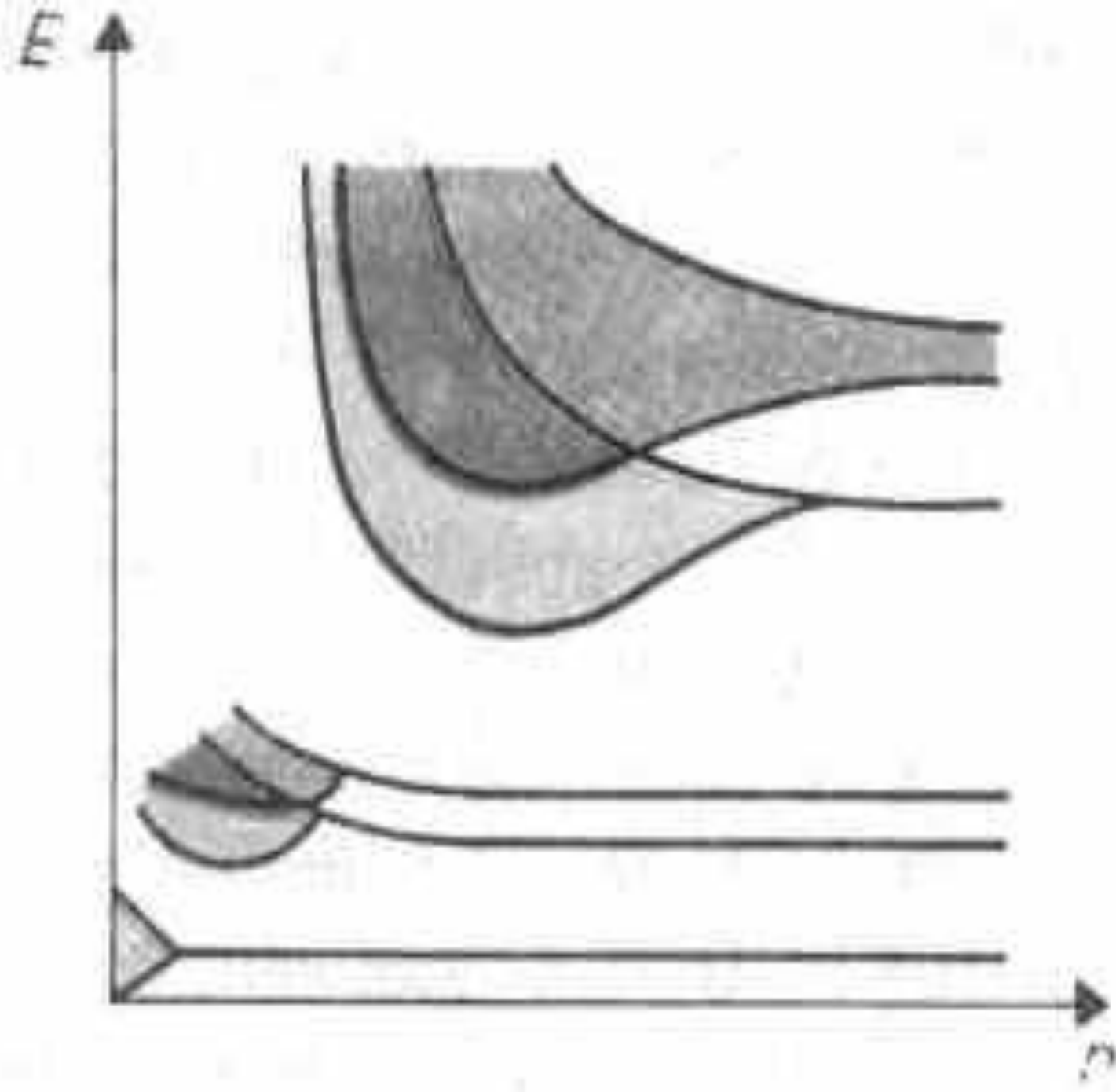


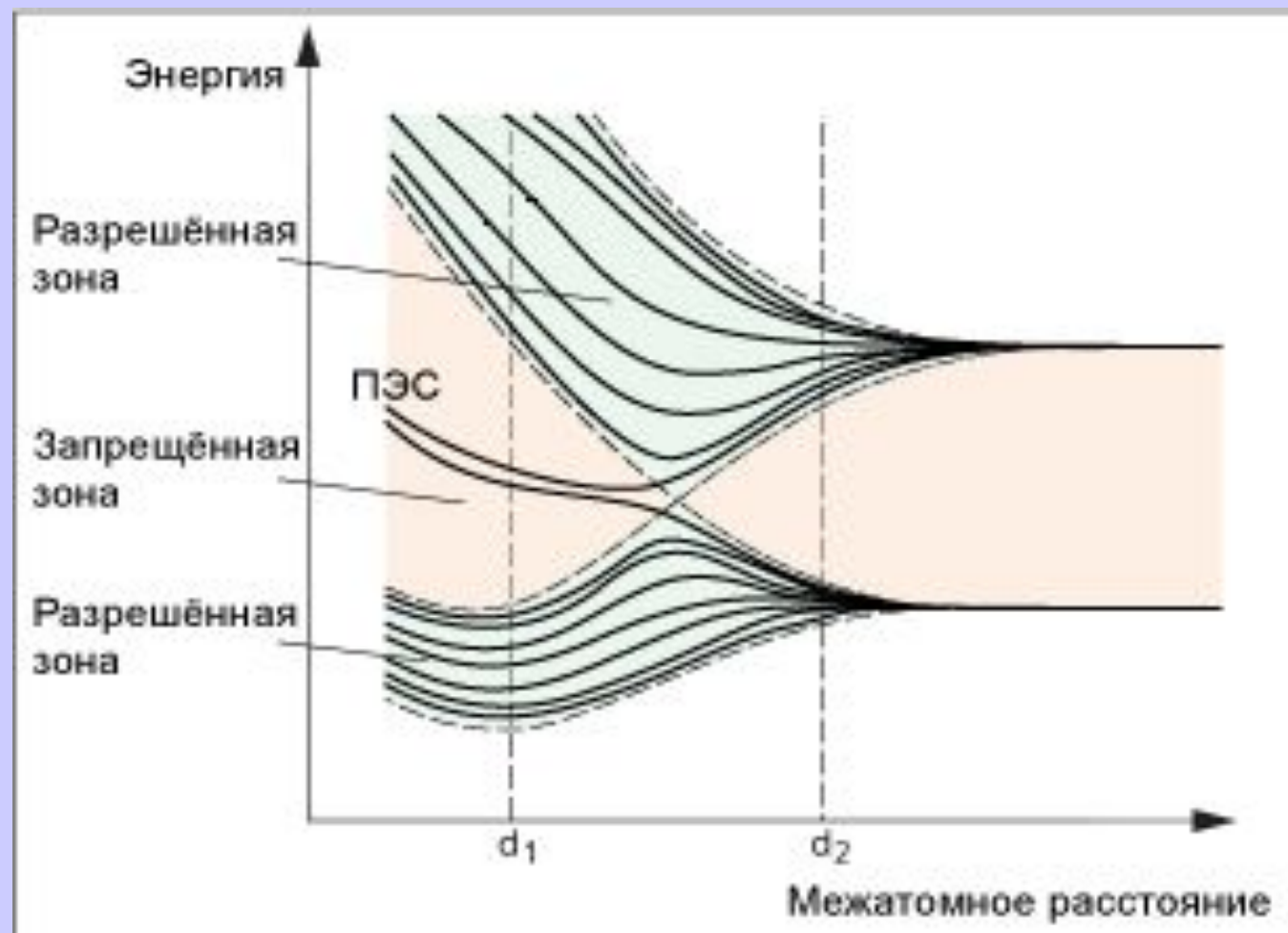
# **Зонная теория ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

# Энергетические зоны в кристалле

- Взаимодействие между атомами в кристалле приводит к тому, что энергетические уровни атомов смещаются, расщепляются и образуют **зоны**.
- **Энергетическая зона** – совокупность  $N$  близкорасположенных уровней разрешенных значений энергии, полученных при расщеплении в кристалле уровня изолированного атома.



Уровни свободного атома



- Каждая разрешенная зона «вмещает» в себя столько близлежащих дискретных уровней, сколько атомов содержит кристалл
- Расстояние между соседними энергетическими уровнями в зоне составляет приблизительно  $10^{-22}$  эВ.

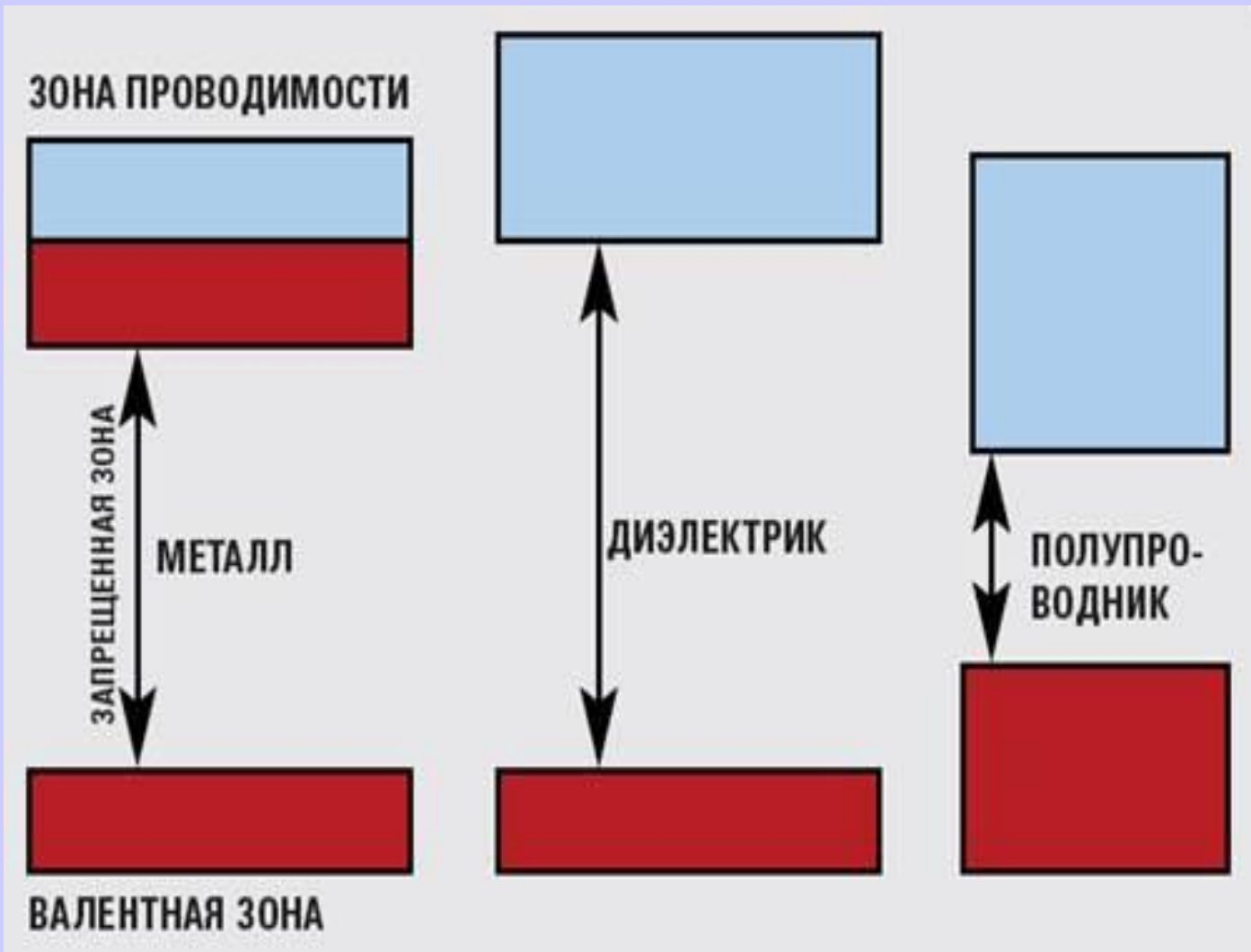
- Разрешенные энергетические зоны разделены зонами запрещенных значений энергии - **запрещенными энергетическими зонами.**
- Разрешенная зона, возникшая из уровней внутренних валентных электронов свободных атомов, называется **валентной зоной**

- Энергетическая зона , образованная из энергетических уровней внешних , «коллективизированных» электронов, - **зона проводимости**
- Зона проводимости в кристаллах либо заполнена частично, либо свободна

- Зонная теория объясняет различие электрических свойств металлов, диэлектриков и полупроводников на основе:

1. Неодинакового заполнения электронами разрешенных зон
2. Различной шириной запрещенных зон





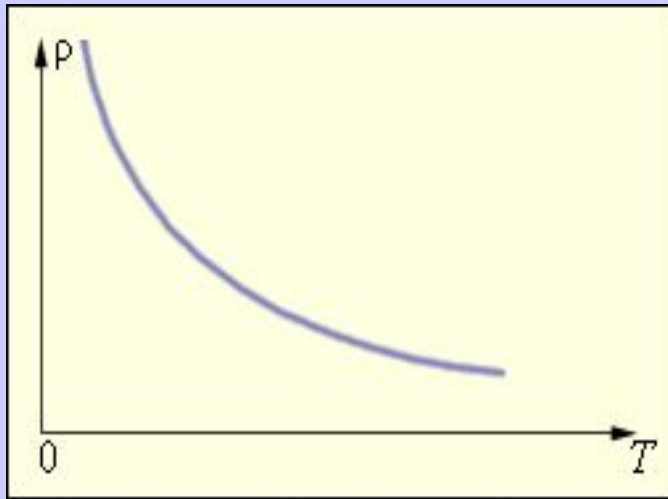
# Полупроводники

- Полупроводниками являются твердые тела, которые при  $T=0$  характеризуются полностью занятой электронами валентной зоной, отделенной от зоны проводимости сравнительно узкой ( $\Delta E$  порядка 1-2 эВ) запрещенной зоной
- ***Электропроводность полупроводников меньше электропроводности металлов и больше электропроводности диэлектриков.***

# Полупроводники:

- элементы IV, V и VI групп  
Периодической системы элементов  
Менделеева ( Si, Ge, As, Se, Te)
- химические соединения этих элементов  
(оксиды, сульфиды, селениды, сплавы  
элементов различных групп)

- Качественное **отличие** полупроводников от металлов проявляется прежде всего в зависимости удельного сопротивления от температуры.
- С понижением температуры сопротивление металлов **падает**
- У полупроводников с понижением температуры сопротивление **возрастает**



- Электропроводность собственных полупроводников увеличивается с ростом температуры по закону

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

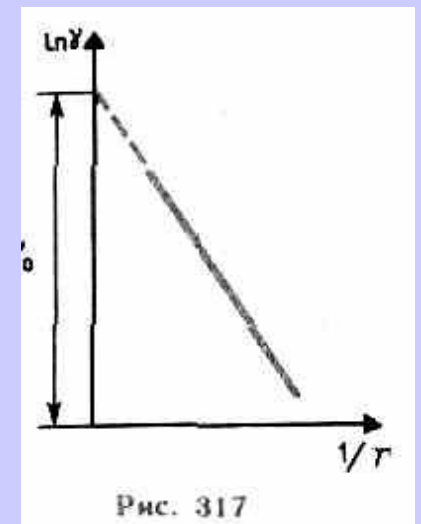
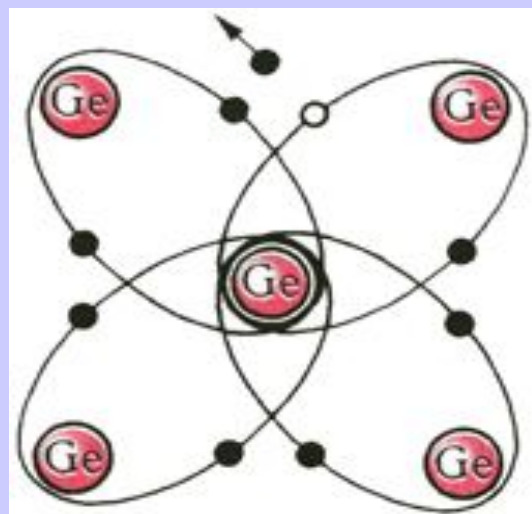
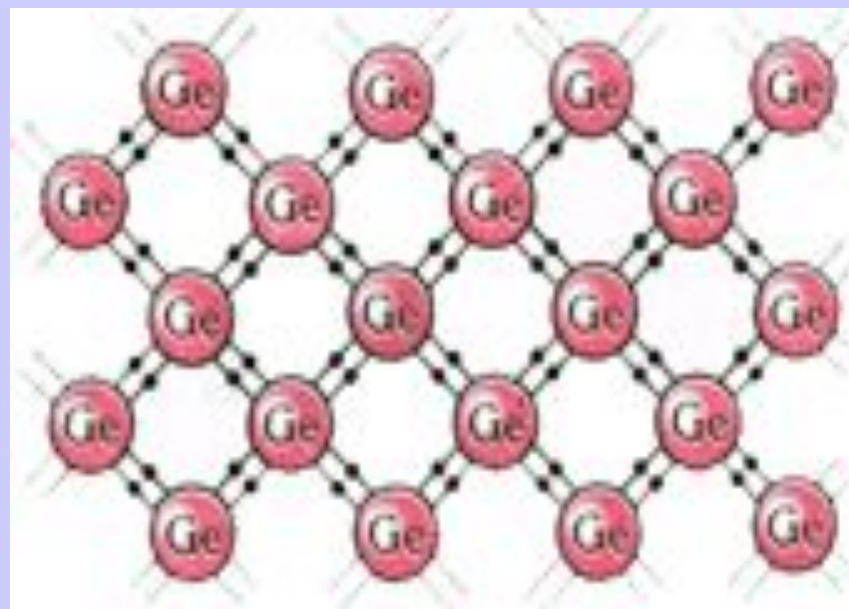
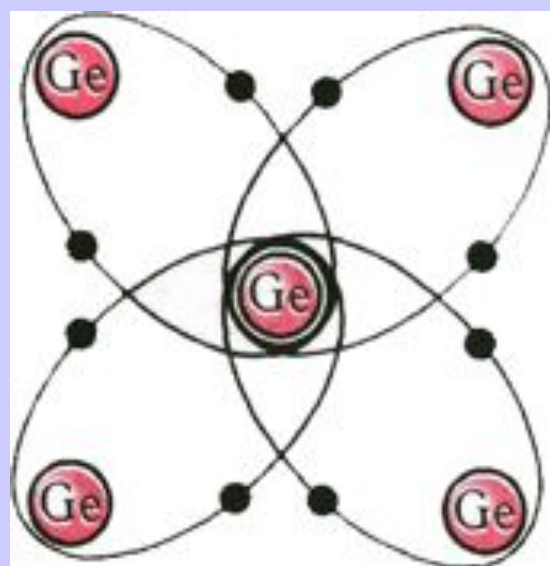
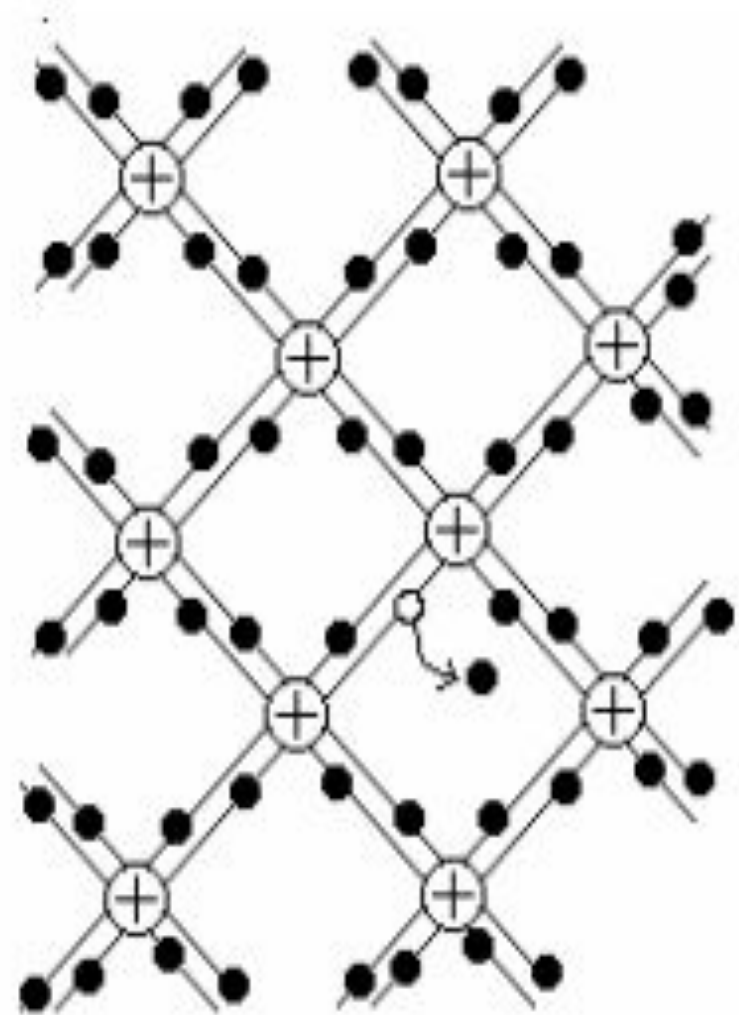


Рис. 317

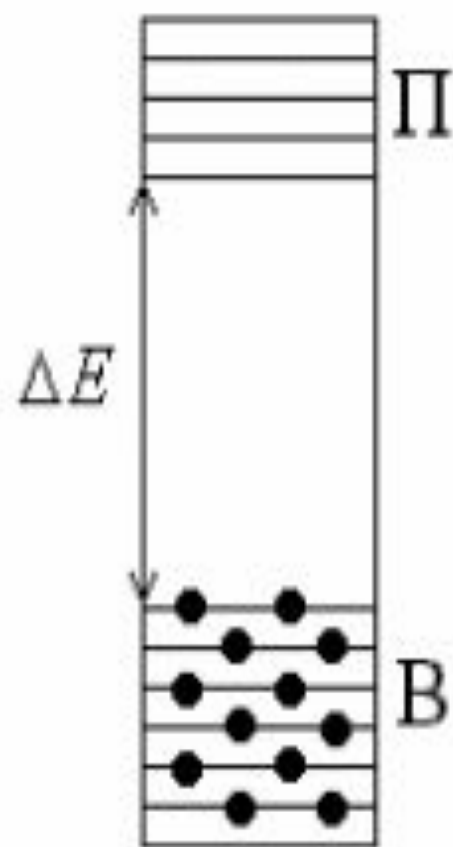
- Различают **собственные** и **примесные** полупроводники.
- **Собственными** полупроводниками являются химически чистые полупроводники, а их проводимость называется **собственной проводимостью**.

К собственным полупроводникам относятся химически чистые Ge, Se, а также многие химические соединения: InSb, GaAs, CdS и др.





а



б



в

Рис. 11. 1



- При нагревании или облучении полупроводника электронам верхних уровней валентной зоны сообщается дополнительная энергия – энергия активации  $\Delta E$ , и они могут переходить на нижние уровни зоны проводимости.
- При этом в валентной зоне освобождаются энергетические уровни – образуются дырки. При наложении внешнего электрического поля электроны зоны проводимости переводятся на более высокие, а дырки валентной зоны на более низкие энергетические уровни. Электропроводность полупроводника становится отличной от нуля.

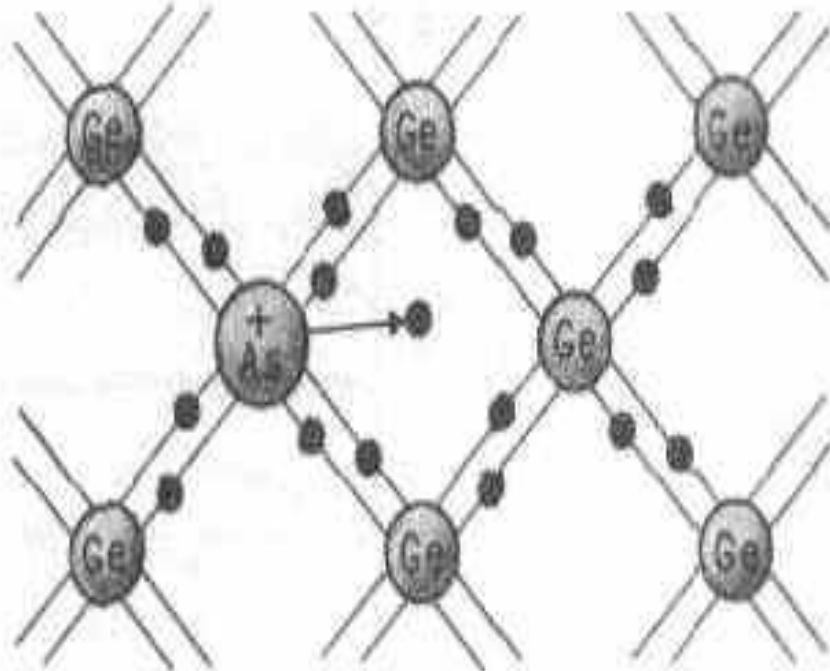
- Движение электронов проводимости и дырок в отсутствие электрического поля является хаотическим
- Под действием электрического поля электроны начнут двигаться против поля, дырки — по полю
- Наряду с процессом генерации электронов и дырок идет процесс **рекомбинации**
- для каждой температуры устанавливается определенная равновесная концентрация электронов и дырок

# Примесная проводимость

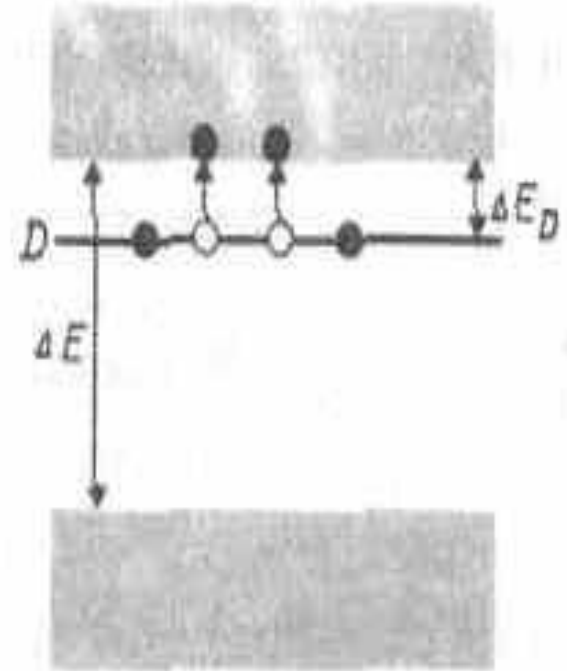
- Проводимость полупроводников, обусловленная примесями, называется **примесной проводимостью**, а полупроводники — **примесными полупроводниками**.
- Примесная проводимость обусловлена примесями (атомы посторонних элементов), а также дефектами .

- при введении в кремний примерно 0,001 ат.% бора его проводимость увеличивается примерно в  $10^6$  раз.

# Электронная примесная проводимость

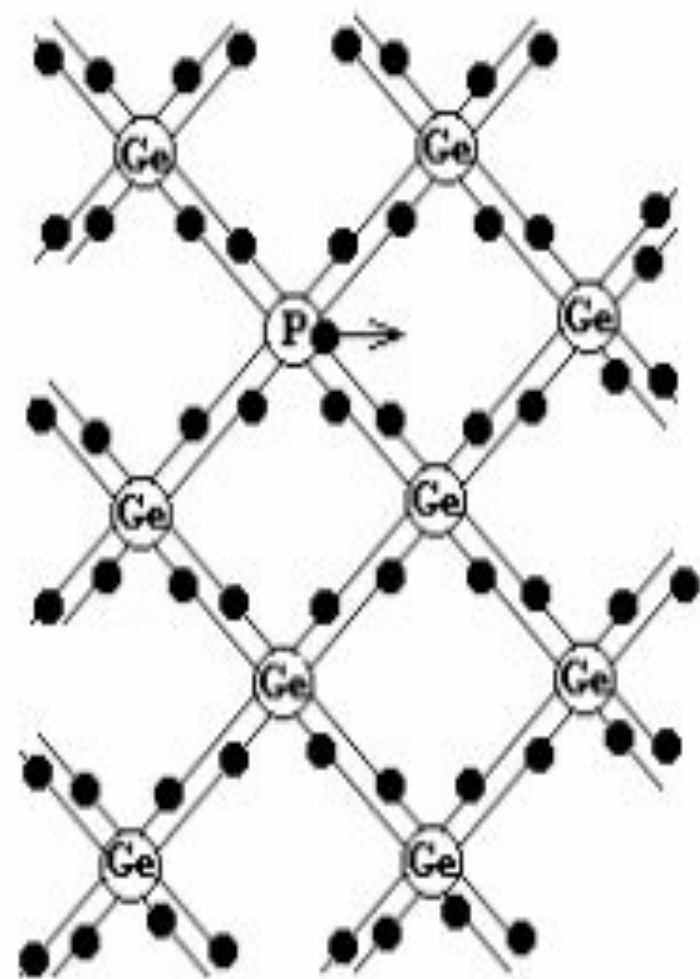


а)

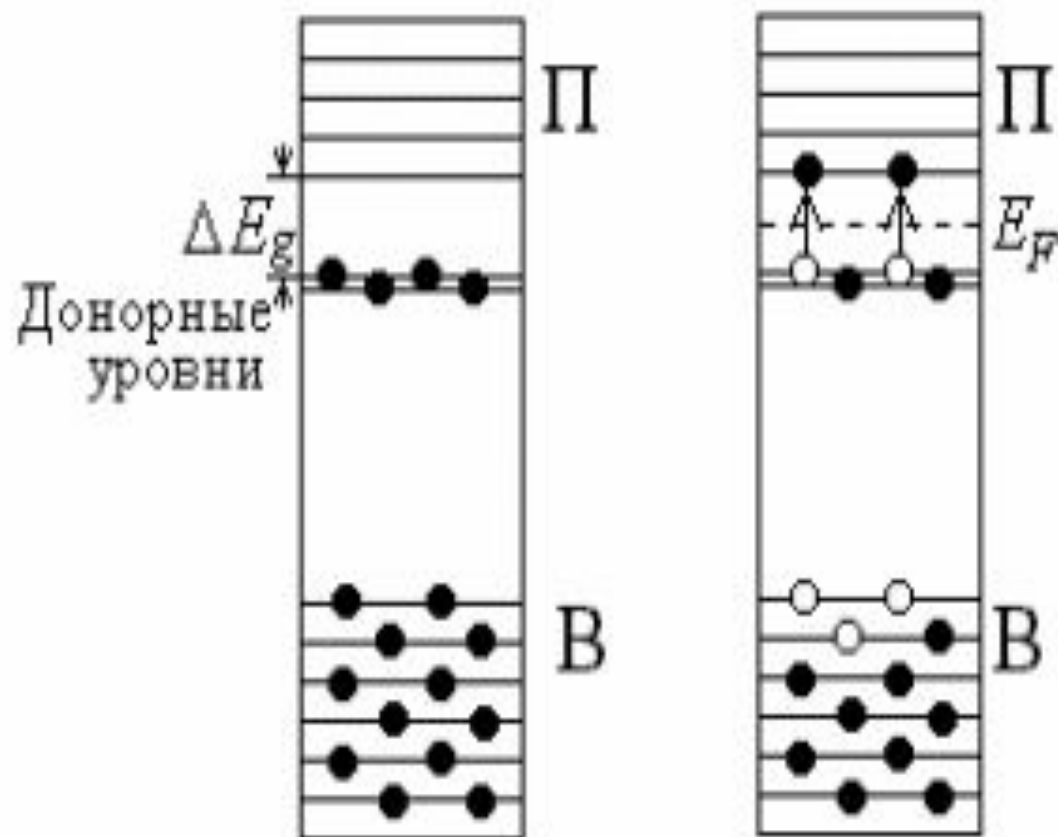


б)

Рис. 319



а



б

в

Рис. 11. 2

- Введение примеси искажает поле решетки, что приводит к возникновению в запрещенной зоне энергетического уровня  $D$  валентных электронов примеси, называемого **примесным уровнем**.
- этот уровень располагается вблизи дна зоны проводимости

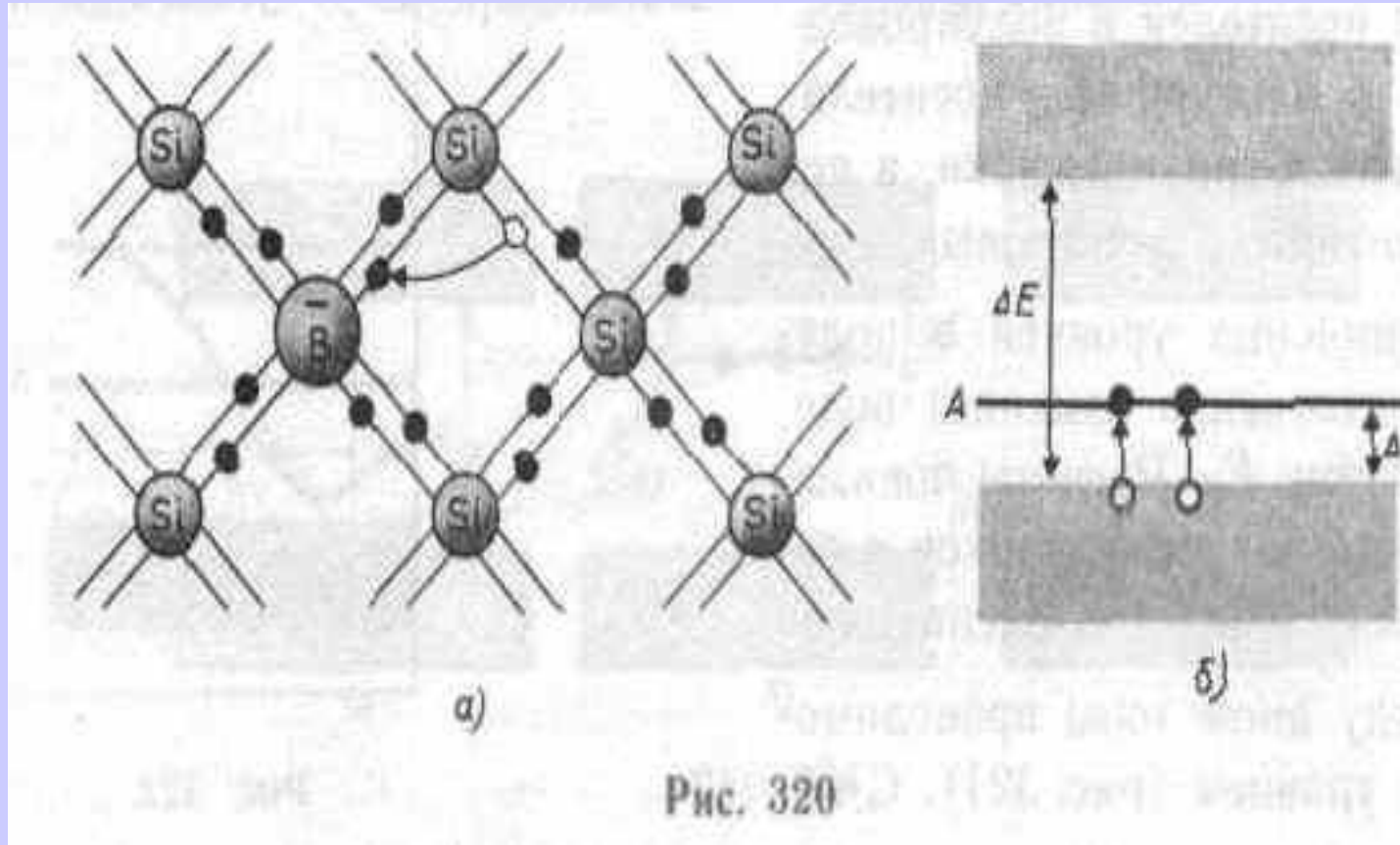
$$\Delta E_D < kT$$

- в полупроводниках с примесью, валентность которой *на единицу больше валентности основных атомов, носителями тока являются электроны;*
- возникает **электронная примесная проводимость (проводимость n-типа).**
- Полупроводники с такой проводимостью называются **электронными (или полупроводниками n-типа).**

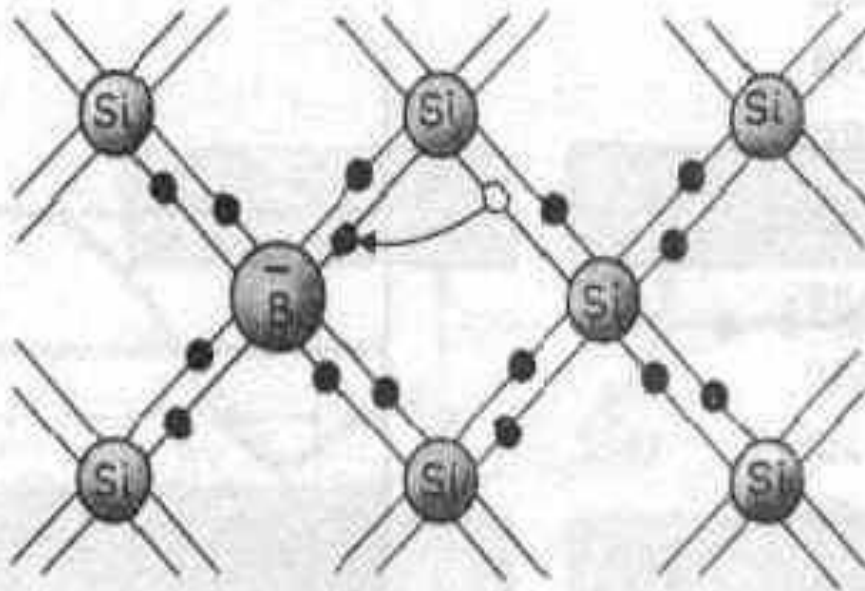


- Примеси, являющиеся источником электронов, называются **донорами**,
- а энергетические уровни этих примесей — **донорными уровнями**.

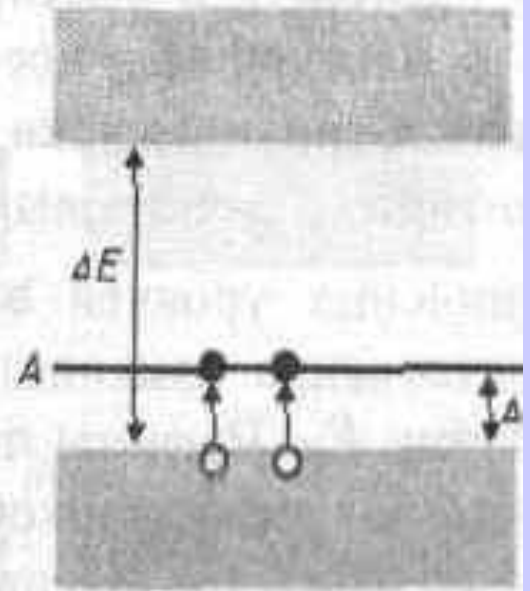
# Дырочная примесная проводимость



- Введение трехвалентной примеси в решетку кремния приводит к возникновению в запрещенной зоне примесного энергетического уровня  $A$ , не занятого электронами
- этот уровень располагается выше верхнего края валентной зоны

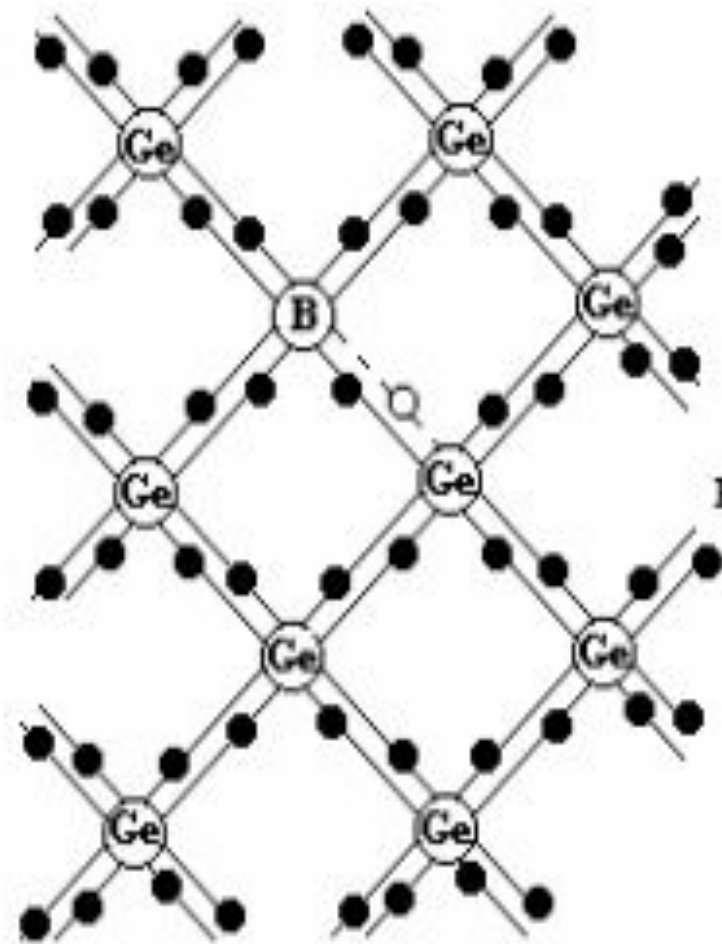


a)

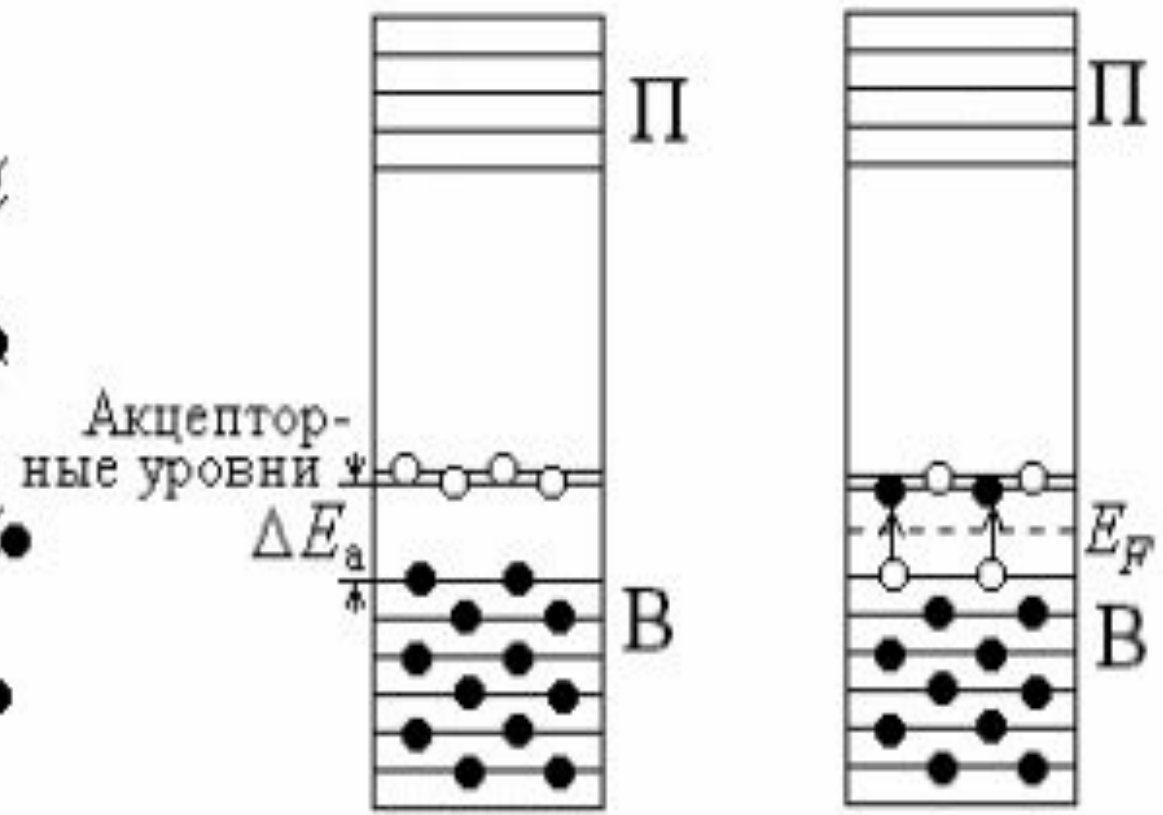


b)

Рис. 320



а



б

в

Рис. 11. 3

- В полупроводниках с примесью, валентность которой на единицу *меньше* валентности основных атомов, носителями тока являются *дырки*
- возникает **дырочная проводимость** (**проводимость p-типа**).
- Полупроводники с такой проводимостью называются **дырочными** (или **полупроводниками p-типа**).

- Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны полупроводника, называются **акцепторами**,
- а энергетические уровни этих примесей — **акцепторными уровнями**.

- В отличие от собственной проводимости, осуществляющейся одновременно электронами и дырками примесная проводимость полупроводников обусловлена в основном **носителями одного знака**





Рис. 323

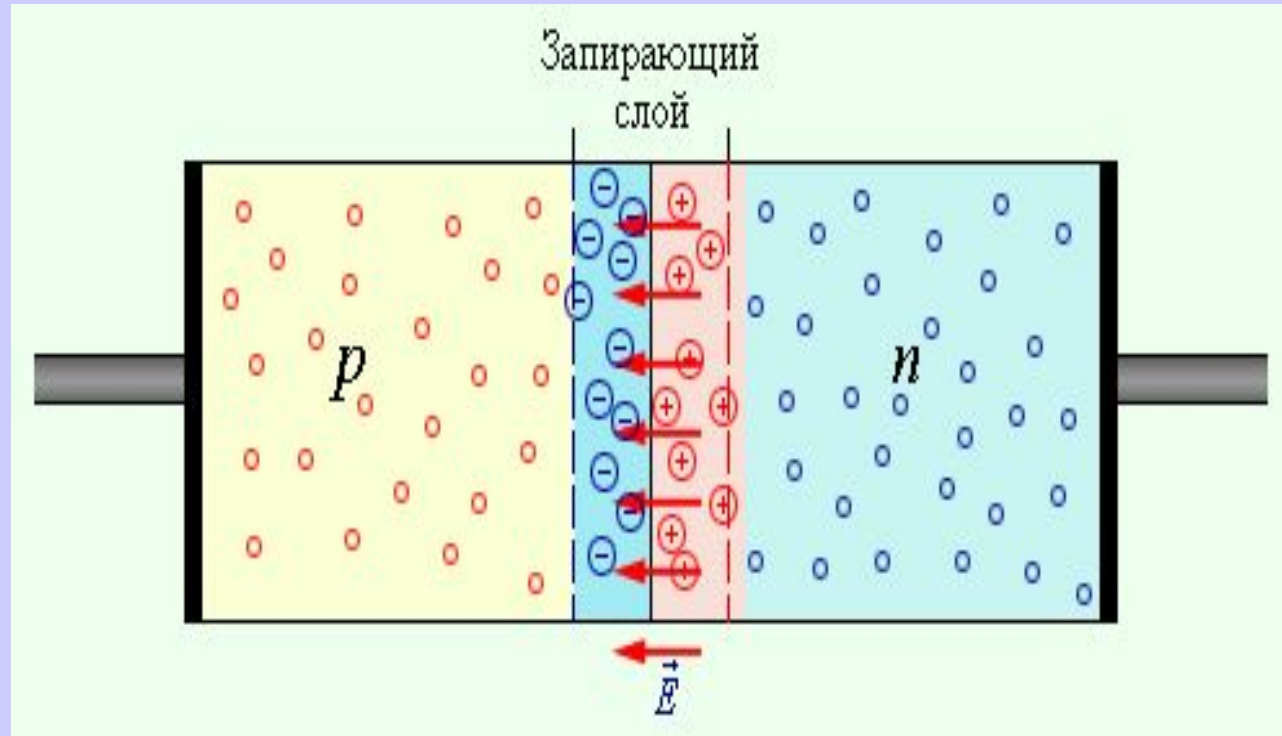
# р-n-переход

- Граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой — дырочную проводимость, называется **электронно-дырочным переходом**

- Электроны из n-полупроводника, где их концентрация выше, будут диффундировать в p-полупроводник, где их концентрация ниже, дырки же - наоборот.

- 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**

- Эти объемные заряды образуют у границы двойной электрический слой



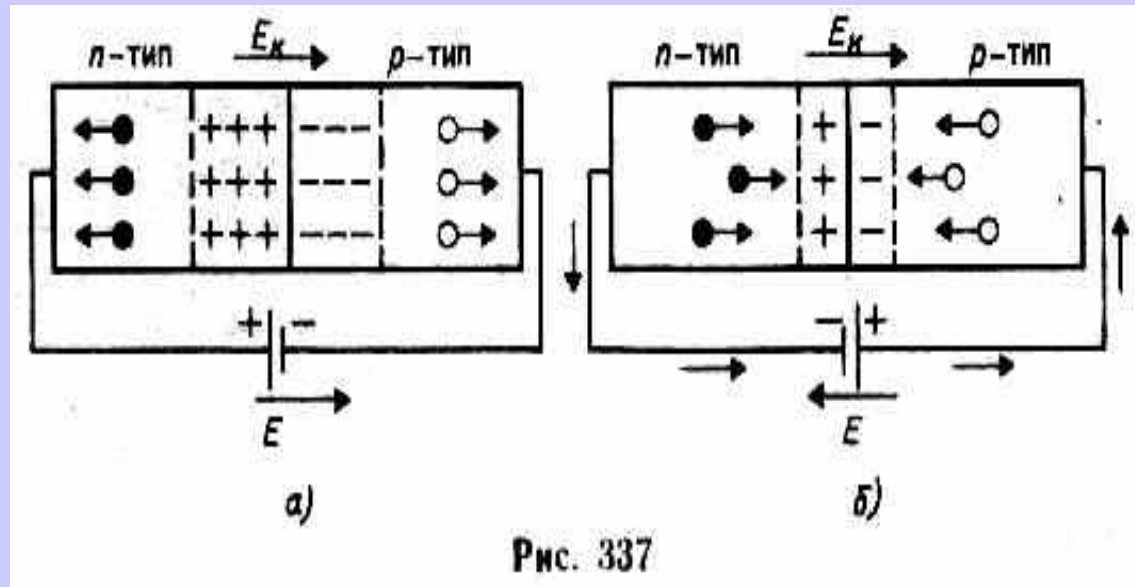


Рис. 337

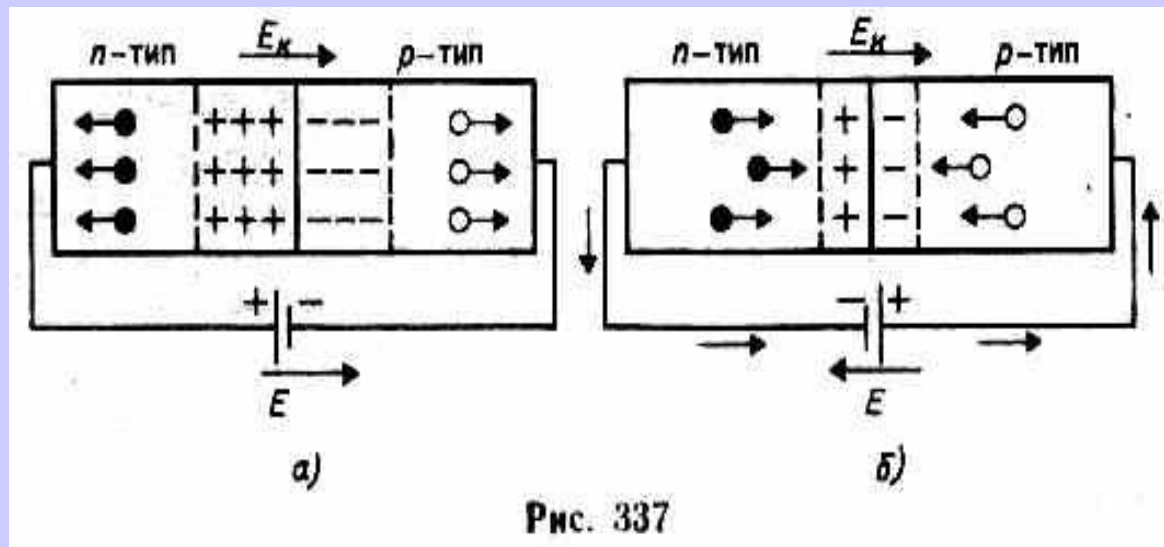
- Если приложенное к р-п-переходу внешнее электрическое поле совпадает с направлением поля контактного слоя, то запирающий слой расширится и его сопротивление возрастет.

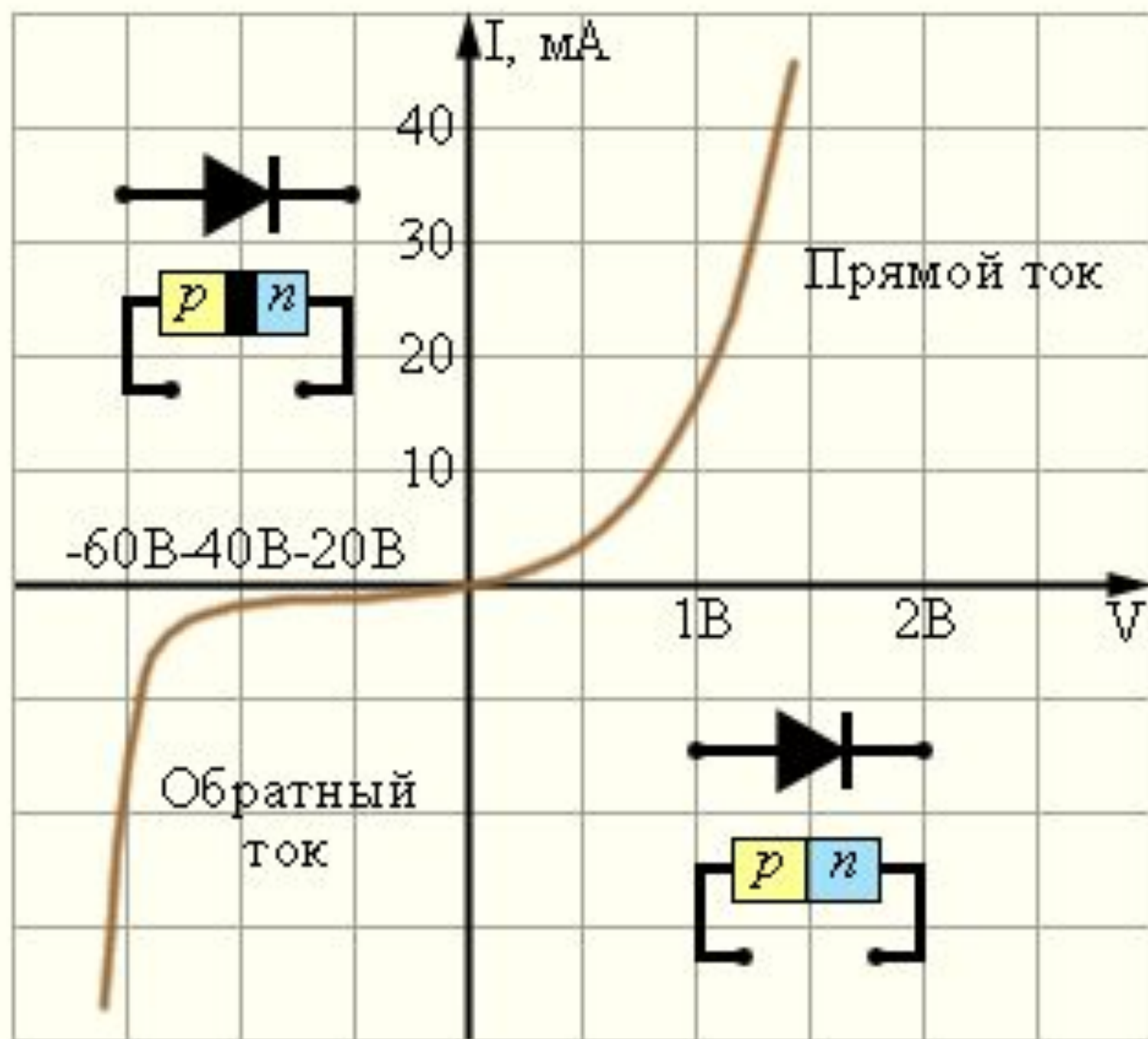
- Направление внешнего поля, расширяющего запирающий слой, называется **запирающим**
- В этом направлении электрический ток через р-п-переход практически не проходит

- Если приложенное к р-п-переходу внешнее электрическое поле направлено *противоположно* полю контактного слоя , то оно вызывает движение электронов в п-полупроводнике и дырок в р-полупроводнике к границе р-п-перехода навстречу друг другу
- В этой области они рекомбинируют, *толщина контактного слоя и его сопротивление уменьшаются.*

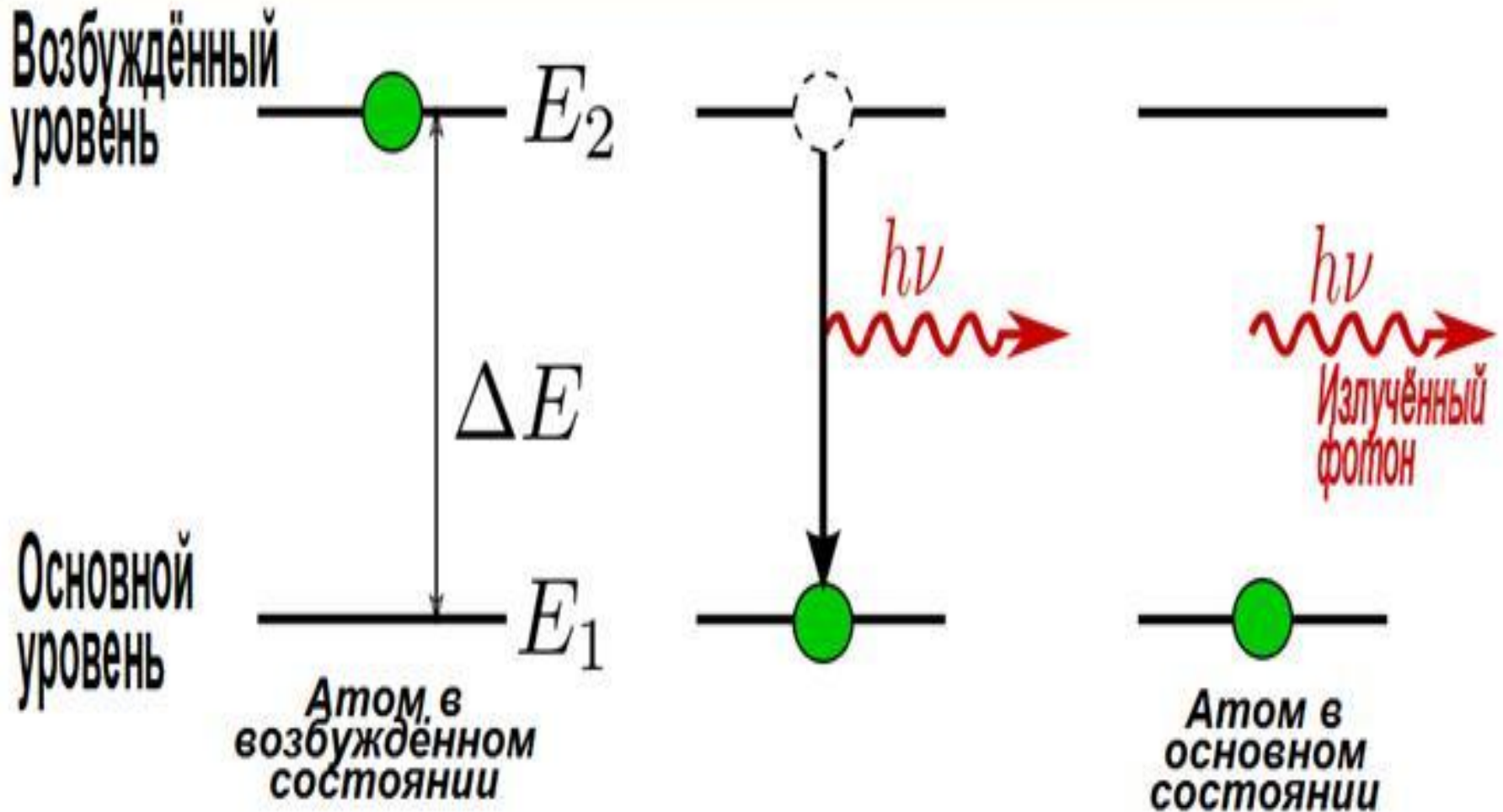


- В этом направлении электрический ток проходит сквозь р-п-переход в направлении от р-полупроводника к п-полупроводнику;





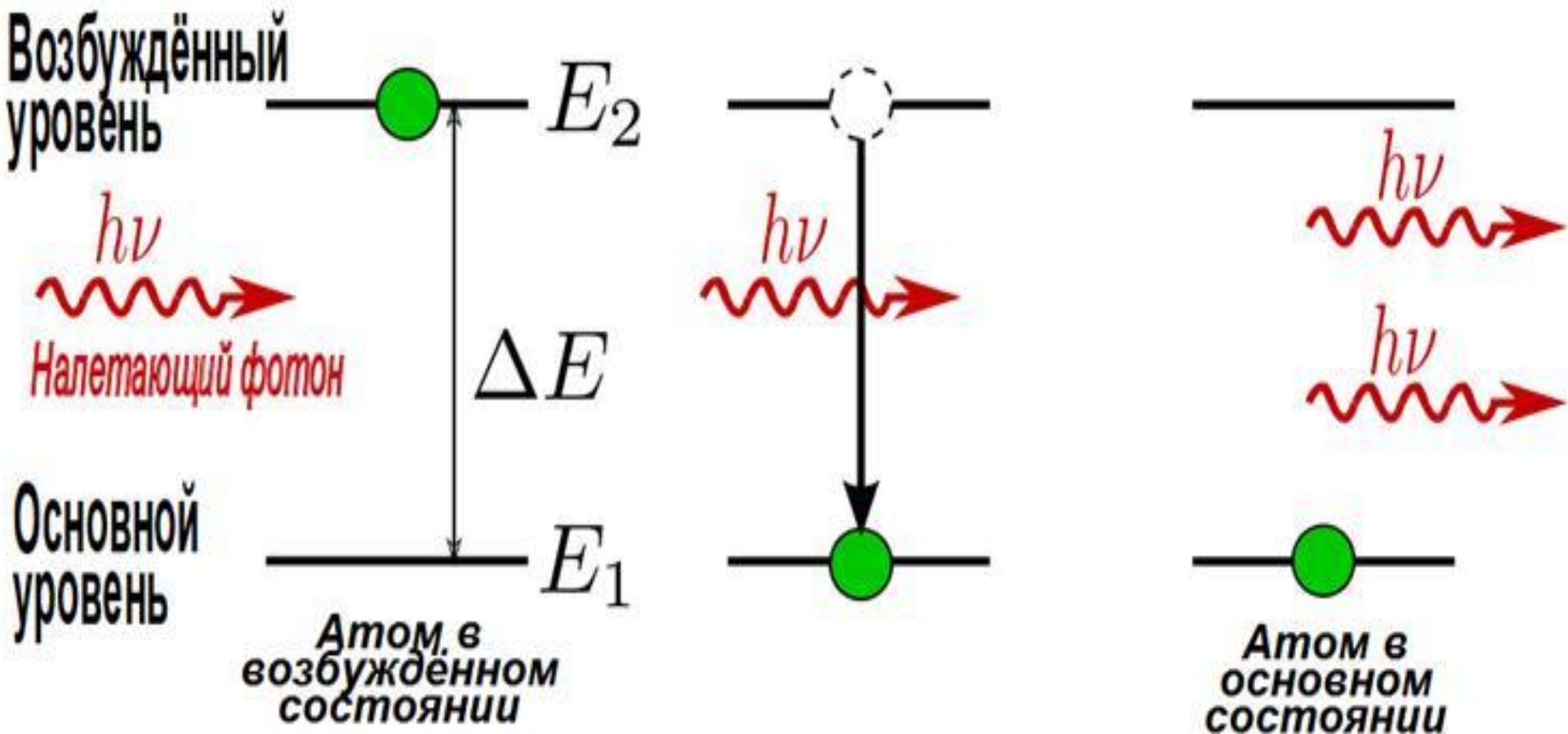
# Лазер



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

- **Спонтанное излучение** - излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое.
- Спонтанное излучение различных атомов происходит **некогерентно**, так как каждый атом начинает и заканчивает излучать независимо от других.

# Индукцированное излучение



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

- **Индукцированное (вынужденное) излучение** - излучение возбужденных атомов под действием падающего на них света.
- При индуцированном излучении, частота, фаза, поляризация и направление распространения оказываются такими же, как и у волны, падающей на атом.

# Принцип действия лазера.

- В 1940 г. советский физик В. А. Фабрикант указал на возможность использования явления вынужденного излучения для усиления электромагнитных волн. Российские ученые Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и американский физик Ч. Таунс, создавшие в 1954 г. квантовый генератор излучения, работающий в сантиметровом диапазоне, были удостоены в 1964 г. Нобелевской премии по физике.
- Первый лазер, работающий на кристалле рубина в видимом диапазоне, был создан в 1960 г. американским физиком Т. Мейманом.
- Слово "лазер" образовано начальными буквами английских слов light amplification by stimulated emission of radiation ("усиление света с помощью вынужденного излучения").

- **Лазер** - источник излучения, усиливаемого в результате индуцированного излучения.
- Усиление излучения, падающего на среду, возникает тогда, когда интенсивность индуцированного излучения превысит интенсивность поглощенного излучения.
- Это произойдет в случае инверсной населенности, если в возбужденном состоянии находится больше частиц, чем в основном  $n_2 > n_1$ .



- **Инверсная населенность энергетических уровней** - неравновесное состояние среды, при котором концентрация атомов в возбужденном состоянии больше, чем концентрация атомов в основном состоянии.
- Спонтанные переходы являются фактором, препятствующим накоплению атомов в возбужденном состоянии. Этим можно пренебречь, если возбужденное состояние метастабильно.
- **Метастабильное состояние** - возбужденное состояние электрона в атоме, в котором он может находиться достаточно долго (например,  $10^{-3}$  с) по сравнению с обычным возбужденным состоянием ( $10^{-8}$  с).

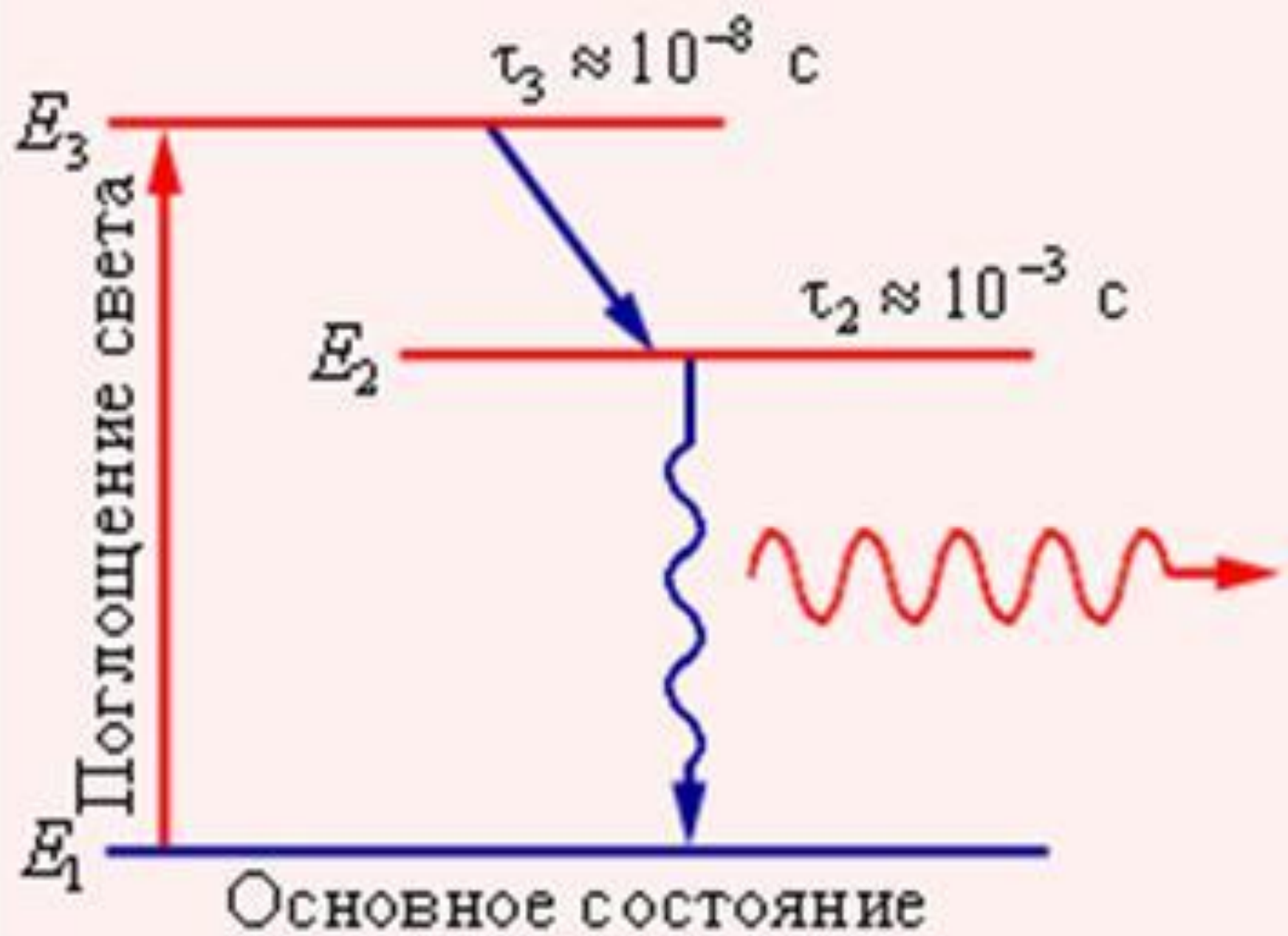
# Принцип действия рубинового лазера

- Рубин представляет собой кристалл оксида алюминия  $Al_2O_3$ , в котором часть атомов алюминия замещена ионами хрома  $Cr^{3+}$ .
- С помощью мощного импульса лампы-вспышки ("оптической накачки") ионы хрома переводятся из основного состояния  $E_1$  в возбужденное  $E_2$ .

- Через  $10^{-8}$  с ионы, передавая часть энергии кристаллической решетке, переходят на метастабильный энергетический уровень  $E_2 < E_3$ , на котором они начинают накапливаться.
- Малая вероятность спонтанного перехода с этого уровня в основное состояние приводит к инверсной населенности:  $n_2 > n_1$ .
- Случайный фотон с энергией

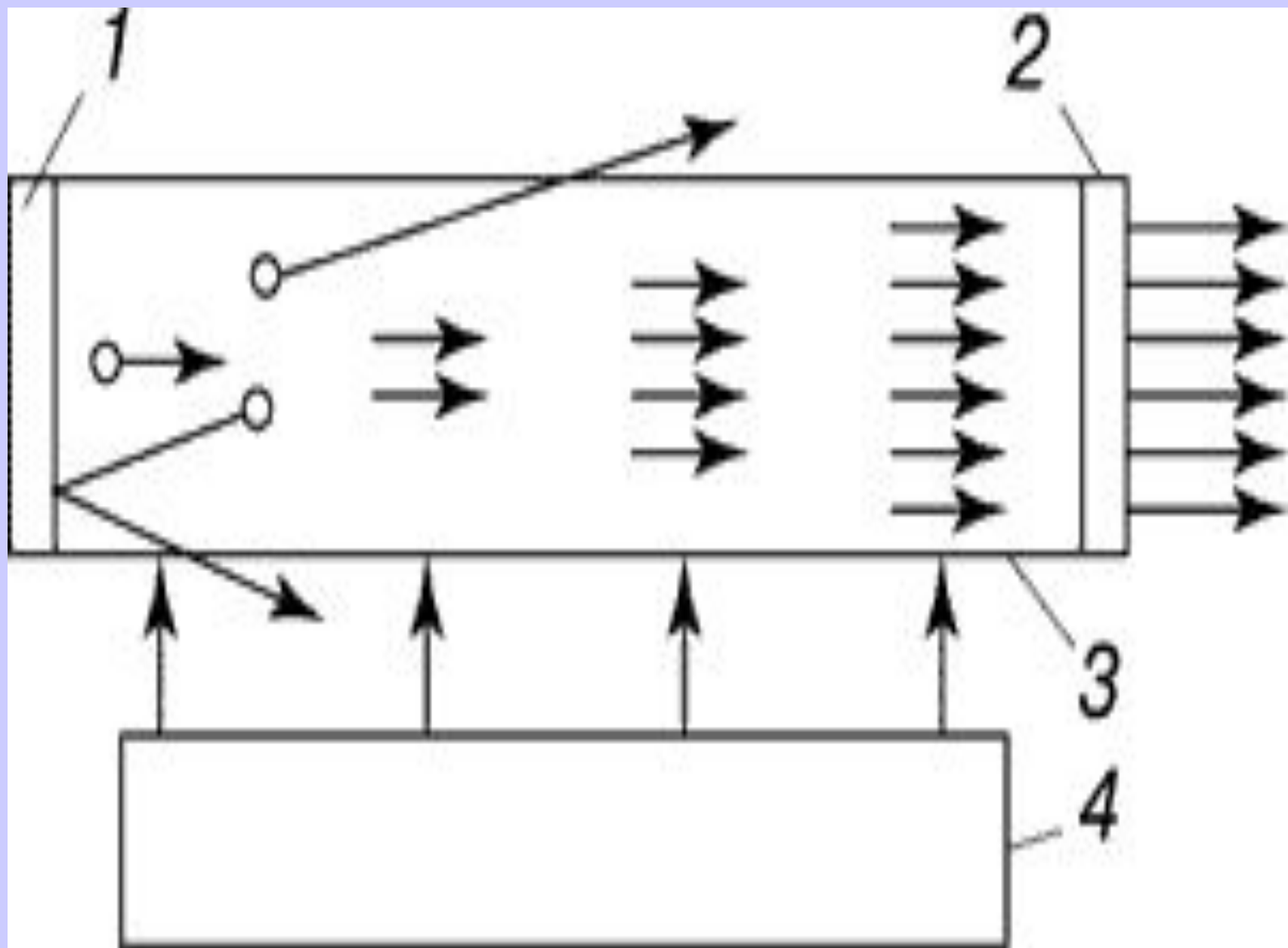
$$h\nu = E_2 - E_1$$

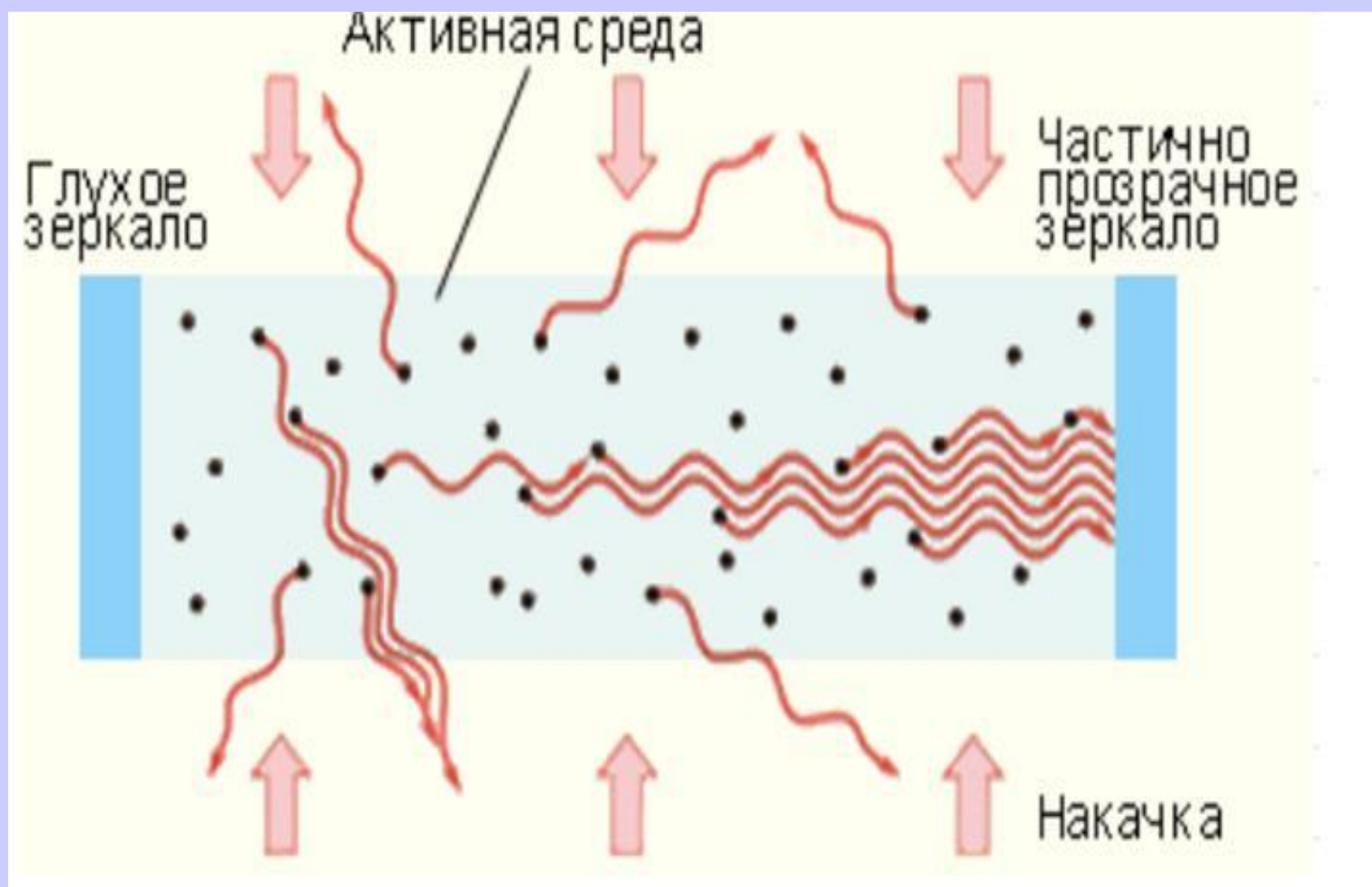
может вызвать лавину индуцированных когерентных фотонов.

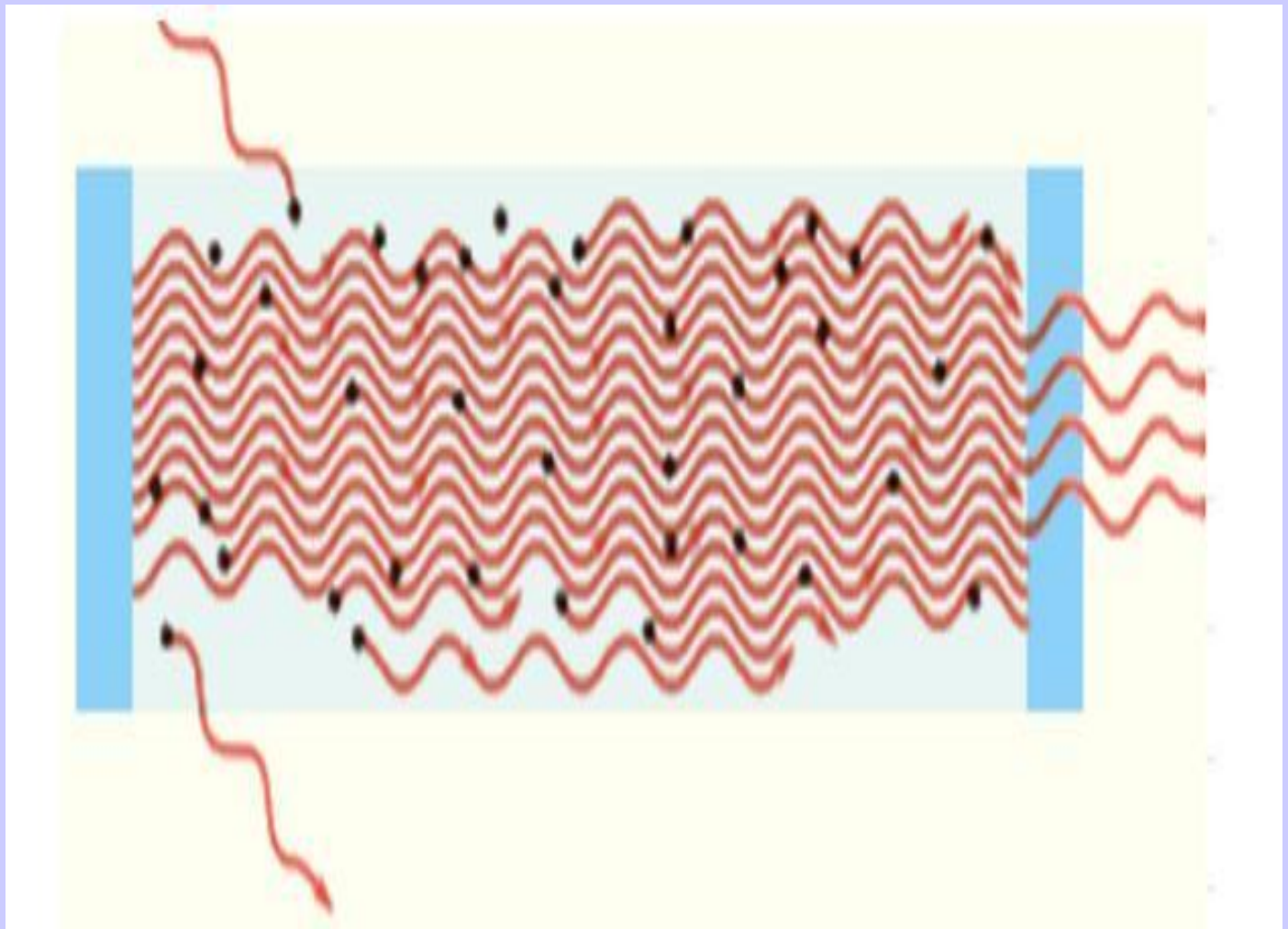


## **Основные элементы лазера**

- **оптический резонатор**, состоящий из полностью отражающего зеркала (1) и частично пропускающего (около 50%) выходного зеркала (2)
- **активная среда** (3)
- **устройство накачки** (4)









- Индуцированное излучение, распространяющееся вдоль оси цилиндрического кристалла рубина, многократно отражается от его торцов и быстро усиливается.
- Один из торцов рубинового стержня делают зеркальным, а другой - частично прозрачным. Через него выходит мощный импульс когерентного монохроматического излучения красного цвета с длиной волны 694,3 нм.

# Основные свойства лазеров

- Монохроматичность
- Когерентность
- Малая угловая расходимость
- Высокая мощность излучения