быть связано с изменением концентрации носителей заряда и их скорости.
- В большинстве случаев влияние концентрации носителей заряда на электропроводность более сильное.

Проводимость полупроводников

- В полупроводниках, в которых отсутствуют дефекты и примеси с ростом температуры электропроводность растёт по экспоненциальному закону:

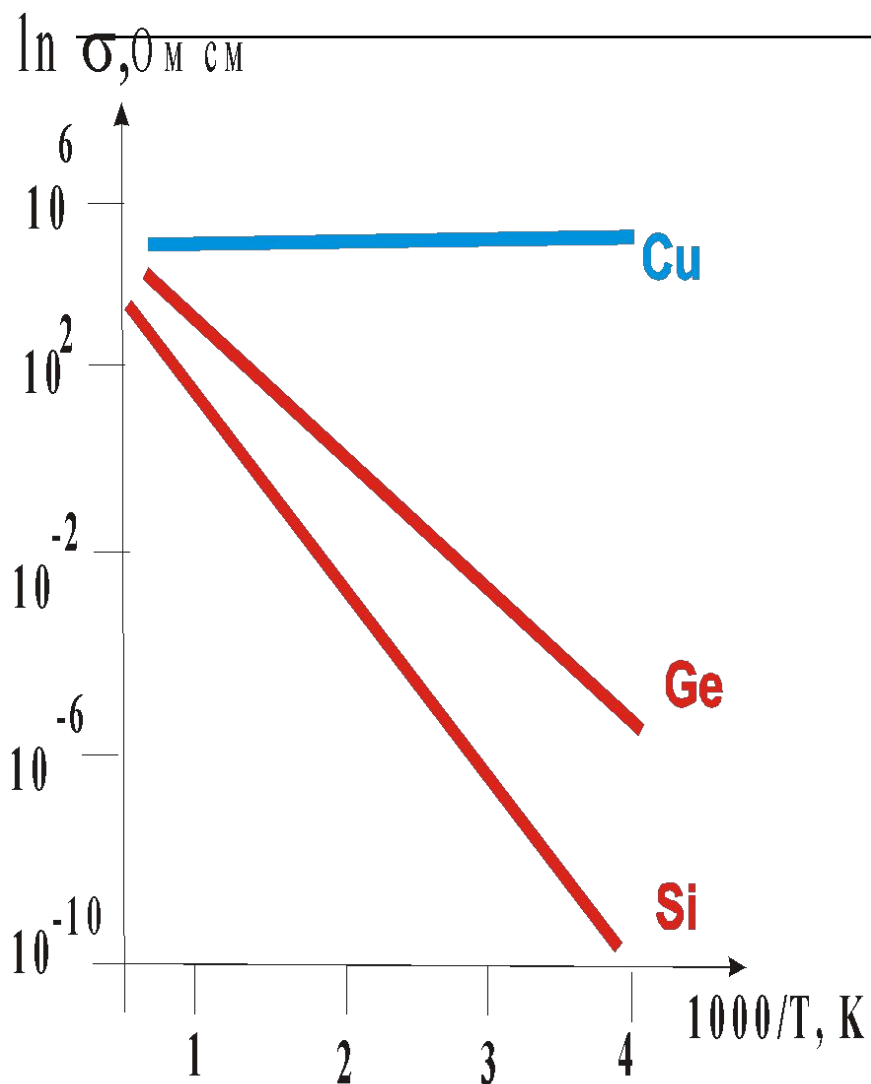
$$\sigma(T) \approx \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W}{kT}}$$



Чем больше ширина запрещенной зоны, тем меньше абсолютное значение проводимости

Чем больше ширина запрещенной зоны, тем сильнее проводимость зависит от температуры (больше наклон).

Зависимость электропроводности нелегированных материалов от температуры



логарифм проводимости
линейно зависит от ($1/T$),

- **наклон прямой линии** определяется величиной **ΔW**

Удельная электропроводность полупроводников

- Удельная электропроводность полупроводников с ростом температуры растёт по экспоненциальному закону



$$\gamma = \gamma_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W_0}{2kT}\right)$$

**ширину запрещённой зоны
можно определить
по наклону прямой**

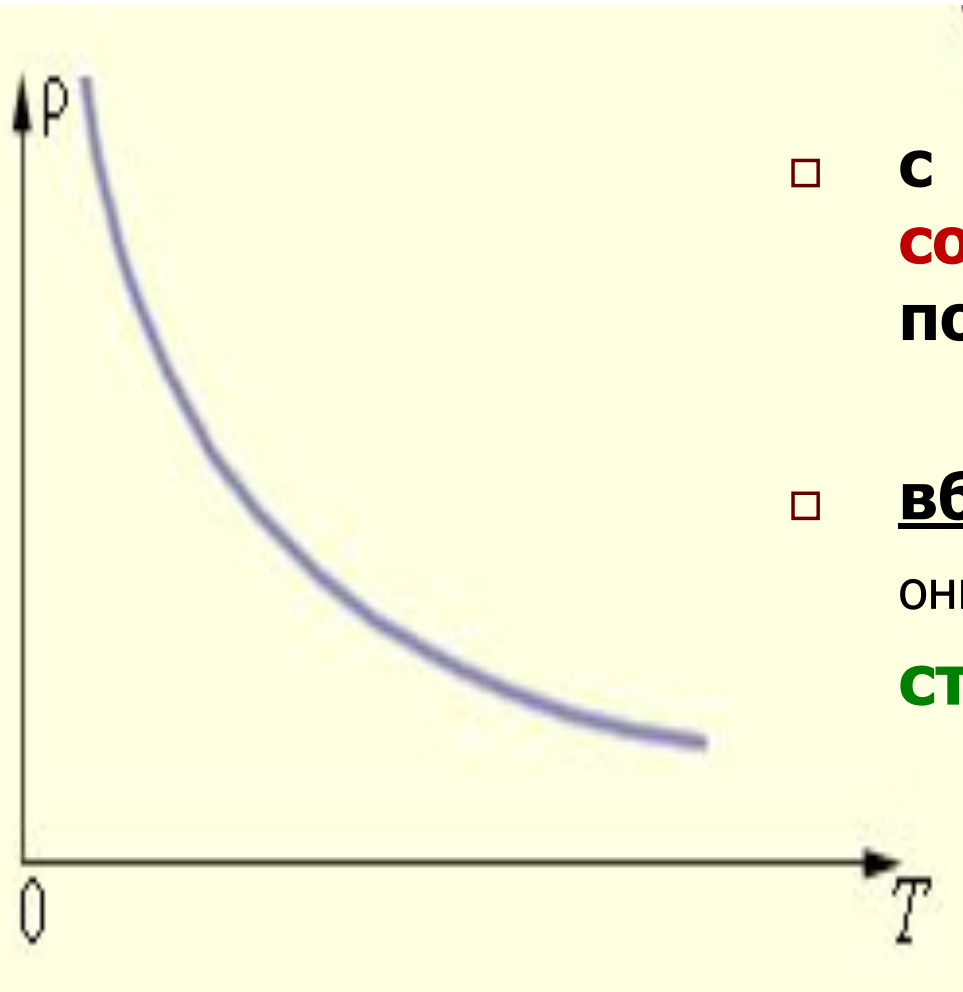
Объяснение с точки зрения зонной теории

- С ростом температуры растёт число электронов, которые вследствие теплового возбуждения переходят в зону проводимости и участвуют в проводимости.



- удельная проводимость собственных полупроводников с повышением температуры растёт.

Зависимость **удельного сопротивления** чистого полупроводника от **температуры**



- с понижением температуры **сопротивление** чистого полупроводника **возрастает**
- вблизи абсолютного нуля
они практически **становятся изоляторами**

Примесные полупроводники. Электропроводность

Положительный заряд (дырка) локализован на этом ионе и перемещаться по решетке не может.

При температуре около 300 K большинство атомов фосфора ионизировано. В полупроводнике появляются свободные электроны.

Эти электроны обеспечивают *электронную проводимость (проводимость n – типа)* в примесном полупроводнике.

Атомы примеси, валентность которых на единицу больше валентности основных атомов, и которые отдают избыточные электроны в объем полупроводника, называются *донорами*.

Примеры донорных примесей в германий – фосфор, мышьяк, сурьма.

ЗАПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ

Примесные полупроводники отличаются наличием в узлах решетки атомов посторонних примесей или других дефектов

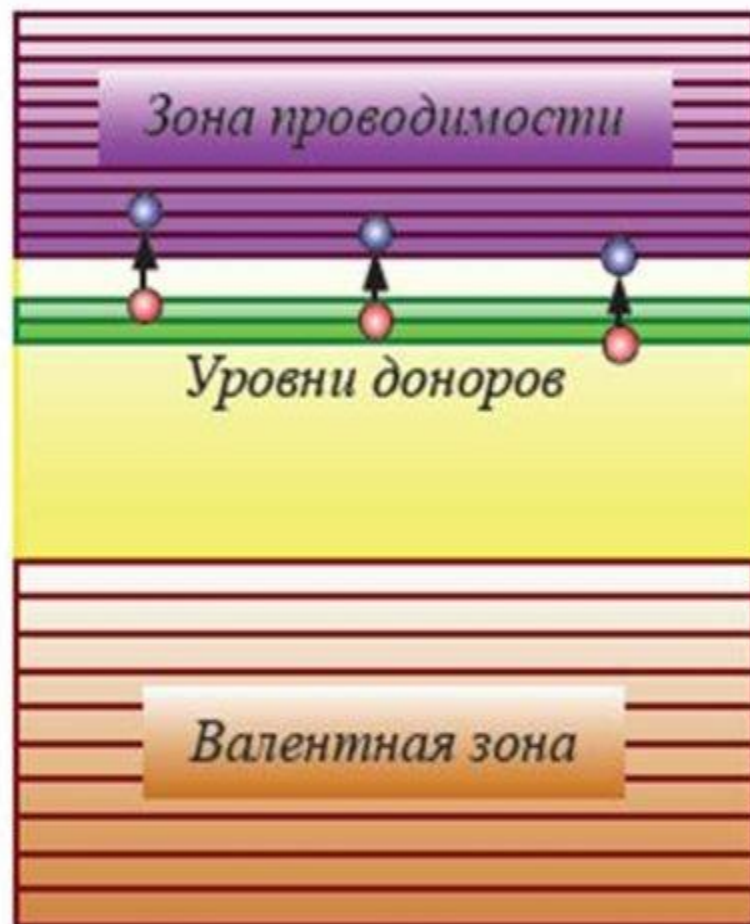


Примесные уровни, передающие электроны в зону проводимости называют **донорными уровнями**, а полупроводник - **донором**

Примесные уровни, на которые могут переходить электроны валентной зоны, называют **акцепторными уровнями**, а полупроводник - **акцептором**

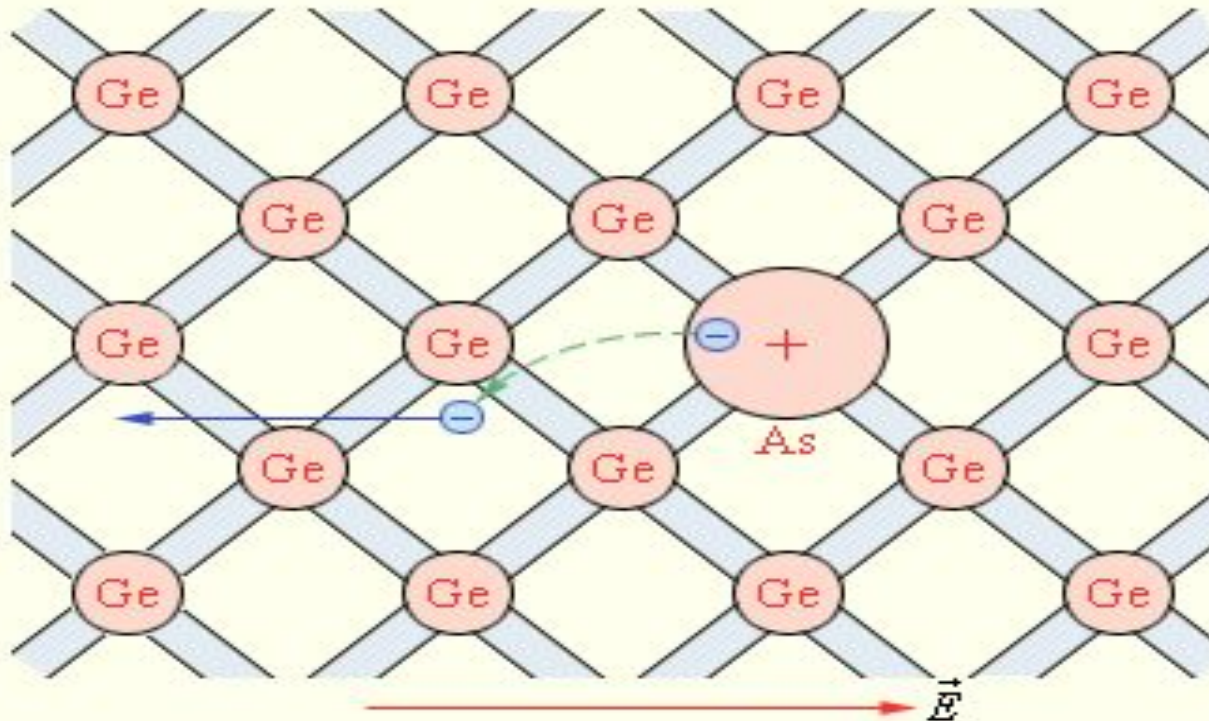
Донорные примеси

Донор – это примесный атом, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, занятый в невозбужденном состоянии электроном и способный в возбужденном состоянии отдать электрон в зону проводимости.



Зонная диаграмма
полупроводника с
донорными примесями

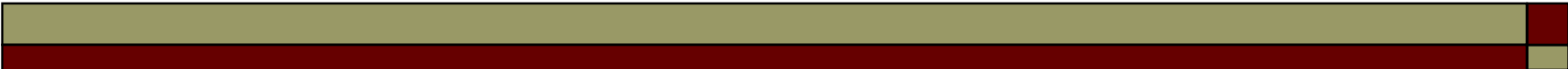
Электронная проводимость полупроводников



Электронная проводимость
в кристалл с **четыrehвалентными** атомами
введены **пятивалентные** атомы
(например, в кристалл **Ge** введены атомы **As**).

Донорная примесь

- **Примесь** из атомов **с валентностью, превышающей валентность основных атомов** полупроводникового кристалла, называется **донорной примесью**.
- В результате ее введения в кристалле появляется значительное число свободных электронов.
- Это приводит к резкому уменьшению удельного сопротивления полупроводника – в тысячи и даже миллионы раз.

- 
-
- Проводимость, обусловленная свободными электронами, называется **электронной**, а **полупроводник, обладающий электронной проводимостью** –

полупроводником n – типа

- Удельное сопротивление проводника с большим содержанием примесей может приближаться к удельному сопротивлению металлического проводника.

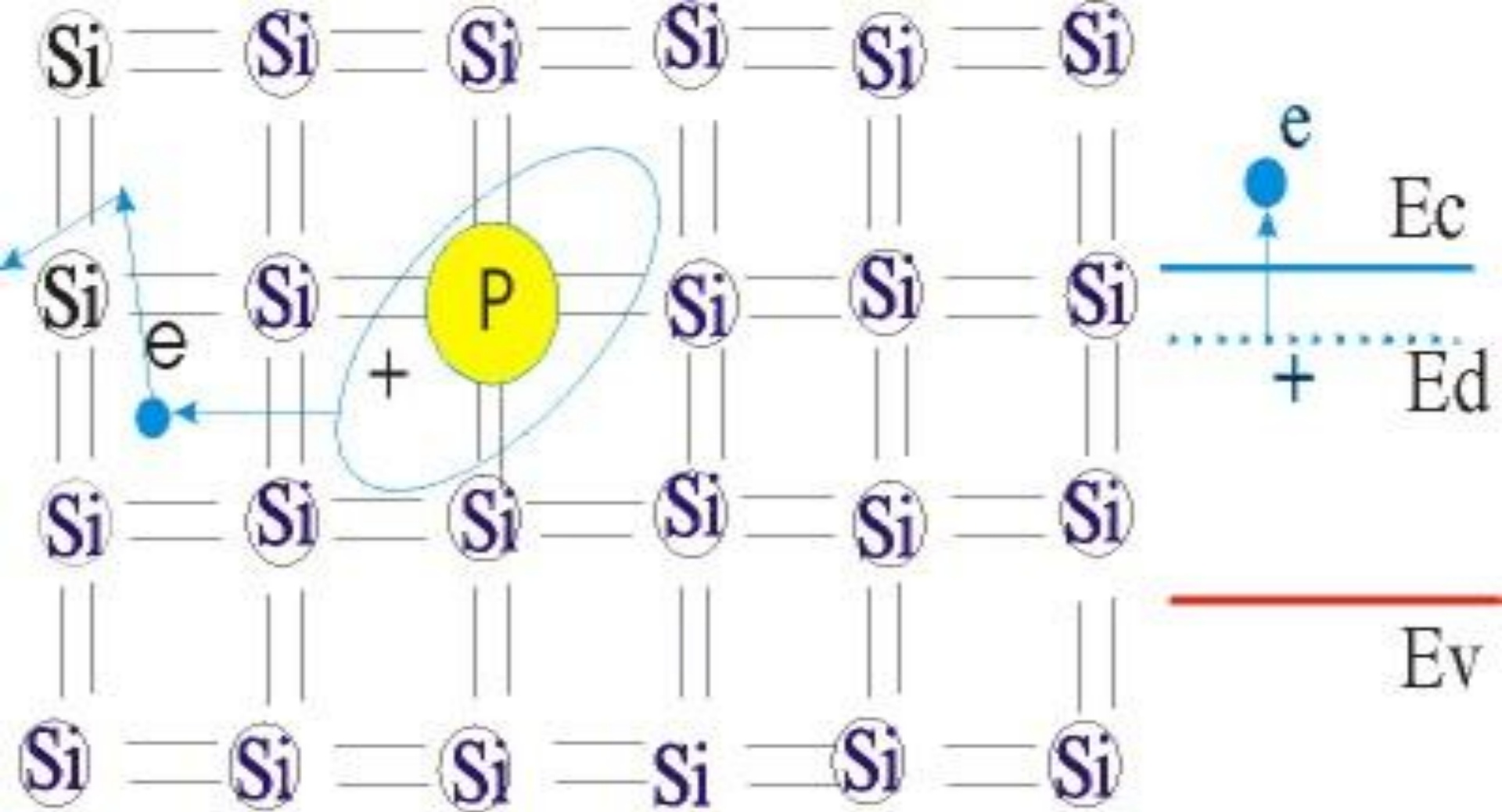


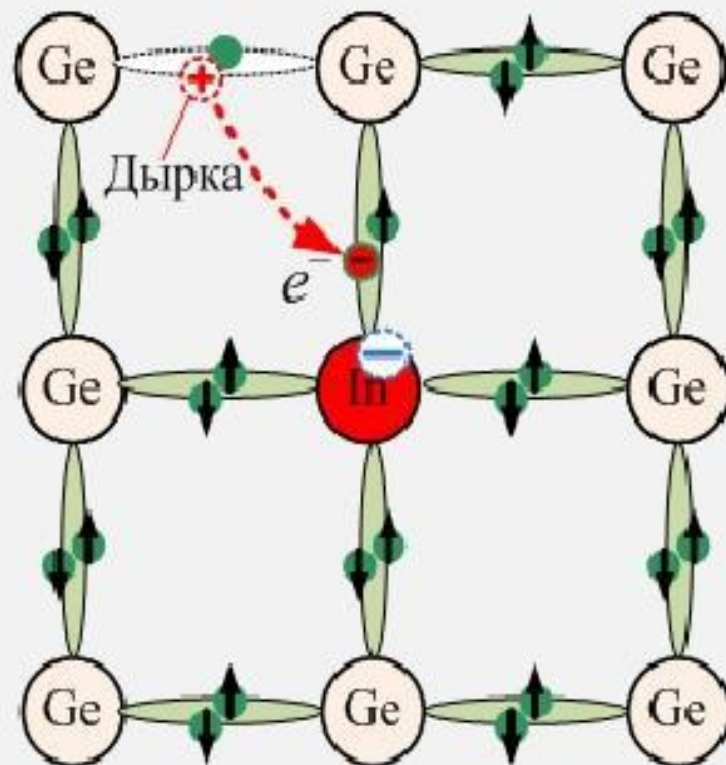
Схема образования свободного электрона и
 заряженного **донорного атома**
 при легировании **Si** элементами **V** группы
 п. с. Д.И.Менделеева

полупроводники (*p*-тип)

Валентность примеси меньше,
чем основного материала

Пример
:

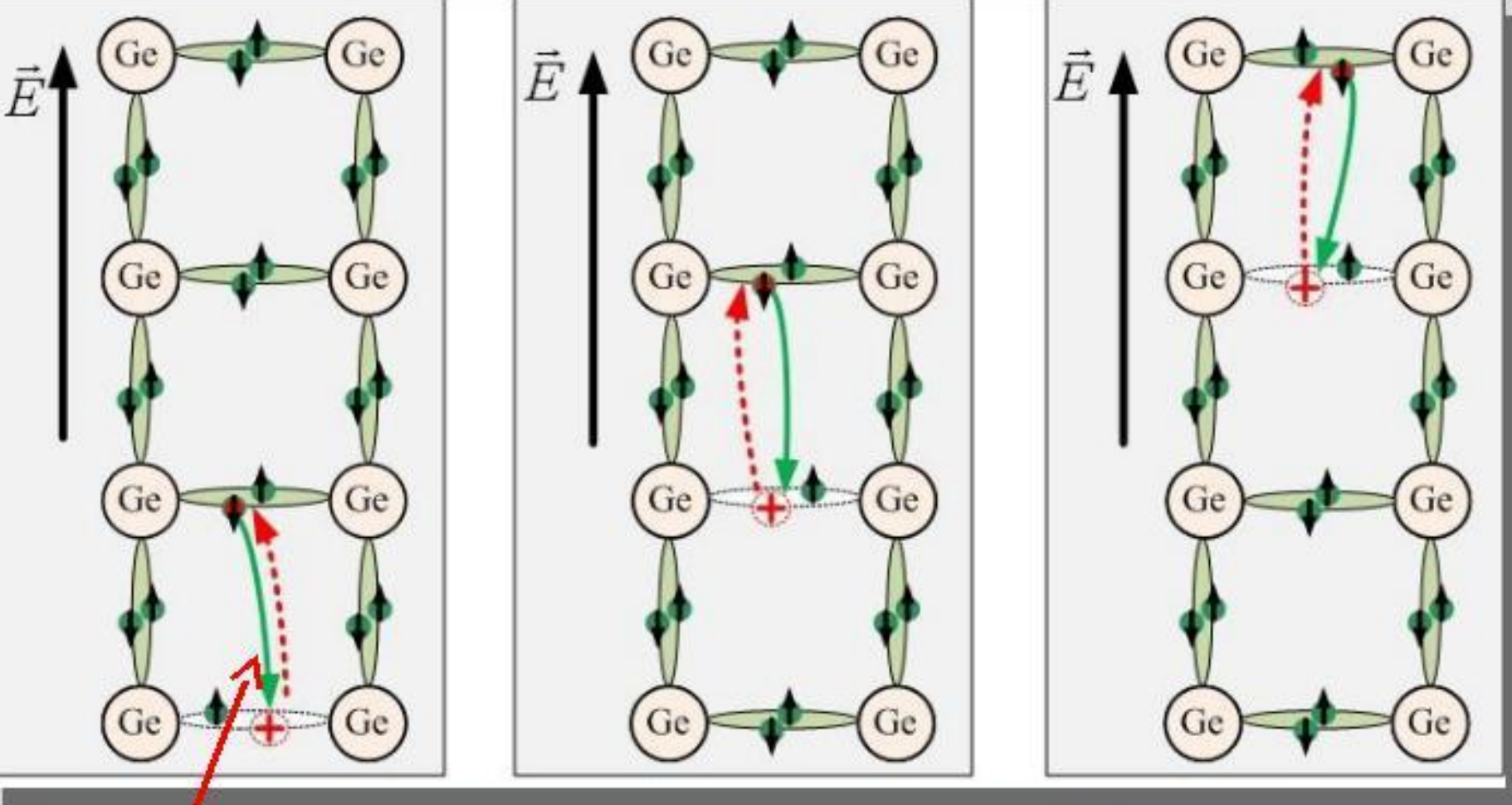
**В 4-валентный германий
добавили 3-валентный
индий**



Для образования четвёртой связи захватывается электрон,
образовавшийся при разрыве связи между двумя атомами германия

Получается дырка, а атом примеси превращается в отрицательный ион

Основные носители – дырки,
неосновные – электроны (их мало)
Примесь называется акцепторной



Дырка перемещается, когда перемещаются электроны

В собственном полупроводнике действует два механизма проводимости: дырочный и электронный

Концентрация дырок равна концентрации электронов: $n_p = n_n$

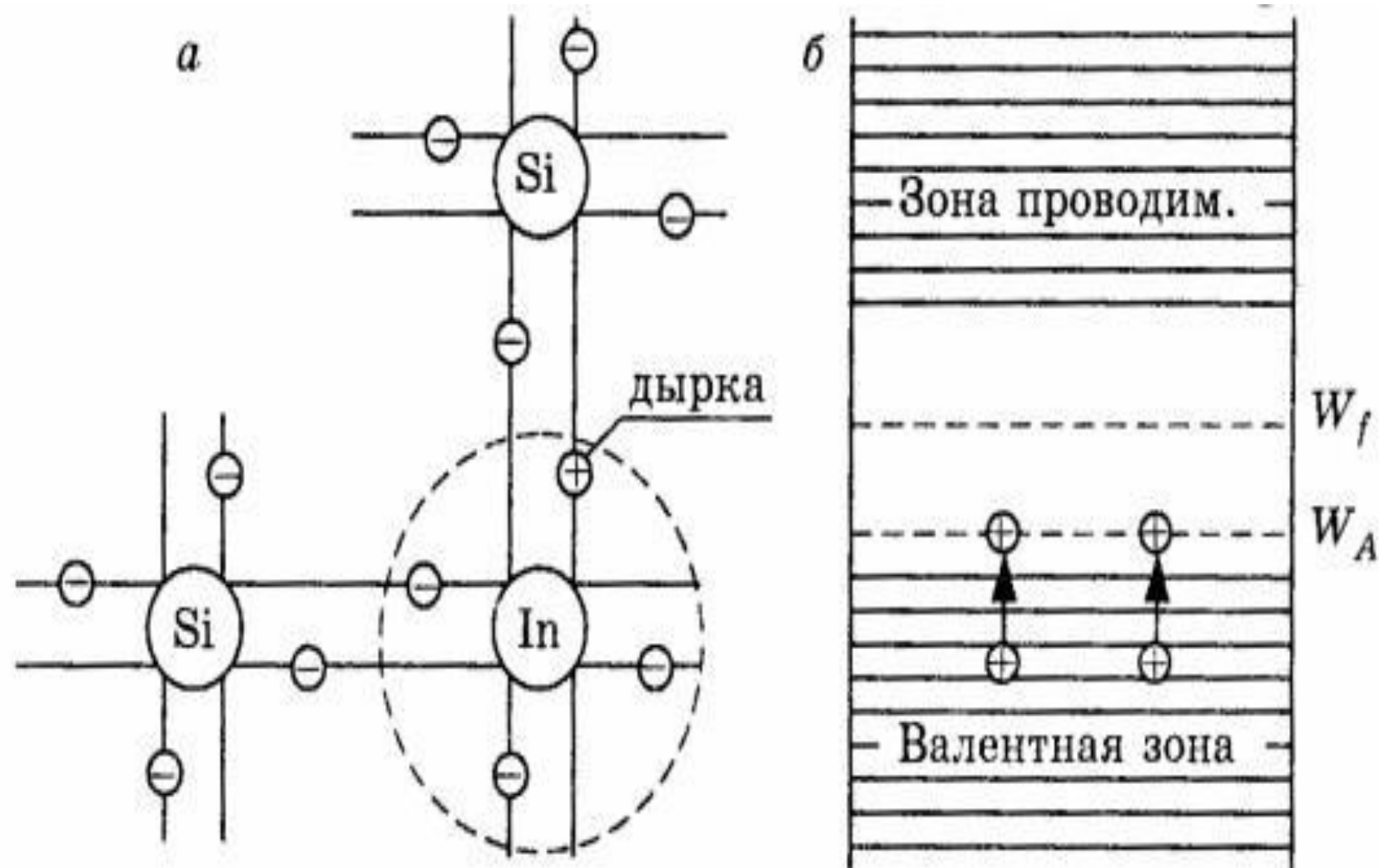
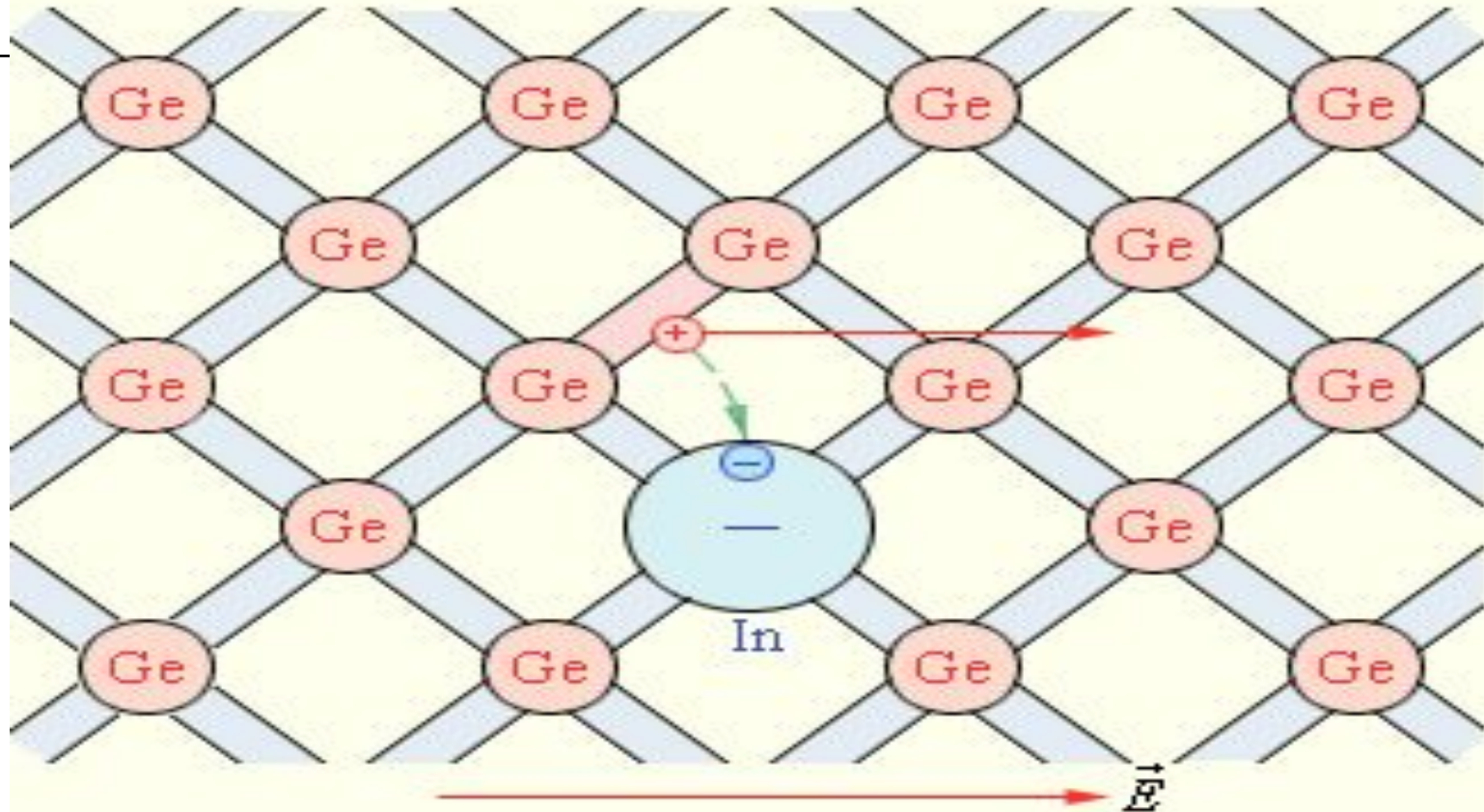


Рис.2.3. Структура и зонная диаграмма полупроводника с акцепторной примесью

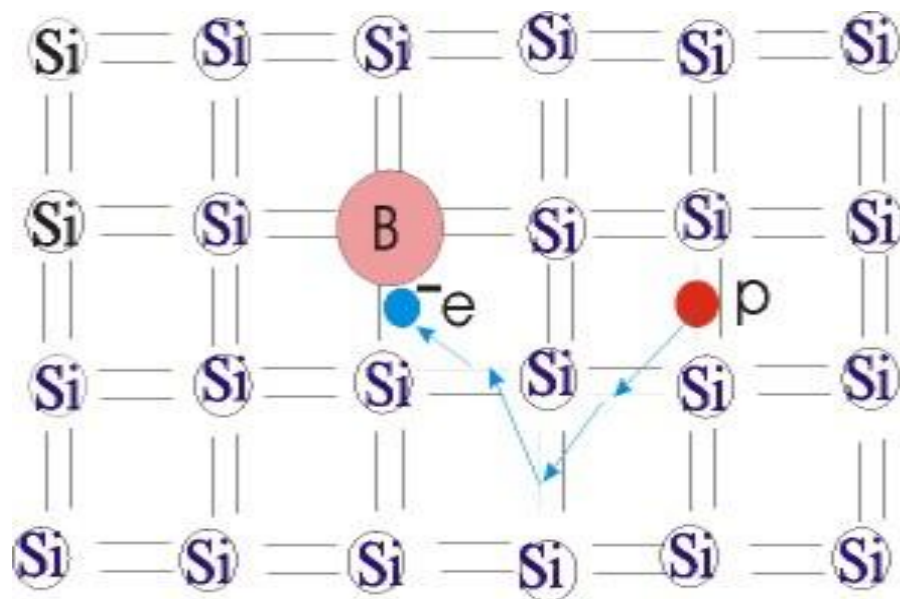
Дырочная проводимость полупроводников

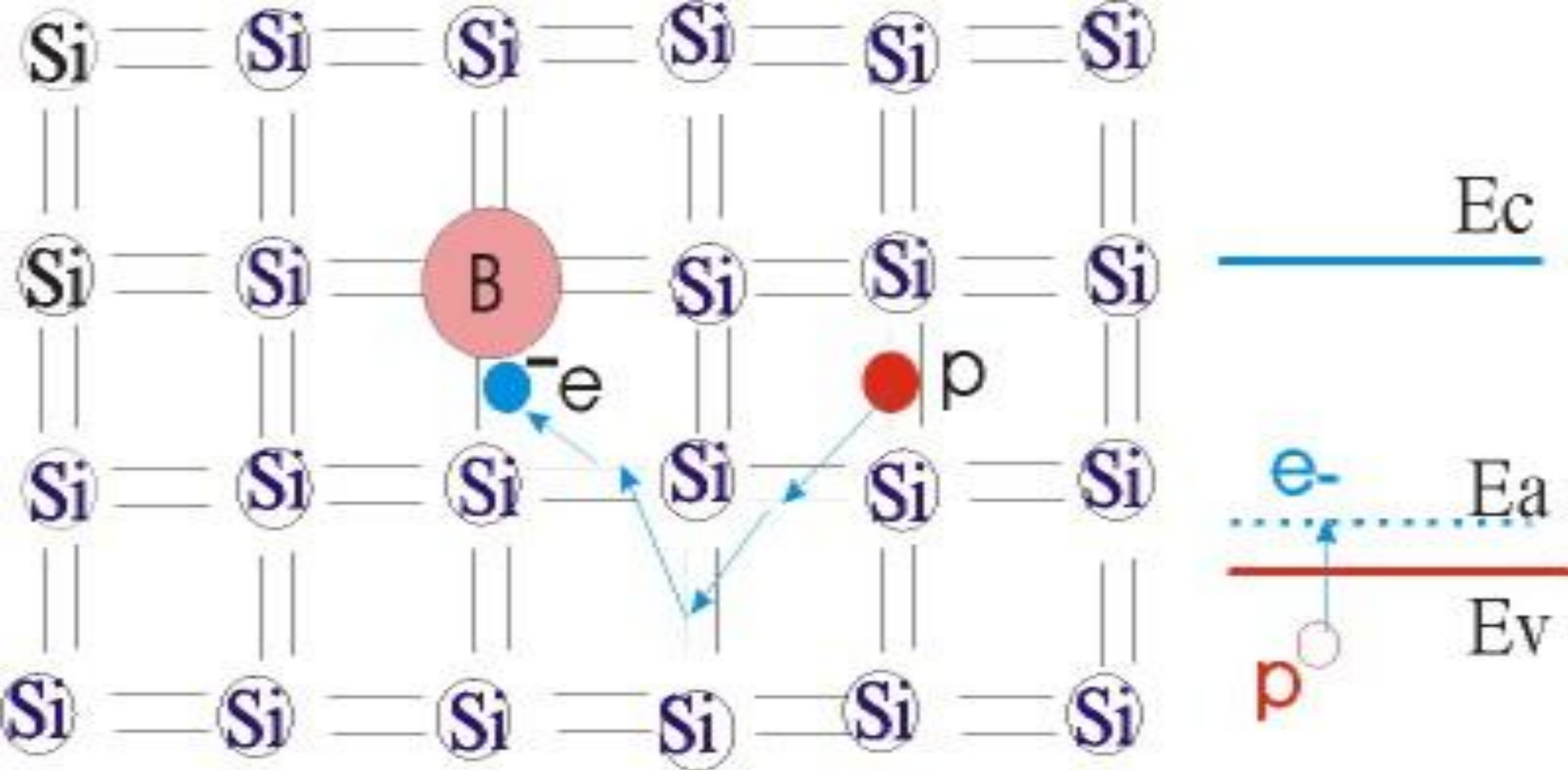


- **Дырочная проводимость** возникнет при введении в кристалл **Ge** трехвалентного атома **In**.

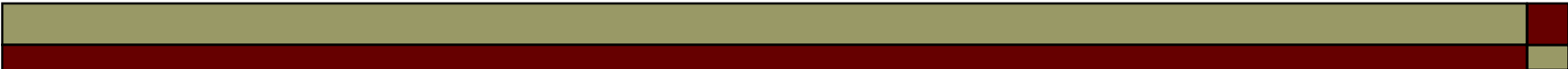
Акцепторы

- Элементы **III** группы – **акцепторы** – имеют **3** валентных электрона, которые образуют связи с соседними атомами S_i .
- Четвертая связь может образовываться, если к атому **B** перейдет еще один электрон от одного из его ближайших соседей.

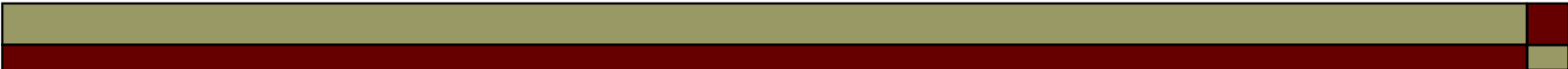




- Схема образования **свободной дырки** и **заряженного акцепторного атома**
- при легировании **Si** элементами **III** группы периодической системы Д.И. Менделеева

- 
-
- Энергия такого перехода невелика, поэтому энергетический уровень принимающего (акцепторного) электрона расположен вблизи валентной зоны.

 - При этом атом бора ионизуется, заряжаясь отрицательно, а в том месте, откуда ушел электрон, образуется положительно заряженная дырка, которая может участвовать в переносе заряда.

- 
- Примесь атомов, способных захватывать электроны, называется **акцепторной**.

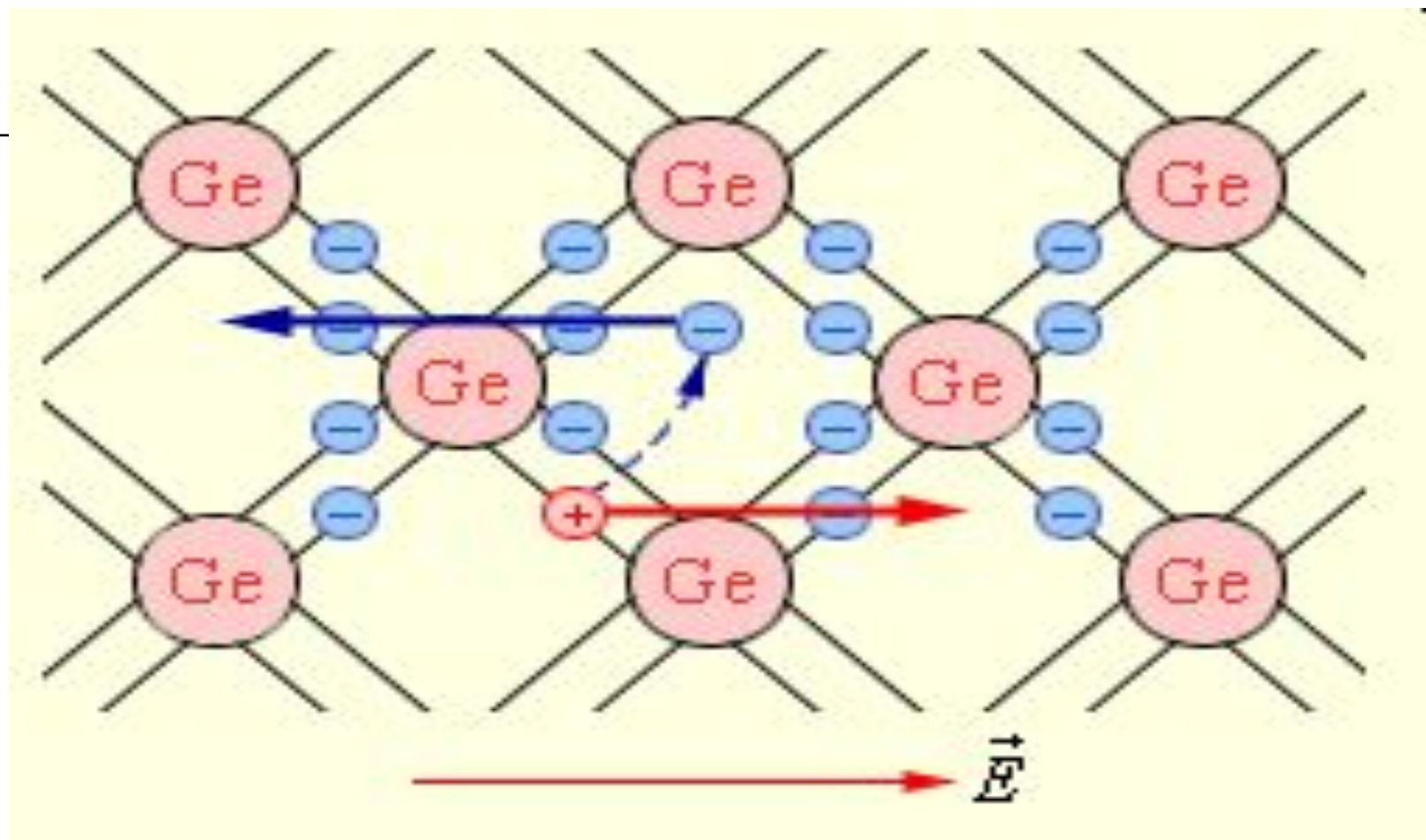
 - В результате введения акцепторной примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются вакантные места (**дырки**).
 - На эти места могут перескакивать электроны из соседних ковалентных связей, что приводит к хаотическому блужданию дырок по кристаллу.

- Концентрация дырок в полупроводнике с акцепторной примесью **значительно превышает концентрацию электронов**, которые возникли из-за механизма собственной электропроводности полупроводника:

$$n_p \gg n_n$$

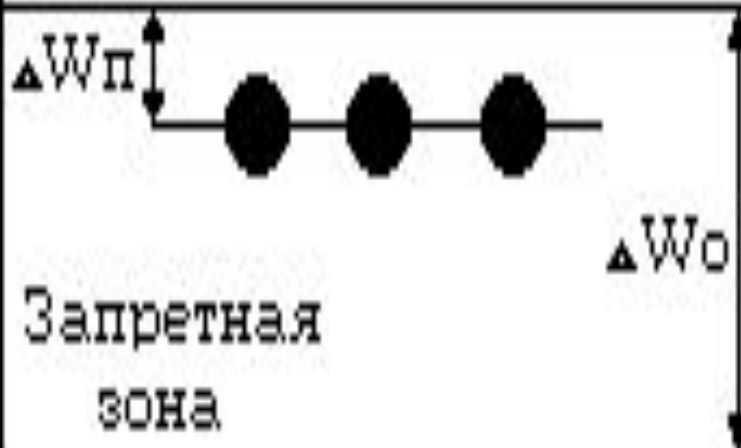
- Проводимость такого типа называется **дырочной проводимостью**.
- Примесный полупроводник с дырочной проводимостью называется **полупроводником p - типа**.
- Основными носителями свободного заряда в полупроводниках **p - типа** являются **дырки**.

Электронно - дырочные пары



- Парно-электронные связи в кристалле германия и образование **электронно-дырочной** пары.

Зона проводимости



Валентная зона

Энергетическая диаграмма
полупроводника,
содержащего
донорные примеси

Зона проводимости

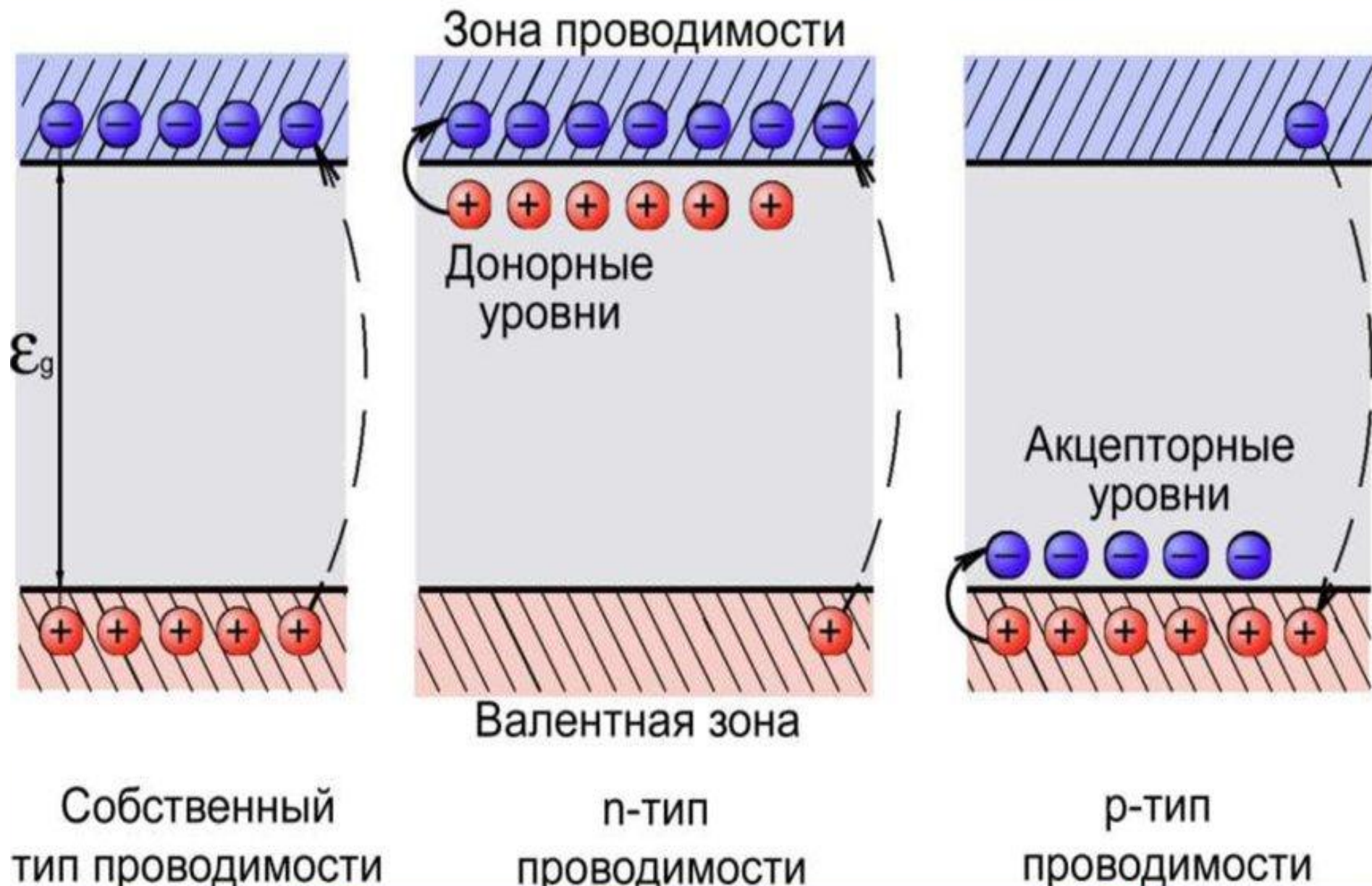
Запретная
зона

ΔW_0

$\Delta W_{\text{П}}$

Валентная зона

**Энергетическая диаграмма
полупроводника,
содержащего
акцепторные примеси**



Атом



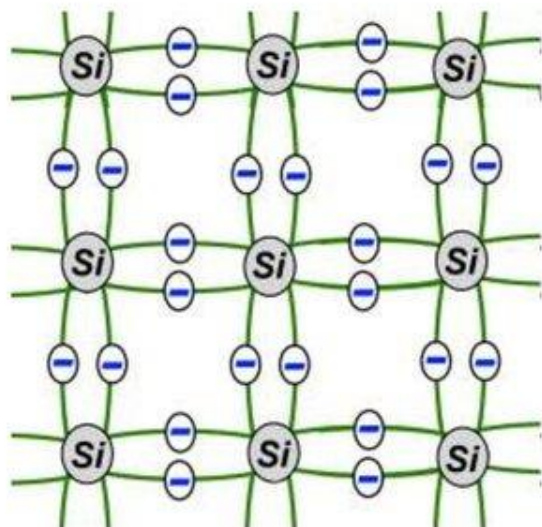
Кристалл



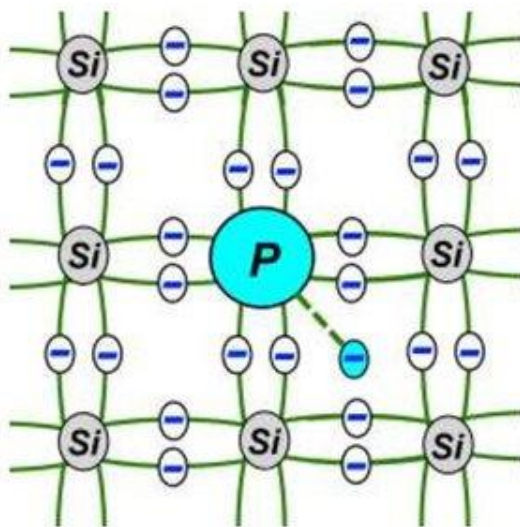
Зонная теория



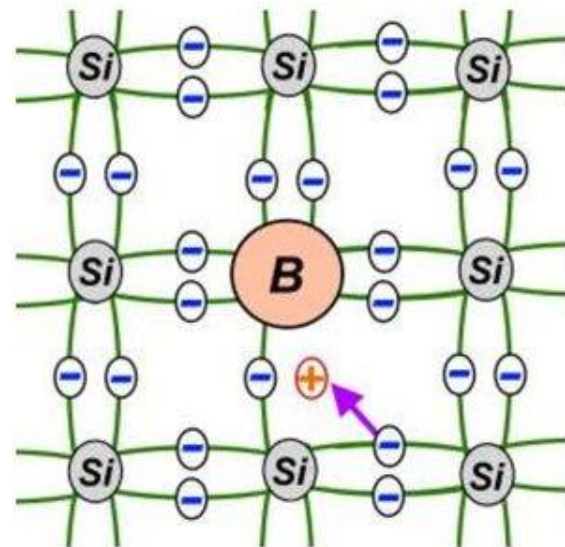
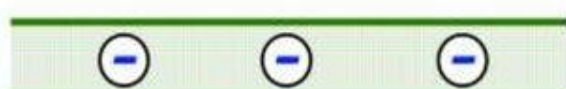
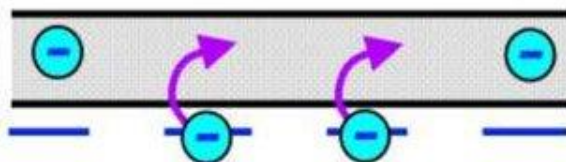
Применение



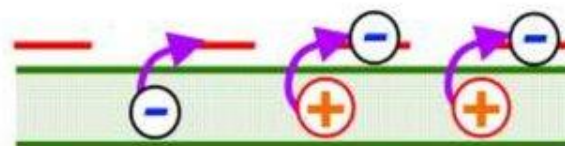
чистый



n-тип



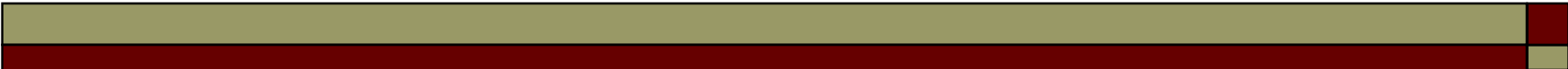
p-тип



Электронно-дырочный переход

n — **p** - переход

- это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.
- **n** — **p** - переход обладает свойством **односторонней проводимости**

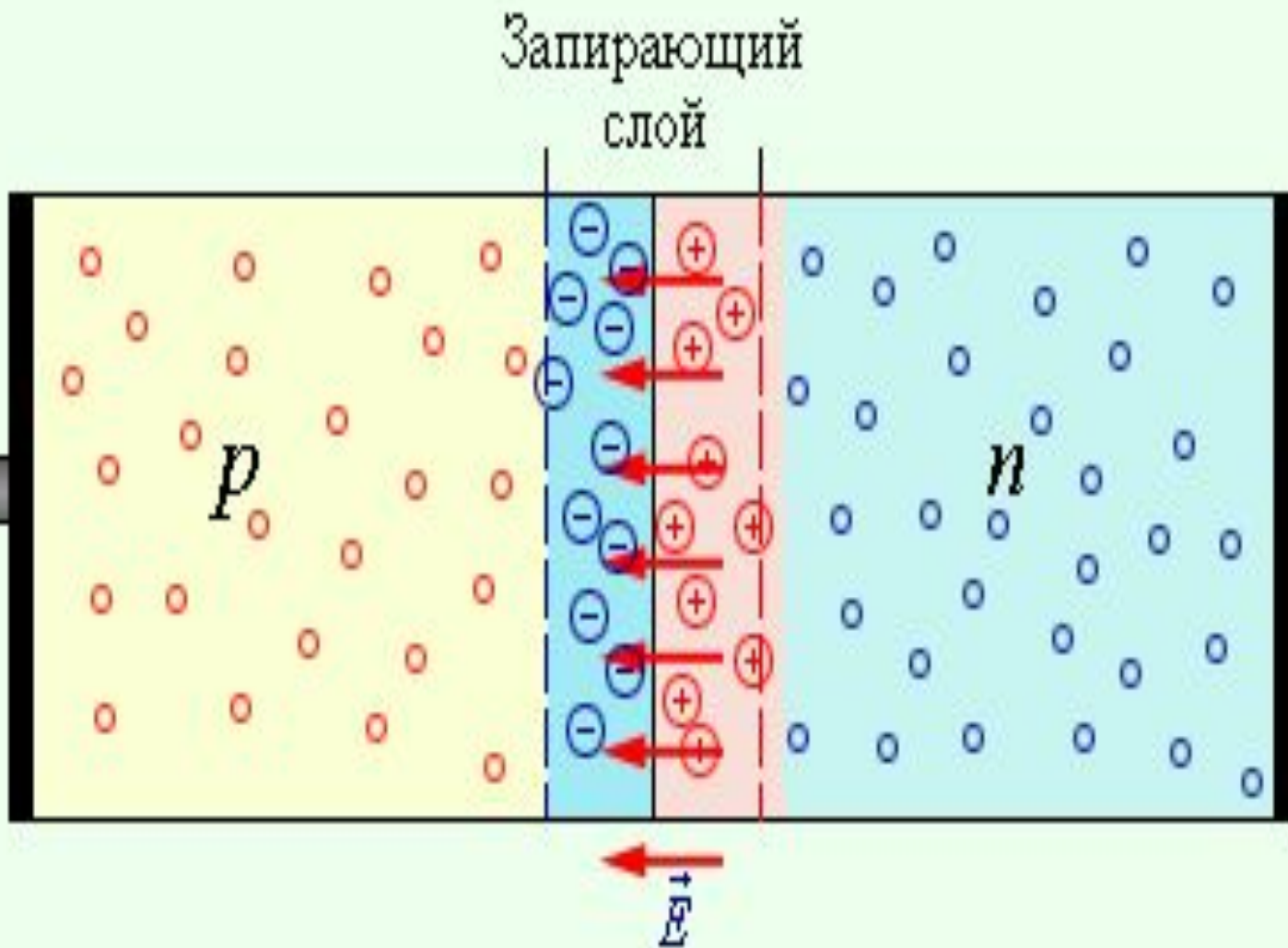
- 
- При контакте двух полупроводников **n**- и **p**-типов начинается процесс **диффузии**:
-

- **дырки** из **p** - области переходят в **n**-область
электроны из **n**-области в **p** -область
- в **n**- области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает **положительно заряженный** слой.
- в **p** - области уменьшается концентрация дырок и возникает **отрицательно заряженный слой**.

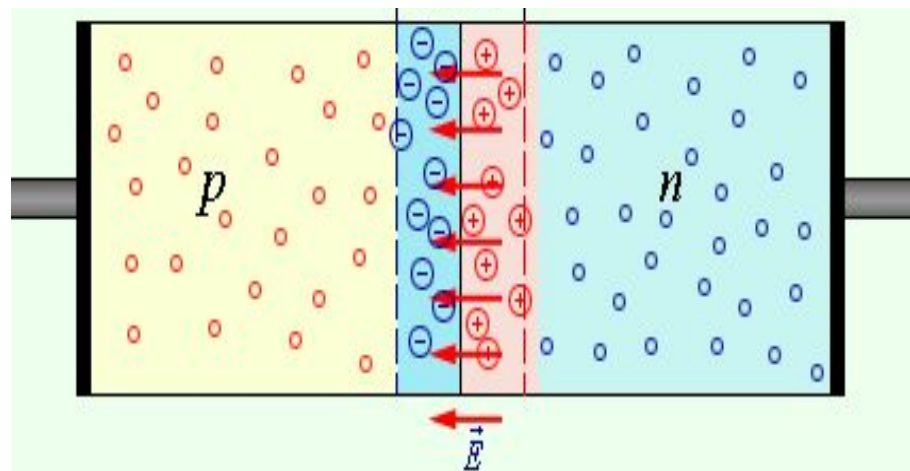
- 
-
- Таким образом, на границе полупроводников образуется двойной электрический слой, поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу.

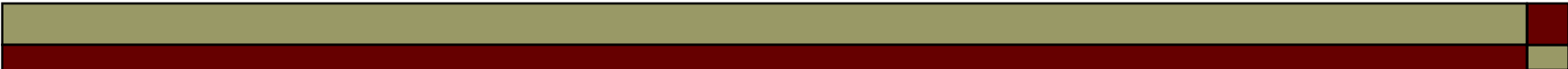
- Пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости (**запирающий слой**) обычно достигает толщины порядка десятков и сотен межатомных расстояний.
- Объемные заряды этого слоя создают между
- **p** - и **n**- областями **запирающее напряжение**
- **U_z** , приблизительно равное **0,35 В** для **германиевых n-p**-переходов и **0,6 В** для **кремниевых**.

Образование запирающего слоя при контакте полупроводников p - и n -типов



- Если полупроводник с $n-p$ - переходом подключен к источнику тока так, что **положительный полюс** соединен с n - областью, а **отрицательный** — с p - областью, то напряженность поля в запирающем слое возрастает.



- 
- **Дырки** в **p** - области и **электроны** в **n**- области
-

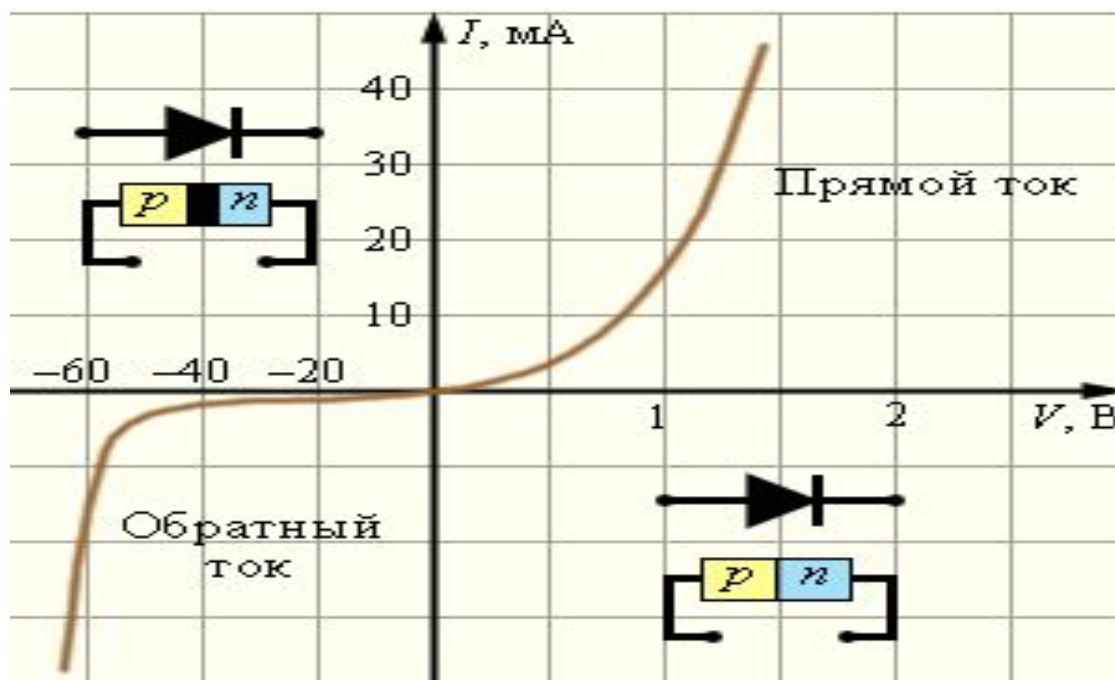
будут смещаться от **n – p** - перехода

- **увеличивая концентрацию неосновных носителей в запирающем слое.**

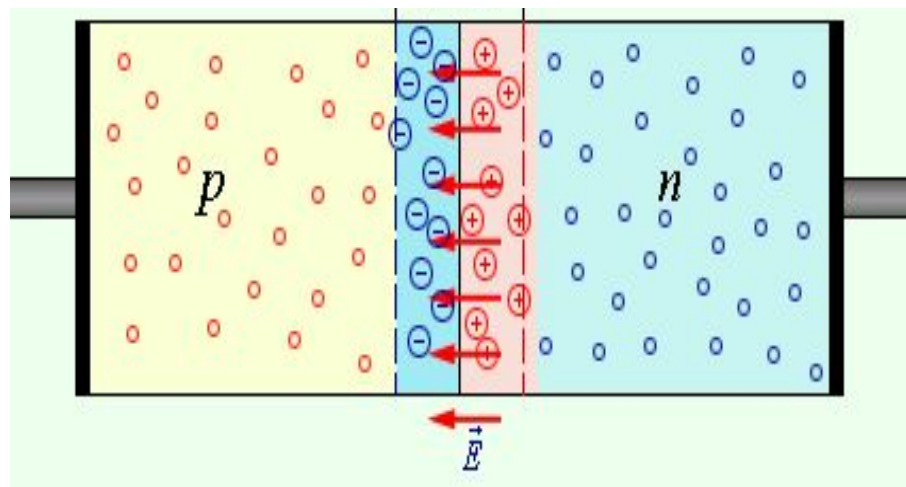
- Ток через **n – p** - переход практически не идет.

- **Напряжение**, поданное на **n – p** - переход называют **обратным**

- незначительный **обратный ток** обусловлен только собственной проводимостью полупроводниковых материалов, т. е. наличием **небольшой концентрации свободных электронов** в **p**-области и **дырок** в **n**-области.



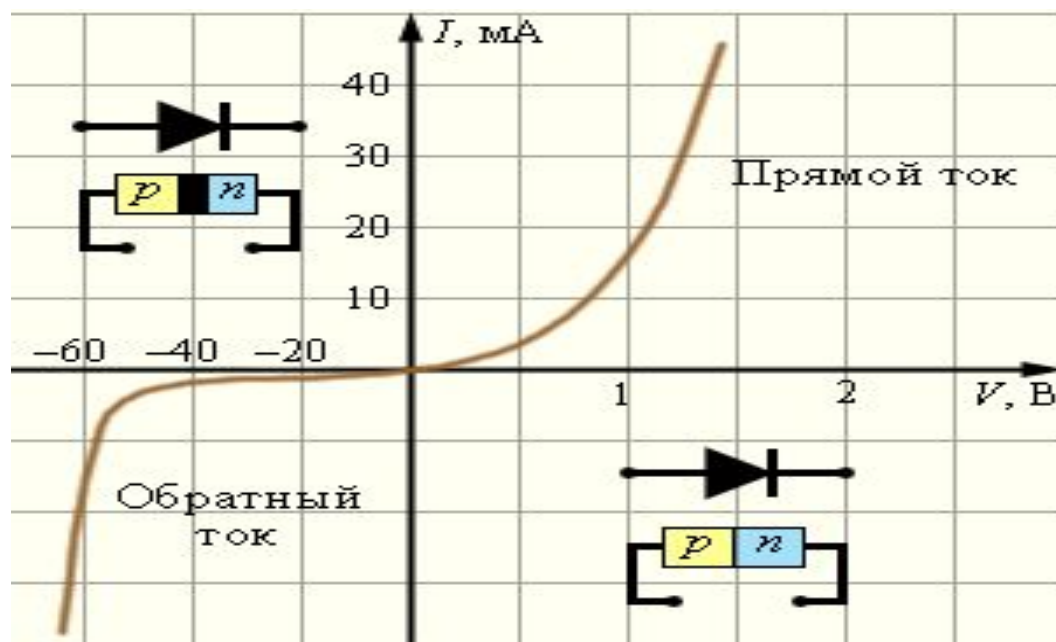
- Если **n** – **p** - переход соединить с источником так, чтобы **положительный полюс источника** был соединен с **p** - областью, а **отрицательный** с **n**- областью, то **напряженность электрического поля в запирающем слое будет уменьшаться**, что облегчает переход основных носителей через контактный слой.



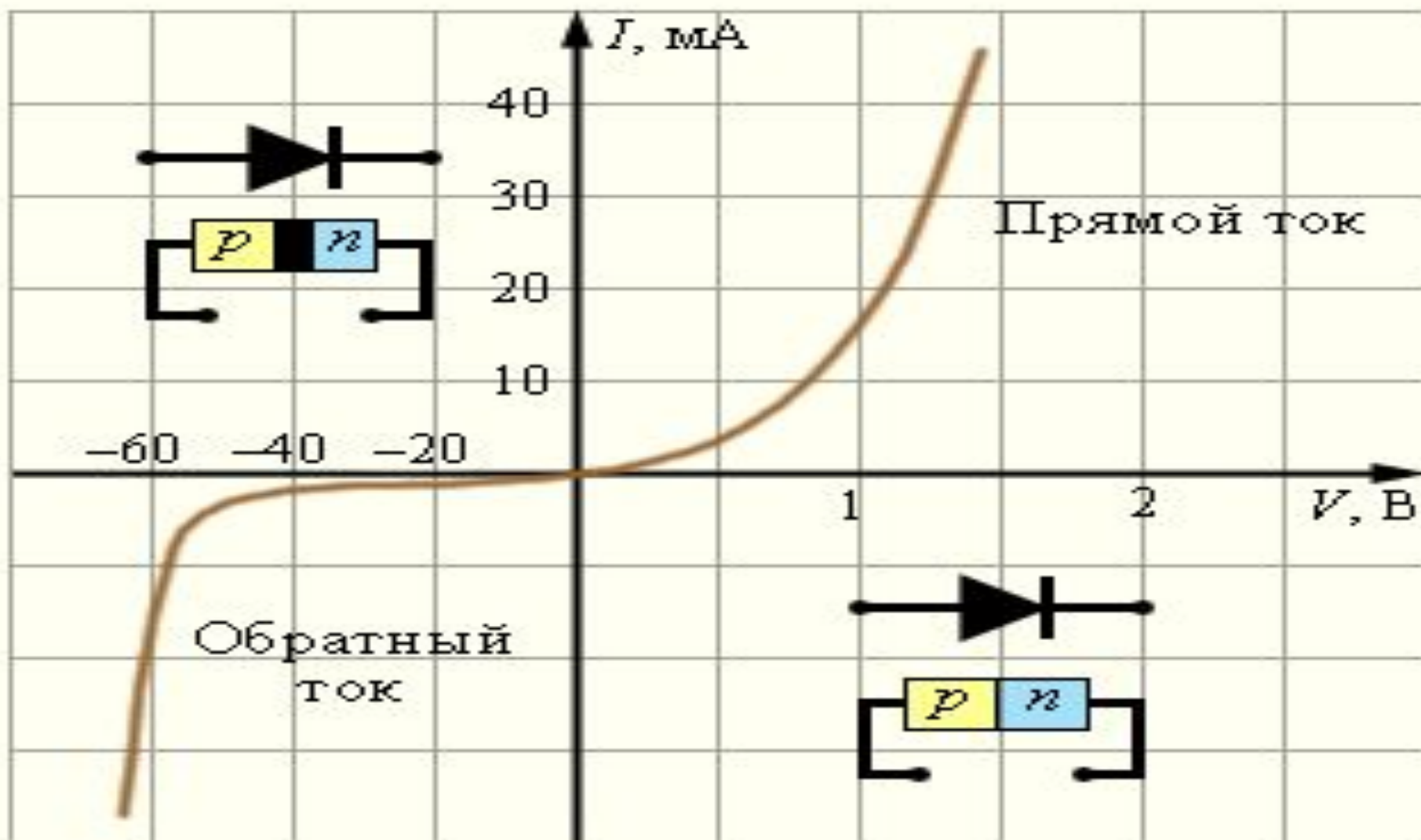
□ **Дырки** из **p** - области и **электроны** из **n**-области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать

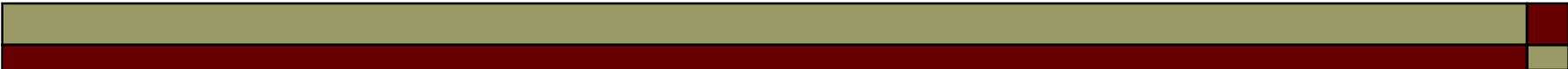
n–p-переход, создавая ток в прямом направлении.

Сила тока через **n–p**-переход будет возрастать при **увеличении напряжения** источника.



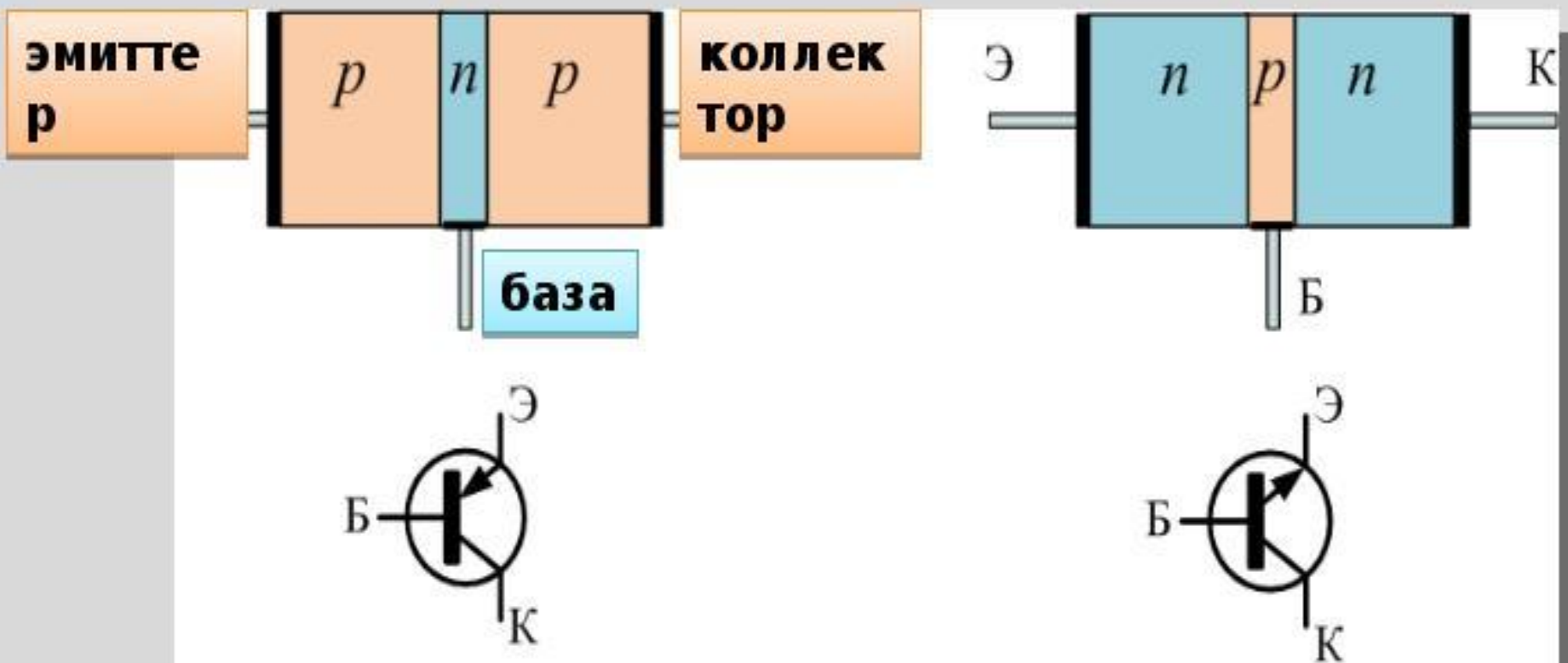
Вольт-амперная характеристика кремниевых диода



- 
-
- Способность **n-p**-перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются **полупроводниковыми диодами**

Транзистор – кристалл с двумя p - n -переходами

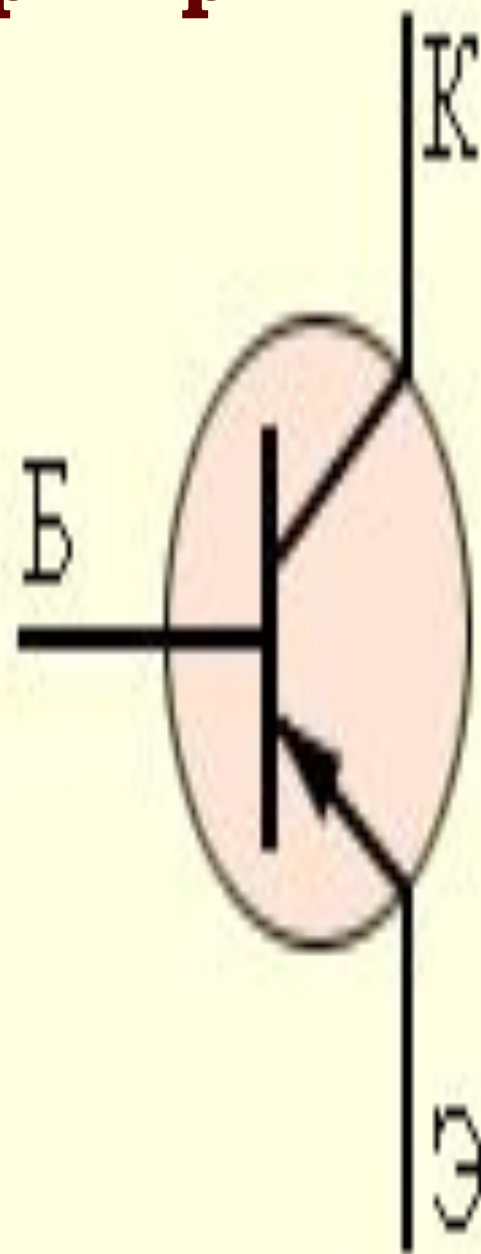
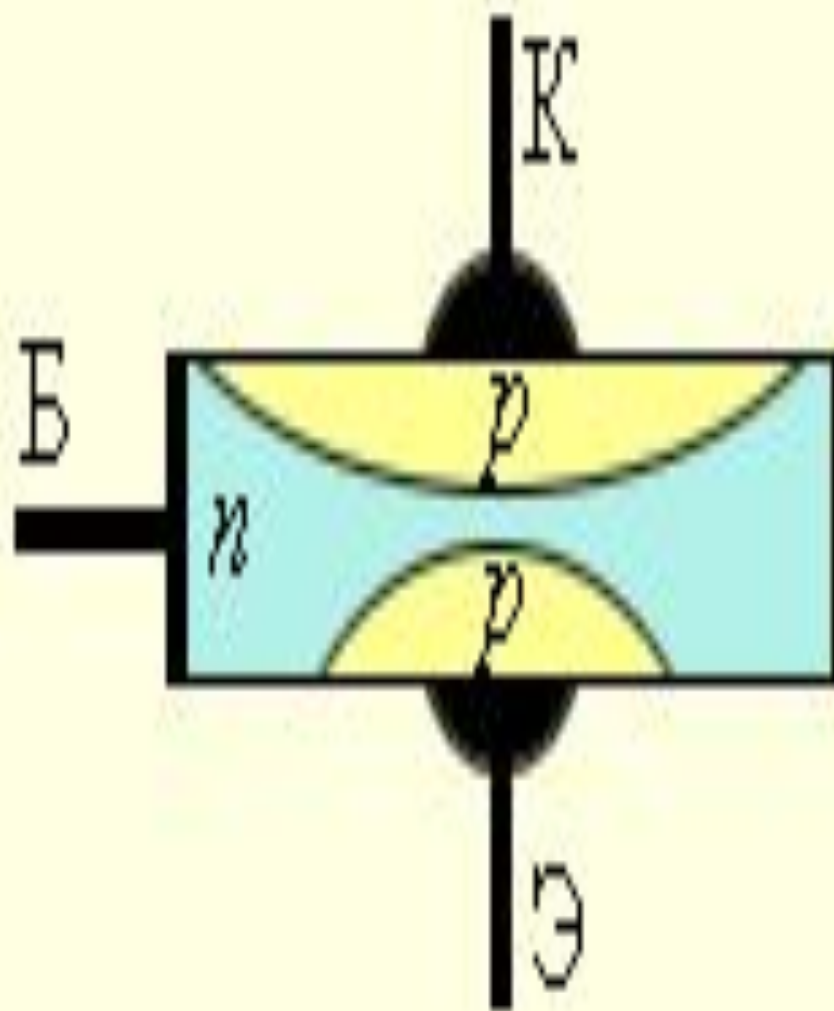
По типу чередования дырочной и электронной проводимостей:

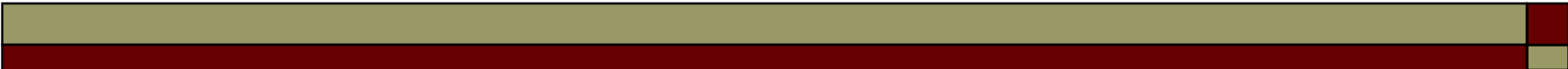


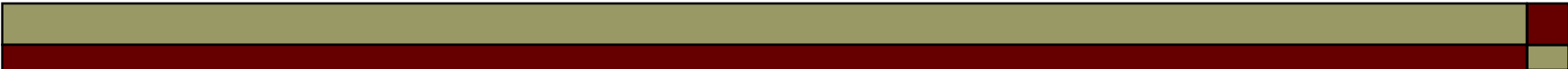
Транзисторы

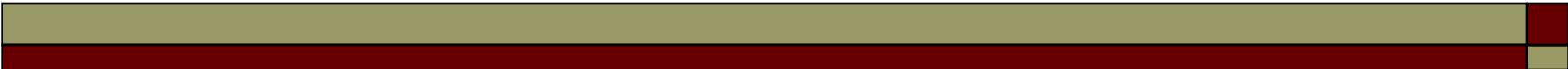
- Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя **п–р** - переходами называются **транзисторами**.
- Пластинку транзистора называют базой (**Б**), одну из областей с противоположным типом проводимости – коллектором (**К**), а вторую – эмиттером (**Э**). Обычно объем коллектора превышает объем эмиттера. В условных обозначениях на схемах стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор.

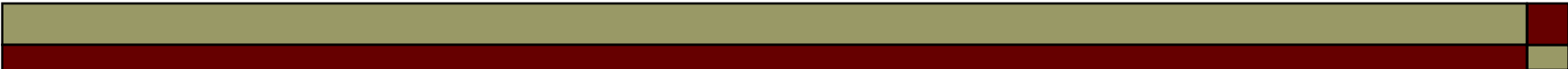
Транзистор структуры р-п-р



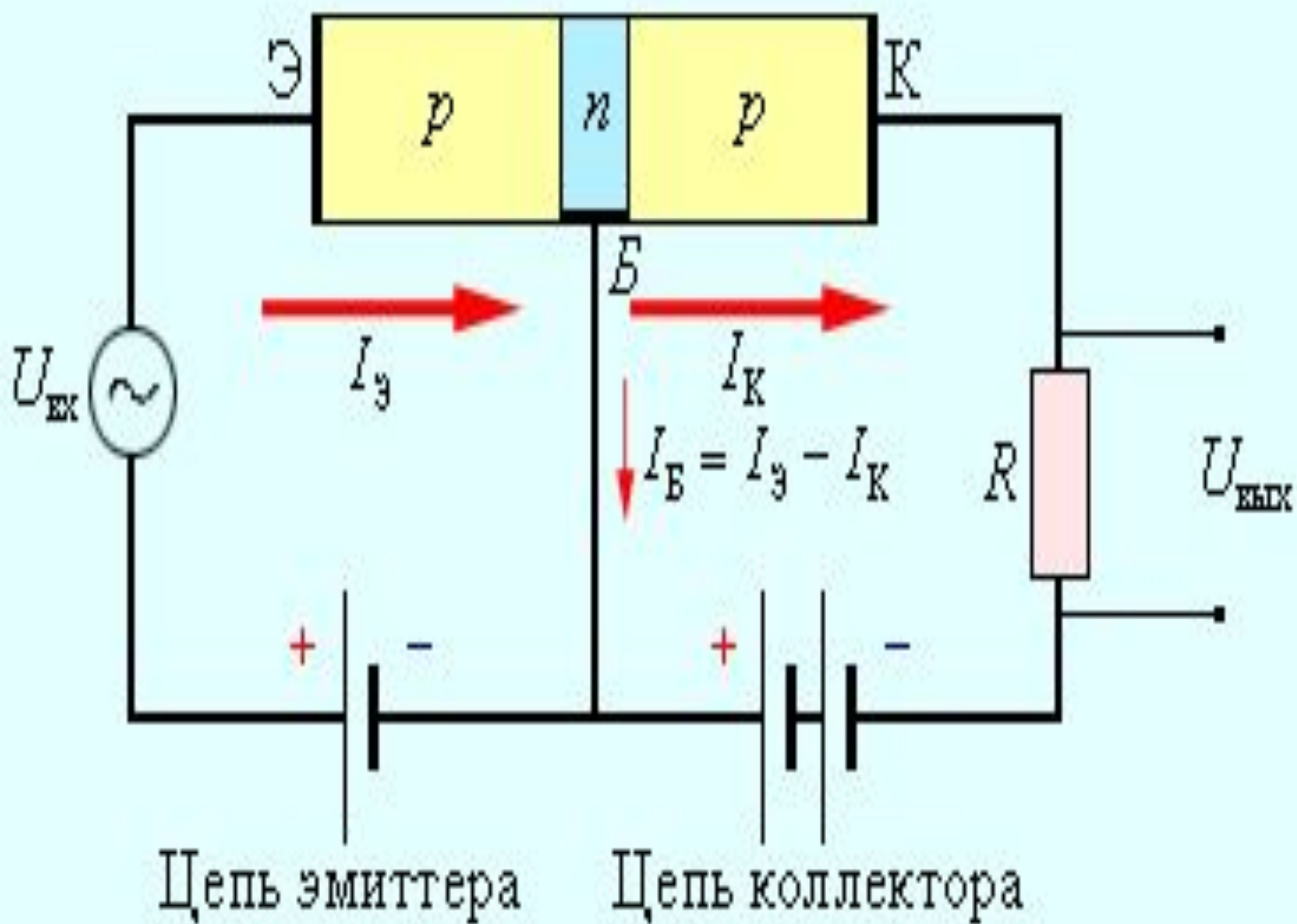
- 
-
- На рис. показано включение в цепь транзистора **p–n–p**-структуры. Переход «**эмиттер–база**» включается в прямом (пропускном) направлении (цепь эмиттера), а переход «**коллектор–база**» – в запирающем направлении (цепь коллектора).

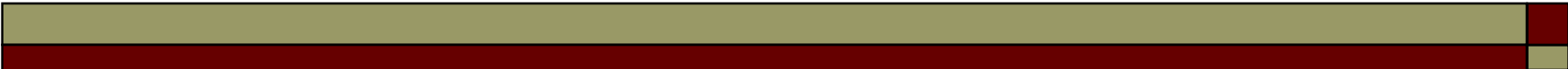
- 
-
- Пока цепь эмиттера разомкнута, ток в цепи коллектора очень мал, так как для основных носителей свободного заряда – электронов в базе и дырок в коллекторе – переход заперт.

- 
-
- При замыкании цепи эмиттера дырки – основные носители заряда в эмиттере – переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток **$I_{\text{э}}$** . Но для дырок, попавших в базу из эмиттера, **n–p**-переход в цепи коллектора открыт.

- 
- Большая часть дырок захватывается полем этого перехода и проникает в коллектор, создавая ток **I_k** . Для того, чтобы ток коллектора был практически равен току эмиттера, базу транзистора делают в виде очень тонкого слоя. При изменении тока в цепи эмиттера изменяется сила тока и в цепи коллектора.

Включение в цепь транзистора р-п-р-структуры

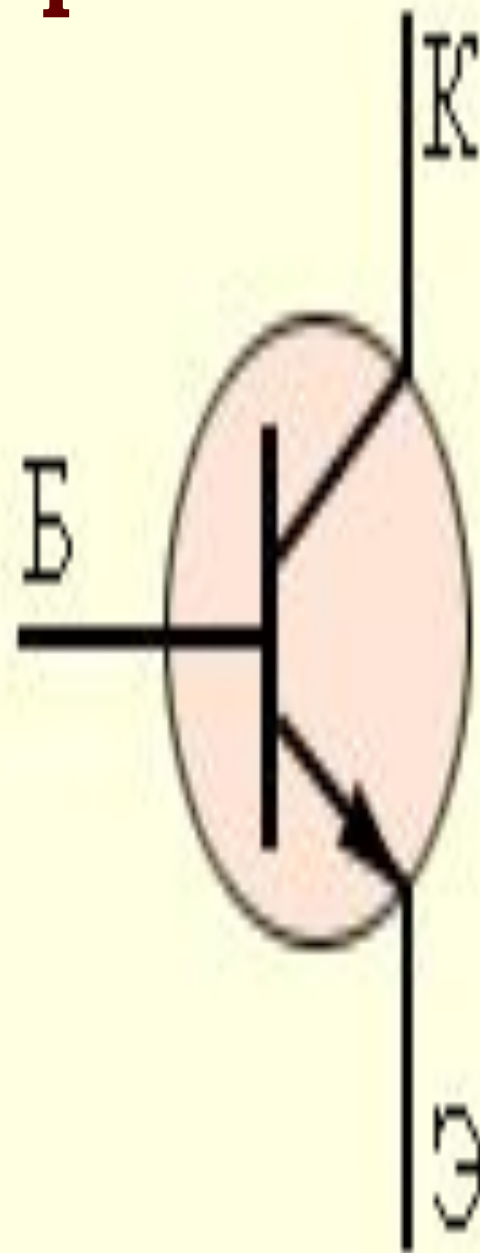
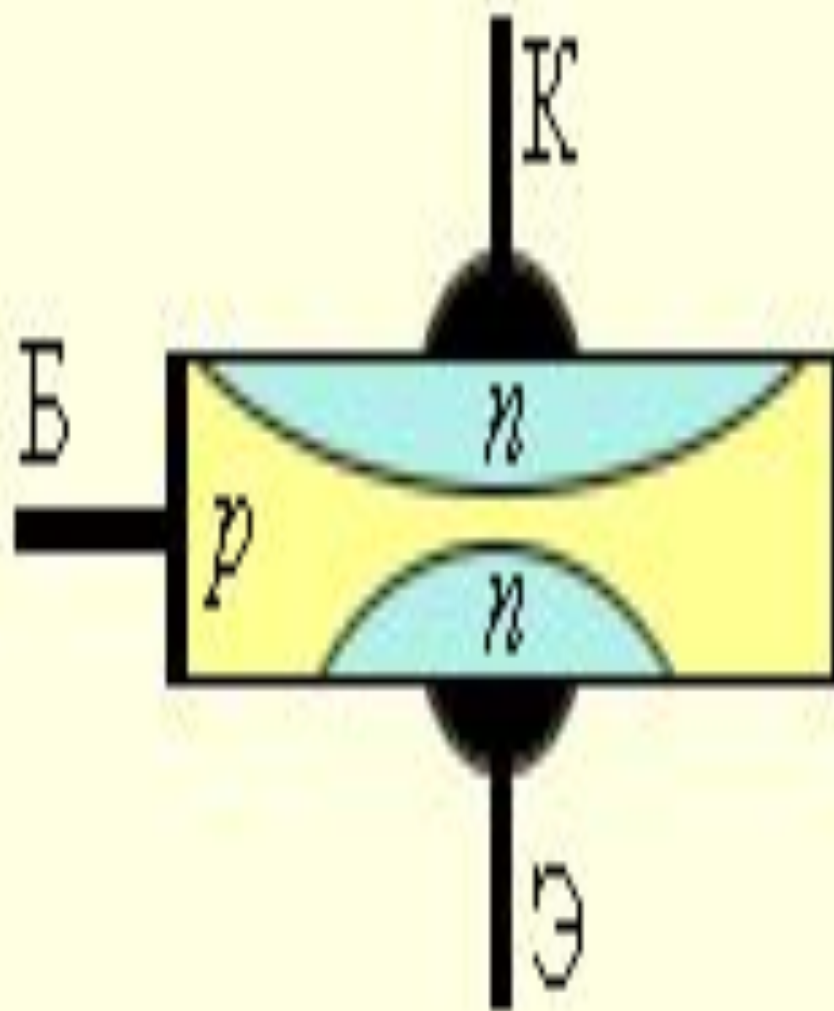




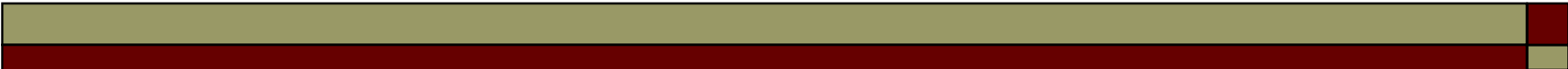
□ Если в цепь эмиттера включен источник переменного напряжения (рис.), то на резисторе **R**, включенном в цепь коллектора, также возникает переменное напряжение, амплитуда которого может во много раз превышать амплитуду входного сигнала.

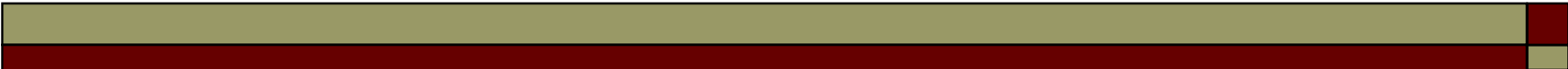
□ Следовательно, транзистор выполняет роль усилителя переменного напряжения.

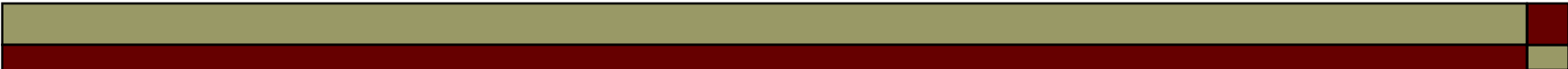
Транзистор структуры п-р-п



Полупроводниковые приборы

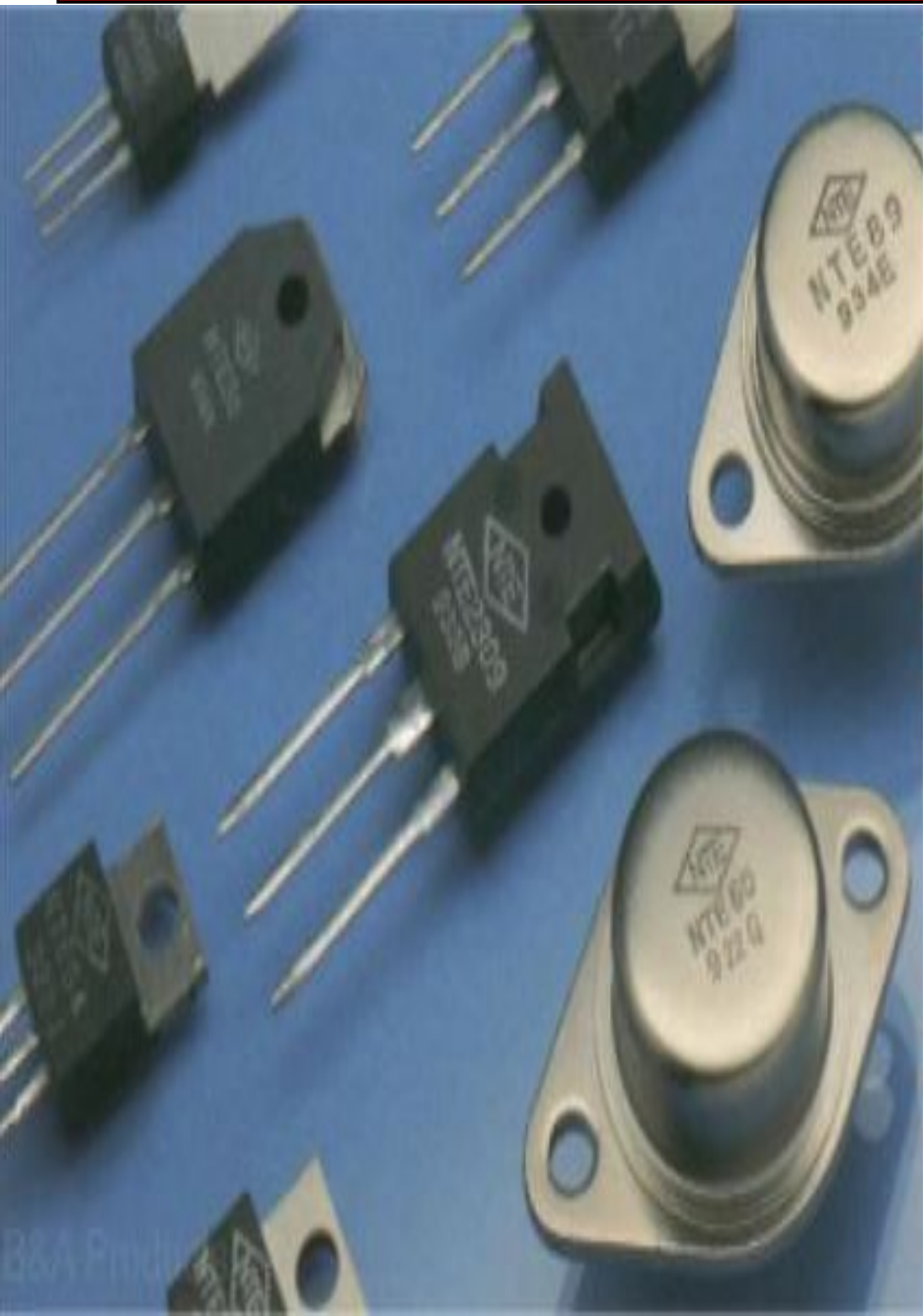
- 
- В настоящее время полупроводниковые приборы находят исключительно широкое применение в радиоэлектронике. Современная технология позволяет производить полупроводниковые приборы – диоды, транзисторы, полупроводниковые фотоприемники и т. д. – размером в несколько микрометров.

- 
-
- Качественно новым этапом электронной техники явилось развитие микроэлектроники, которая занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения.

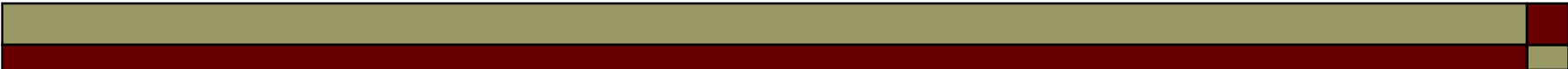
- 
-
- **Интегральной микросхемой** называют совокупность большого числа взаимосвязанных элементов – сверхмалых диодов, транзисторов, конденсаторов, резисторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе на одном кристалле. Микросхема размером в **1 см²** может содержать несколько сотен тысяч микроэлементов.

Полупроводниковые приборы

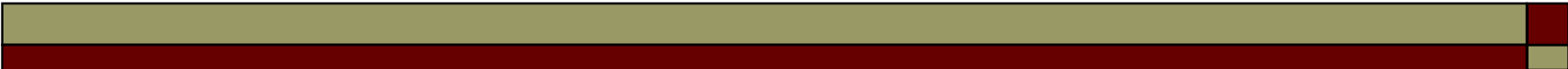


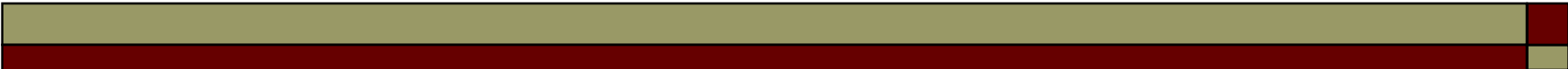


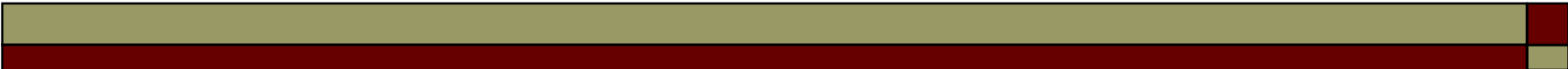
Фотопроводимость

- 
- **Фотопроводимость** — явление изменения электропроводности вещества при освещении.
 - Она свойственна для полупроводников. При поглощении фотона электрон переходит из валентной зоны в зону проводимости. Как следствие образуется пара носителей заряда: электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне. Оба носителя заряда при приложении к полупроводнику напряжения создают электрический ток.

Физическая природа

- 
-
- При возбуждении фотопроводимости в собственном полупроводнике энергия фотона должна превышать ширину запрещенной зоны.

- 
-
- В полупроводнике с примесями поглощение фотона может сопровождаться переходом из расположенного в запрещённой зоне уровня, что позволяет увеличить длину волны света, который вызывает фотопроводимость.
 - Это обстоятельство важно для детектирования инфракрасного излучения.

- 
-
- Условием высокой фотопроводимости является также большой коэффициент поглощения света.

□ Явление фотопроводимости используется в **фотоэлементах**, важнейшей составной частью которых являются **фоторезисторы**.

Фотопроводимость важна также для детектирования инфракрасного излучения и применяется, например, в **приборах ночного видения**. Увеличение проводимости при освещении используется также в **ксерографии**, при которой электрические заряды стекают с засвеченных мест предварительно наэлектризованой поверхности полупроводникового барабана. Явление фотопроводимости также используется **для определения электрических свойств полупроводниковых структур**.

Фотоэлемент



- **Фотоэлемент** —
электронный прибор, который преобразует энергию фотонов в электрическую энергию.
- Сканер планшетный EPSON Perfection 2400 Photo

Солнечно-ветровая энергоустановка



Приборы ночного видения



- Очки
ночного
видения
Dedal
DVS-8

Приборы ночного видения



- Умелец из США изобрел мото - прибор ночного видения"

Приборы ночного видения



Приборы ночного видения ТВН-5, ТВН-5Л предназначены для обеспечения вождения бронетанковой техники ночью при естественной ночной освещенности (ЕНО). При низком ЕНО (менее 3хЮЗ лк) применяется подсветка инфракрасным осветителем...

Честер Карлсон



- Изобретатель Честер Карлсон впервые в истории сделал ксерокопию
- 22 октября 1938 г.