

Напівпровідники. Електронно-
дірковий перехід

**Semiconductors. Electron-hole
Junction**

Напівпровідники в електроніці

- *Напівпровідники* – це дещо середнє між провідниками і діелектриками.
- До них належать:
 - багато хімічних елементів (германій, кремній, селен, телур, миш'як та ін.),
 - величезна кількість сплавів і хімічних з'єднань,
 - майже всі неорганічні речовини, що нас оточують.
- Найпоширенішим в природі напівпровідником є кремній, з якого складається земна кора майже на 30% .
- Головна особливість напівпровідників – їхні фізичні властивості сильно залежать від зовнішніх впливів, зокрема температури або найменшої кількості домішок.

Цілеспрямовано змінюючи температуру напівпровідника або легуючи його (додаючи домішки), можна керувати його фізичними властивостями, зокрема, електропровідністю.

Semiconductors in Electronics

- *Semiconductors* are something in between of conductors and dielectrics.
- Among them:
 - Many chemical elements (Germanium, Silicon, Selenium, Tellurium, Arsenic, etc.),
 - Big number of fusions and chemical compounds,
 - Almost all organic matters around us.
- The most widespread semiconductor in the nature is silicon. Earth's crust consists of silicon (almost 30 %).
- Main feature of semiconductors: their physical properties strongly depend on external influences, especially on temperature and even on small amount of admixture (additive, impurity)

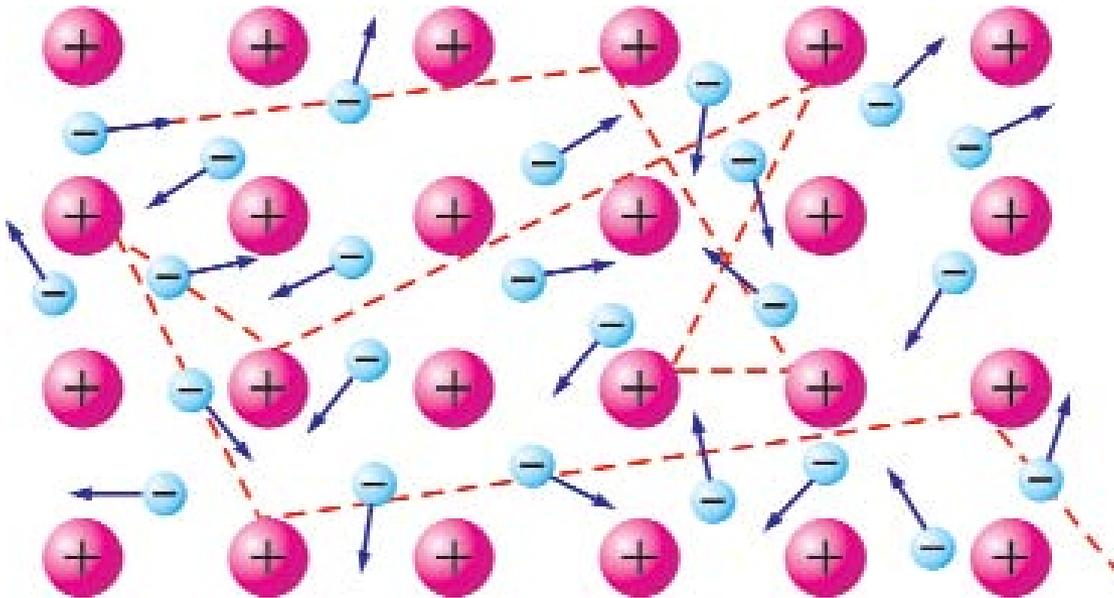
Purposeful change of semiconductor temperature or addition of admixture (alloying - легирование) allow to control of its physical properties, in particular, its conductivity.

- Бурное развитие полупроводниковой электроники началось с изобретением сначала точечного (1948г.), а затем и плоскостного (1951г) транзистора – основы любой современной микросхемы.
- Чтобы понять принцип работы транзистора, надо рассмотреть ряд физических процессов, протекающих в полупроводниках.
- Для начала рассмотрим суть электропроводности, то есть способности различных веществ проводить ток.
- Как известно, все вещества состоят из атомов, соединенных химическими связями, во многом определяющими их физикохимические свойства, в частности, электропроводность.
- Так, например, соль или дерево не проводят ток, являясь хорошими диэлектриками, в то время как металлическая проволока служит превосходным проводником тока. В чем же секрет высокой электропроводности металлов?

- Booming growth of semiconductor electronics began when transistor was invented: first point-contact transistor (1948), and then junction transistor (1951), which is the basis of any modern IC.
- In order to understand the principle of transistor operation, one should consider some physical processes in semiconductors.
- First let us consider the essence of conductivity, that is, ability of different matters to conduct electric current.
- As we know, all matters (substance) consist of atoms that are related by links. These links (chemical links) define physicochemical properties of a matter, and in particular the conductivity.
- For example, salt or wood does not conduct electric current. They are good dielectric (insulators). In contrast, metal wire is excellent conductor.
- Why? What is the secret of high level of conductivity of metals?

Электропроводность металлов

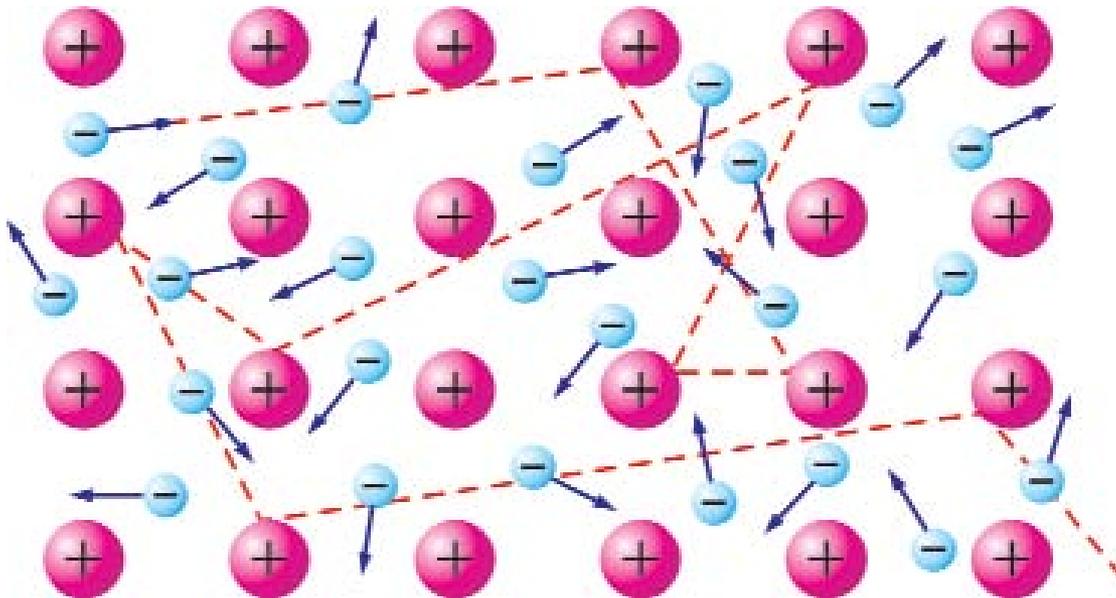
- Атомы в кристаллической решетке металлов упакованы очень плотно – каждый атом может быть непосредственно связан с 12ю соседними. Поэтому электроны внешних оболочек (**outer shell**) атомов (валентные электроны) оказываются “свободными” и не участвуют в межатомных (**interatomic**) взаимодействиях.



- Эти электроны могут беспорядочно двигаться, образуя так называемый “электронный газ”, в который погружены положительные ионы металла, расположенные в узлах кристаллической решетки (**crystal lattice**).

Conductivity (electroconductivity) of metals

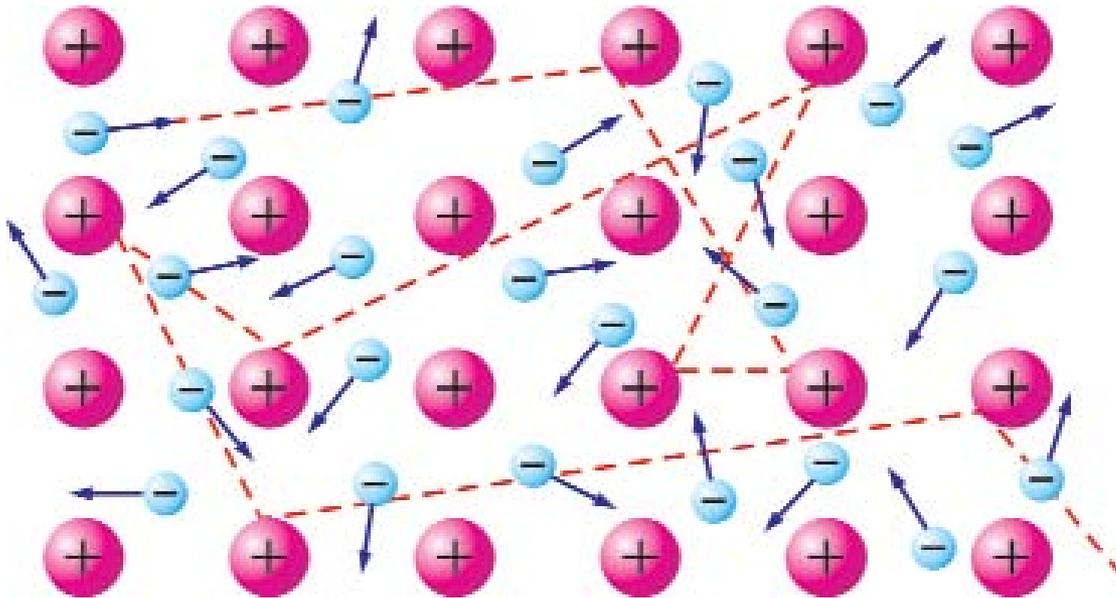
- The atoms in the crystal lattice of metal are packed very tightly: each atom can be directly linked to 12 neighboring atoms.
- Therefore, the electrons of the outer shells of the atoms (the valence electrons) are "free" and do not participate in the interatomic interactions.



- These electrons can move randomly. They form so-called "electron gas".
- Positive metal ions that are located in the crystal lattice are shipped into this gas.

Электропроводность металлов

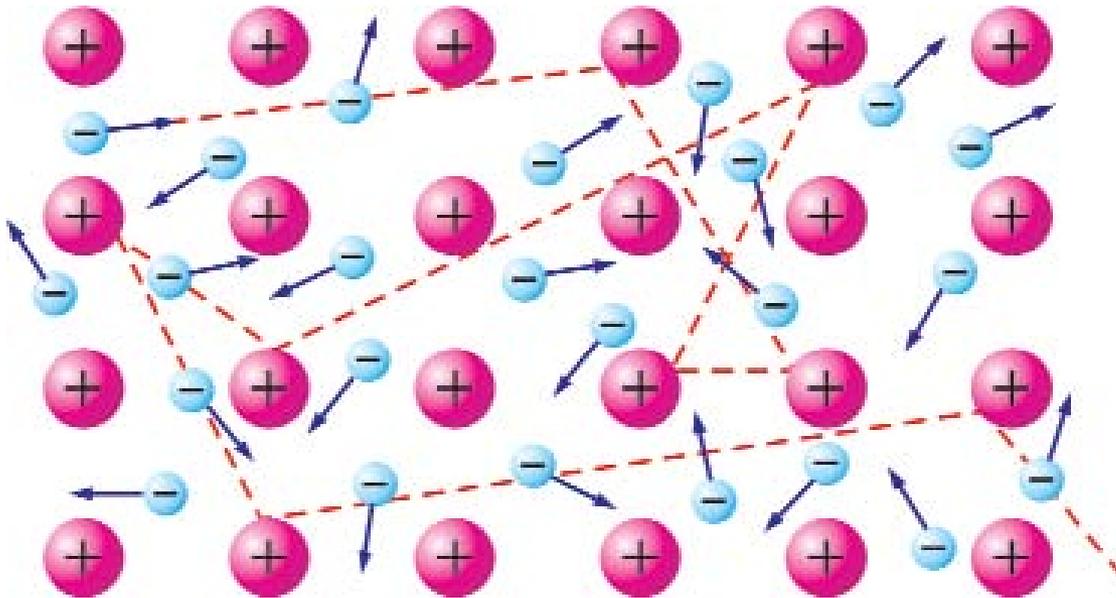
- При комнатной температуре у электронов не хватает энергии для преодоления потенциального барьера. Но если приложить к металлической проволоке разность потенциалов, то по ней потечет электрический ток, образованный свободными электронами, постоянно присутствующими в кристалле.



- Именно высокая концентрация свободных электронов и обуславливает высокую электропроводность всех металлов.

Conductivity of metals

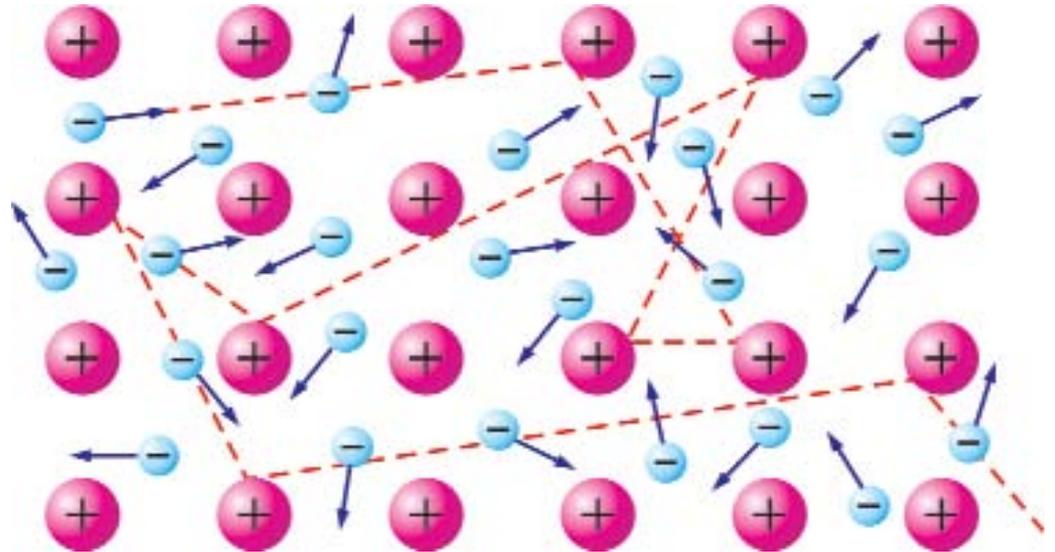
- At room temperature, the electrons do not have enough energy to overcome the potential barrier. But if you put some potential difference to a metal wire, then electric current will begin to flow. It is formed by the free electrons which are always present in the crystal.



- It is the high concentration of free electrons that results in a high electrical conductivity of all metals.

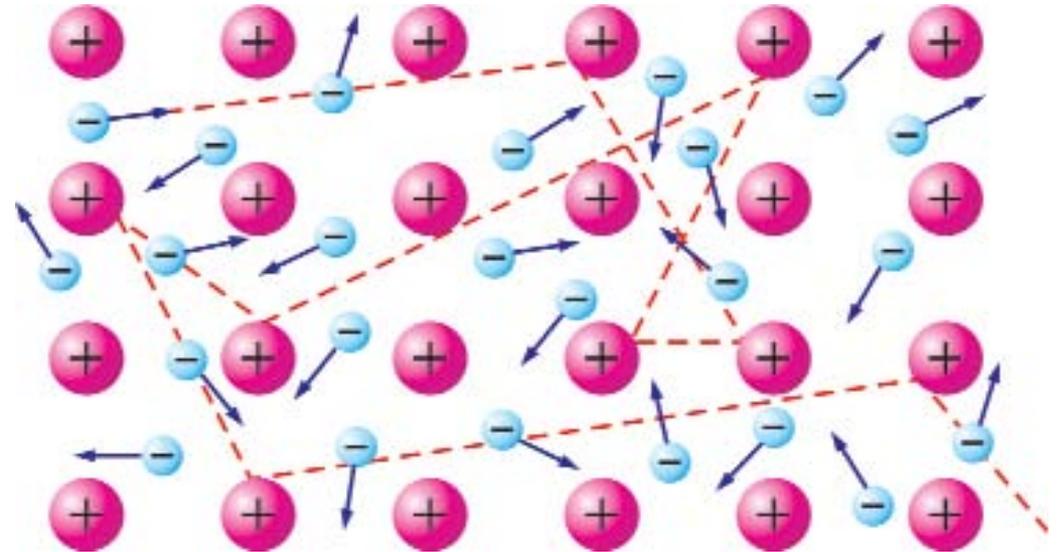
Электропроводность металлов

- Как ионы, образующие решетку, так и электроны участвуют в тепловом движении. Ионы совершают тепловые колебания в узлах решетки. Свободные электроны движутся хаотично и сталкиваются с ионами решетки.
- Из-за взаимодействия с ионами электроны могут покинуть металл, лишь преодолев так называемый потенциальный барьер.
- Высота этого барьера называется **работой выхода** - work function



Conductivity of metals

- Both the ions and electrons forming the lattice are involved in thermal motion. The ions perform thermal vibrations of the lattice sites. The free electrons move randomly and collide with the ions of the lattice.



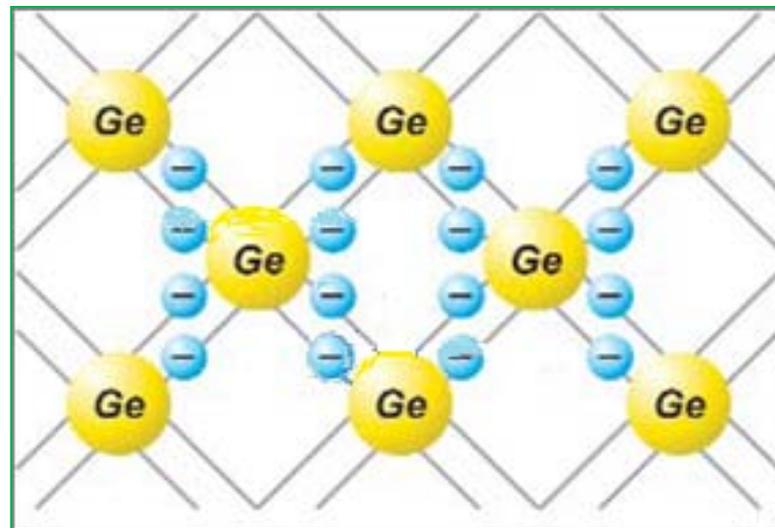
- Because of the interaction with ions, electrons can leave the metal, only by overcoming the so-called potential barrier.

- The height (magnitude) of this barrier is called the work function

Электропроводность полупроводников

- Рассмотрим теперь кристаллическую решетку полупроводниковых кристаллов. Для полупроводников характерна *ковалентная связь между атомами (covalent bond)*
- В качестве примера рассмотрим кристалл германия (Ge), имеющий четыре валентных электрона.
- Благодаря прочности ковалентной связи электроны в кристалле германия гораздо более локализованы, чем в металлах.
- Это означает, что в обычных условиях его проводимость на порядки меньше, чем у металлов (из-за отсутствия “свободных” нелокализованных электронов).

Химическая связь называется ковалентной, если она образована путем обобществления пары электронов обоими атомами.



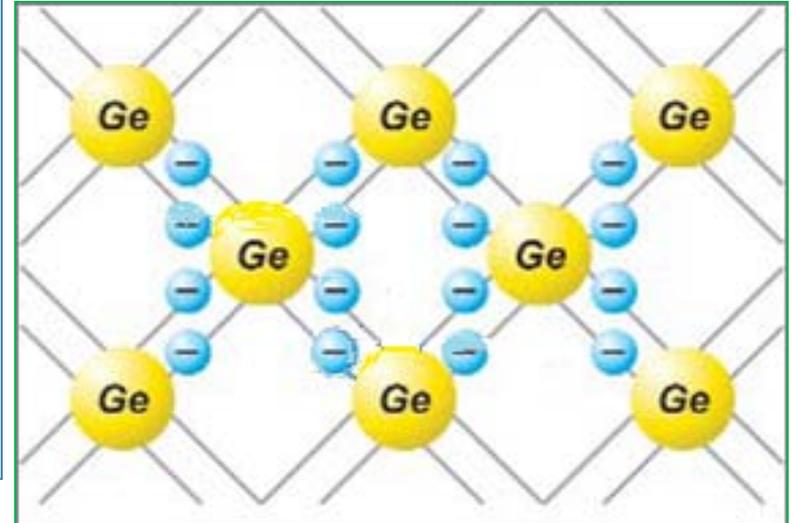
Electroconductivity of semiconductors

- Consider a crystal lattice of semiconductor crystals. The **covalent bond** between atoms is typical for them.

- As an example let us consider a Ge crystal. It has 4 interbond (valence, valent) electrons.

- Because of covalent bond (which is extremely strong) the electrons in Ge crystal are much more localized than ones in metals.

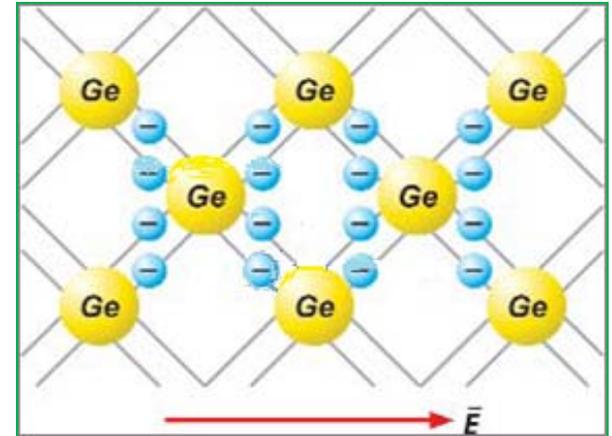
A link (химическая связь) is referred as **covalent**, if it is formed by the collectivization of electron pair by both atoms.



- This means that under conventional conditions its conductivity is many times less (several orders) than conductivity of metals (due to absence of “free” non-localized electrons).

Электропроводность полупроводников

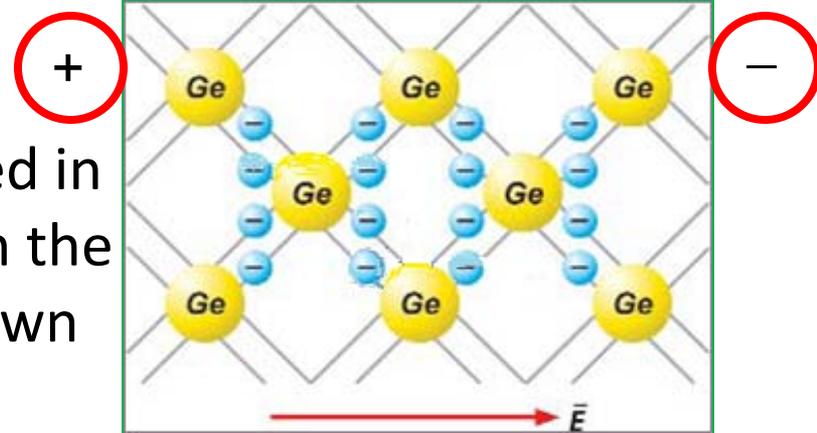
- Что же будет, если к такому кристаллу приложить разность потенциалов?
- Даже если в кристалле будет создано сильное электрическое поле, оно сможет лишь чуть-чуть деформировать электронные орбиты, но разорвать их полностью окажется не в состоянии.
- Свободных носителей заряда в кристалле не возникнет, и, следовательно, не будет электрического тока. Таким образом, в “чистом виде” кристалл германия представляет собой обычный диэлектрик.
- Чтобы в кристалле германия появились свободные носители заряда, необходимо как-то нарушить их стабильные ковалентные связи. Достичь этого можно различными способами.



Electroconductivity of semiconductors

- What will be, if a potential difference is applied to such a crystal?

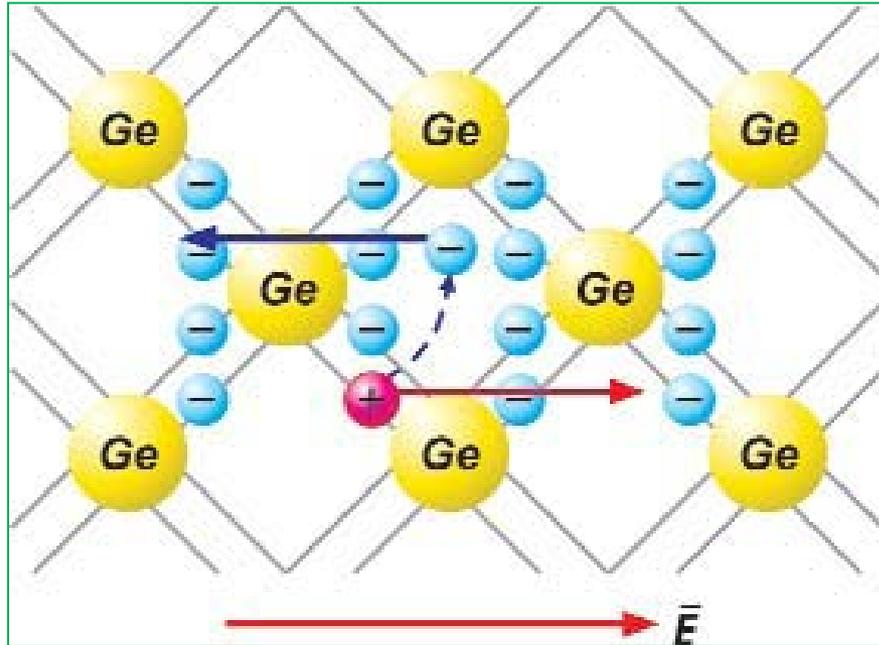
- Even if a strong electric field is created in the crystal, it can only slightly deform the electronic orbits, but not to break down them completely.



- The free carriers of charge will not arise in the crystal, and hence, no electric current appears. Thus, a crystal of Ge in a “pure form” behaves as an usual dielectric.
- In order to create some free carriers of charge in the crystal, it is necessary to break down the interatomic stable covalent links. This goal can be achieved by different ways.

Электропроводность полупроводников

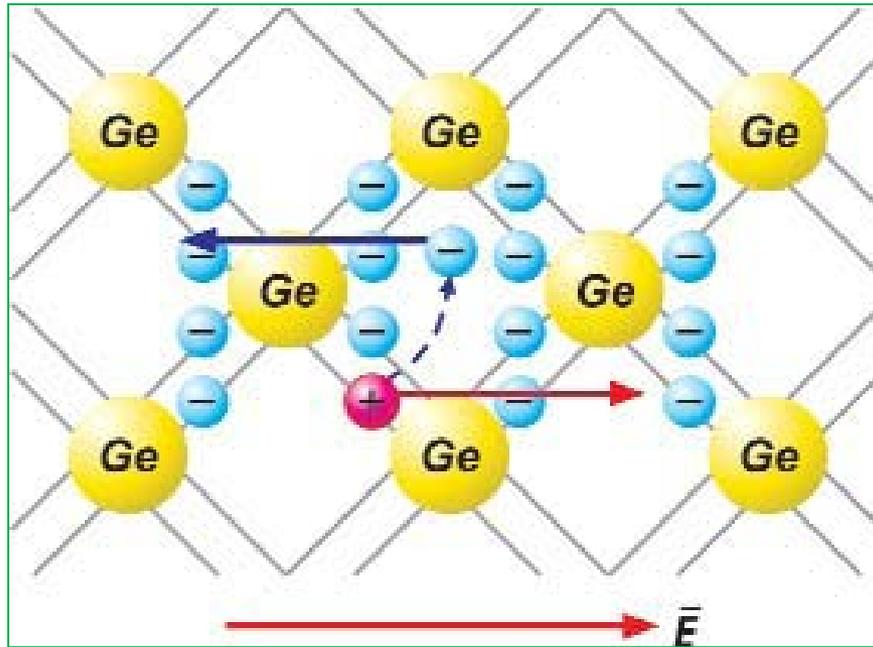
- Перший спосіб. Кристалл можно просто нагреть, придав его электронам дополнительную энергию, достаточную для того, чтобы разрушить межатомные электронные связи.



- Предположим, в результате нагревания одна из связей разорвалась, а выбитый со своей орбиты электрон оказался между четырьмя соседними атомами.

Electroconductivity of semiconductors

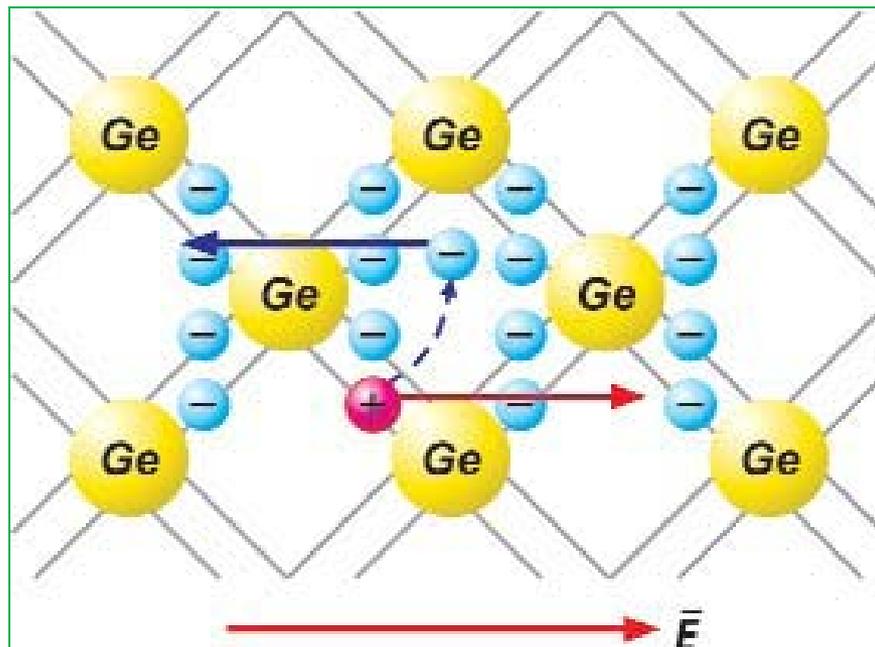
- The first method. A crystal can be simply warmed giving additional energy to its electrons. This energy should be sufficient to destroy interatomic electronic connections.



- Suppose that as a result of heating, one of the links was torn. The electron knocked out from the orbit appeared between four nearby atoms.

Электропроводность полупроводников

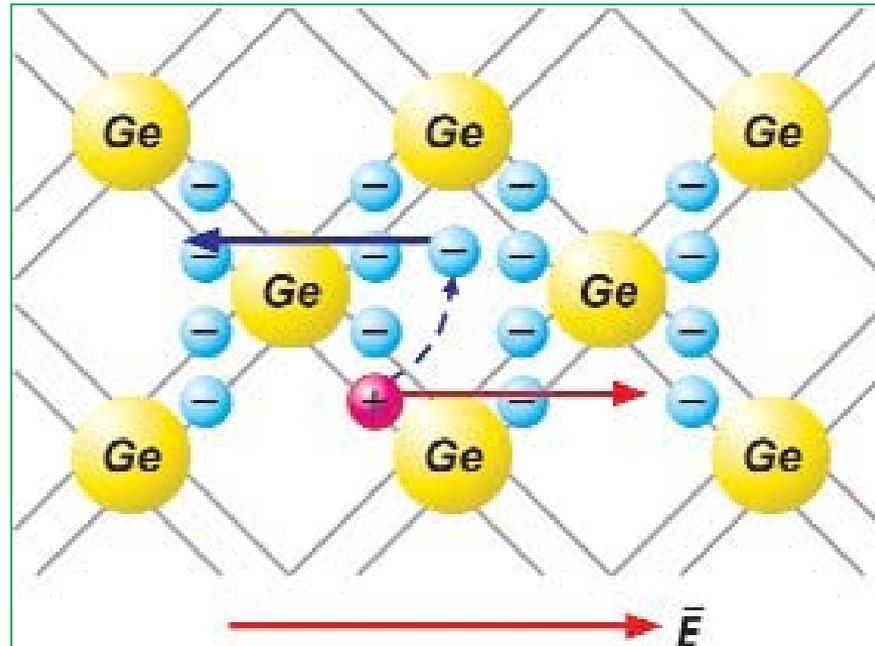
- Что в это время происходит с разорванной связью?



- Появившаяся у нее дополнительная энергия позволяет захватить электрон из соседней связи. В свою очередь, вновь образовавшаяся “дырка” также “отнимает” электрон у соседней связи и т.д.

Electroconductivity of semiconductors

- What is happening with the broken link in the same time?



- It gets additional energy, which allows to capture an electron from the next link. As a result a new “hole” arises that, in turn, also “takes away” an electron from a next link, etc.

Electroconductivity of semiconductors

- Такая неполная связь хаотично перемещается между атомами решетки. Движение разорванных связей происходит за счет перехода электронов, участвующих в соседних связях, а не свободных электронов, т.е. каждый раз в кристалле появляется очередная неполная связь.
- Это можно уподобить случаю, когда в заполненном зрительном зале уходит один из зрителей первого ряда и его место занимает сидящий за ним. При этом пустое место перемещается по залу от первого ряда к последнему противоположно движению зрителей.
- Когда разорванная связь перемещается по кристаллу, то движется и созданный ею нескомпенсированный положительный заряд. Это можно рассматривать как появление положительно заряженных частиц, величина заряда которых равна заряду электрона. Такие квазичастицы получили название **“дырок”**.

Electroconductivity of semiconductors

- Such incomplete link randomly moves between the atoms of the lattice. The movement of the broken links occurs due to the transition of electrons from next links, but they are not free electrons, i.e. every time the next incomplete link occurs in the crystal.
- Imagine that in the filled auditorium with many rows, a spectator sitting in the first row leaves his seat, and that seat is immediately occupied by the next person from the second row. It looks like the empty seat is moving gradually from the first row to the last one. Empty seat moves in the opposite direction relatively to movement of the persons (spectators).
- The broken link moves inside the crystal; an uncompensated positive charge, created by it, moves too. This phenomenon can be conditionally considered as occurrence of **positively** charged particles with the same charge as electrons. Such quasi-particles have been named “HOLES”.

Electroconductivity of semiconductors

- Свободный электрон и дырка существуют в кристалле не вечно. Спустя некоторое время, составляющее от 10^{-10} до 10^{-2} с, свободный электрон и дырка встречаются и *рекомбинируют*.
- При рекомбинации выделяется энергия, которая была затрачена на создание электроннодырочной пары. Иногда она выделяется в виде излучения, но чаще она передается кристаллической решетке, нагревая ее. Такая проводимость называется ***собственной электропроводностью полупроводников***.
- Дырки рождаются и гибнут только парами вместе со свободными электронами, поэтому концентрации электронов (n) и дырок (p) в собственном полупроводнике (без примесей) равны:
$$p = n$$

Electroconductivity of semiconductors

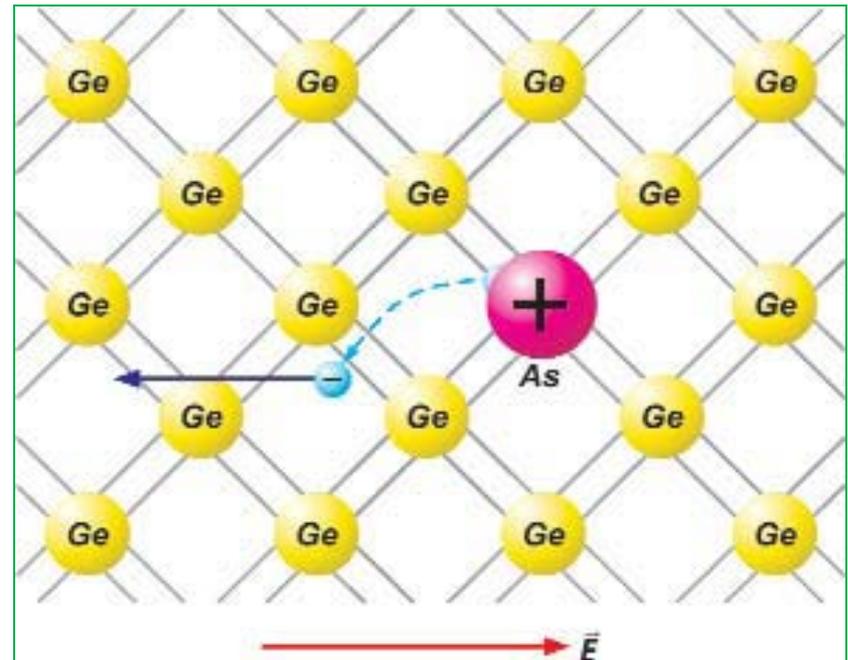
- A free electron and a hole exist in the crystal not perpetually. In some time (10^{-10} to 10^{-2} sec) the free electron meets a hole, and they recombine.
- During the recombining, the energy is evolved. The magnitude of this energy is the same as was used for creation of electron-hole pair. Sometimes it can be a kind of radiation, but more often this energy just heats the crystal lattice.
- Such conductivity is called **self-conductance of semiconductors**.
- The holes are born and die only by pairs together with free electrons. That is why the concentration of electrons (n) and the concentration of holes (p) in a self-semiconductor (without impurities) are equal:

$$p = n$$

Электропроводность полупроводников

- Другой способ – намеренное введение в кристалл различных примесей (impurity). Рассмотрим ситуацию, когда в четырехвалентный проводник, например, в кремний или германий, попадает атом пятивалентного вещества, например, мышьяк – As или фосфор – P.

Наличие пятивалентных электронов в атоме As говорит о его способности организовывать химические связи с пятью соседними атомами. Но в кристаллической решетке германия имеется только четыре соседних атома, с которыми можно образовать связи.

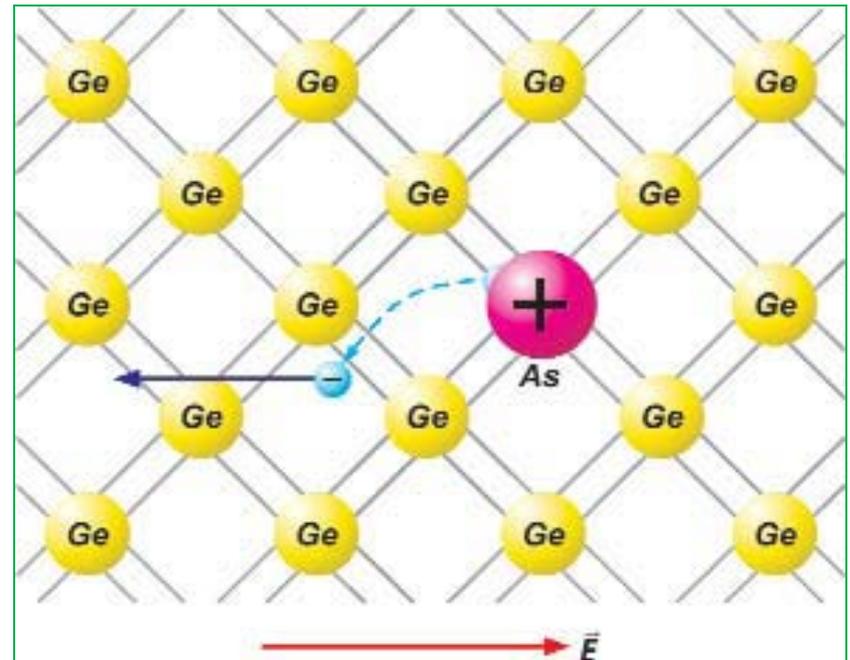


Поэтому только четыре из пяти валентных электронов мышьяка оказываются включенными в прочные химические связи.

Electroconductivity of semiconductors

- The second method is the introduction of various impurities into the crystal. Consider a situation, when a five-valent substance atom (say, Arsenic - As or Phosphorus - P) gets into a tetravalent semiconductor (for example, Silicon or Germanium).

Presence of 5 valent electrons in an atom of As means that it is able to organize the links with 5 adjacent atoms. However, there are only 4 adjacent atoms in Ge crystal lattice that can take part in creation of the links.



That is why only 4 from 5 valent electrons of As occur involved into the strong links.

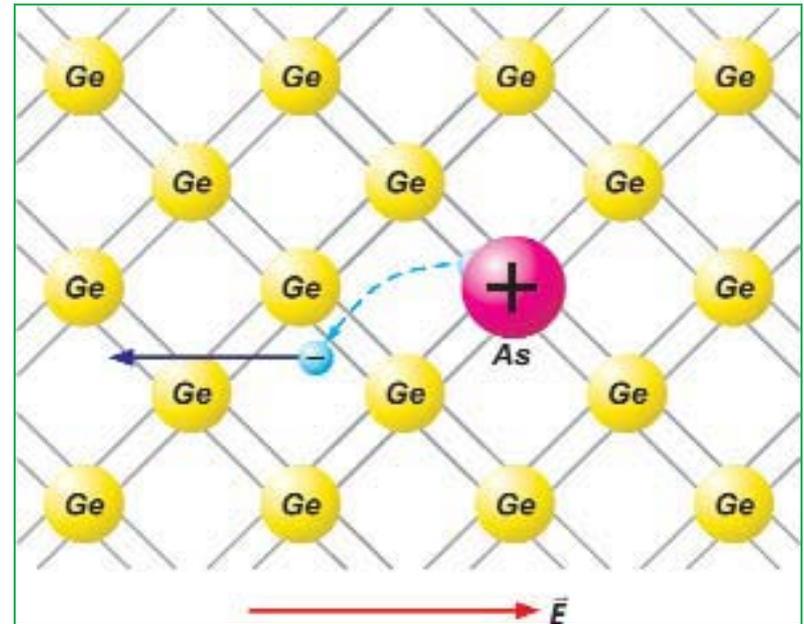
Электропроводность полупроводников

- Оставшийся же пятый электрон оказывается не задействованным в связях, вследствие чего в кристалле создаются дополнительные носители заряда – электроны.

Такие примеси называют

донорными.

Внимание: в отличие от собственной проводимости полупроводника, рождение свободного электрона здесь не сопровождается одновременным появлением дырки, поскольку межатомные связи не разрушаются.



Поэтому концентрация свободных электронов в кристалле с донорными примесями намного больше концентрации дырок:

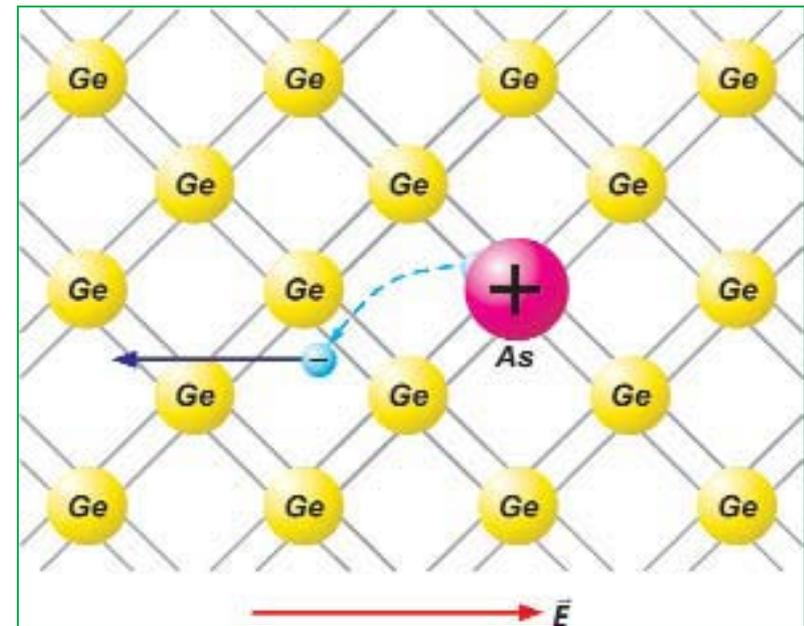
$$p < n$$

Electroconductivity of semiconductors

- Remained the fifth electron is not involved in any link; that is why in the crystal additional carriers of a charge – electrons – are created.

Such kind of impurity is called “donor”.

Attention: in contrast to self-conductivity of a semiconductor, the birth of free electron in this case is not accompanied by simultaneous appearing of a hole, because interatomic links do not collapse.



That is why the concentration of free electrons in a crystal with donor impurity is much more than concentration of holes:

$$p < n$$

Электропроводность полупроводников

- Полупроводники с донорными примесями называют *полупроводниками n-типа* (от англ. “negative”, по знаку основных носителей заряда) или *электронными полупроводниками*. Электроны в них являются основными носителями заряда.

Возможна и противоположная ситуация, когда в четырехвалентный полупроводник вводится трехвалентная примесь, например индий In или алюминий Al. Для образования связей с четырьмя соседними атомами ему не хватает одного валентного электрона. В этом случае атом примеси может легко “отобрать” недостающий электрон у соседнего атома германия (или кремния). В результате у атома германия (кремния) возникает неполная связь, способная перемещаться по кристаллу (дырка). Такие примеси называют **акцепторами**.

Electroconductivity of semiconductors

- Semiconductors with donor impurities are called n-type semiconductors (*from “negative”, according to the sign of principal carriers of charge*) or electron semiconductors. Because electrons are principal (main) carriers of charge here.

Opposite situation is also possible: when 3-valent impurity is introduced into a 4-valent semiconductor. For example, Indium (In) or Aluminum (Al) impurity in Ge.

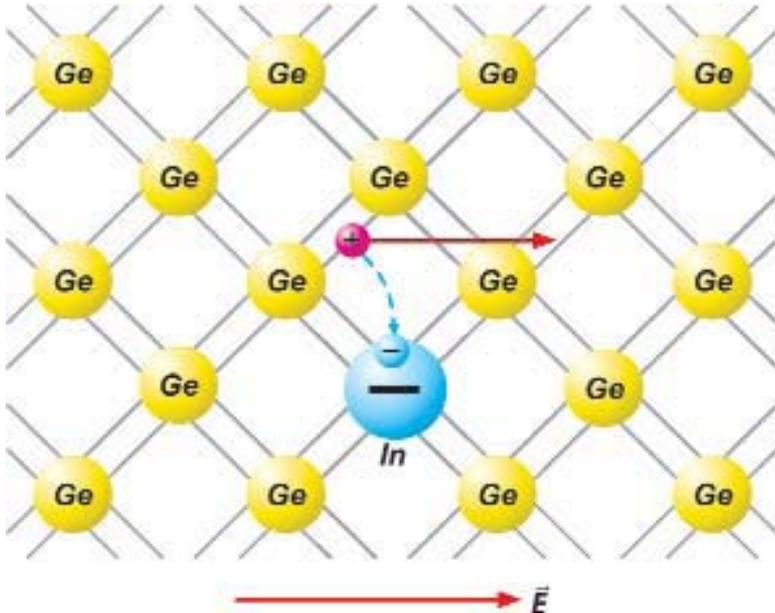
In this case one of the required electrons is absent in the crystal. Hence, the atom of impurity is able to take a lacked electron from the next atom of Ge (or Si).

As a result the atom of Ge (or Si) get an incomplete link, which is able to move along the crystal (HOLE).

Such impurities are called ***acceptors***.

Атом индия в решетке германия.

Полупроводник p -типа

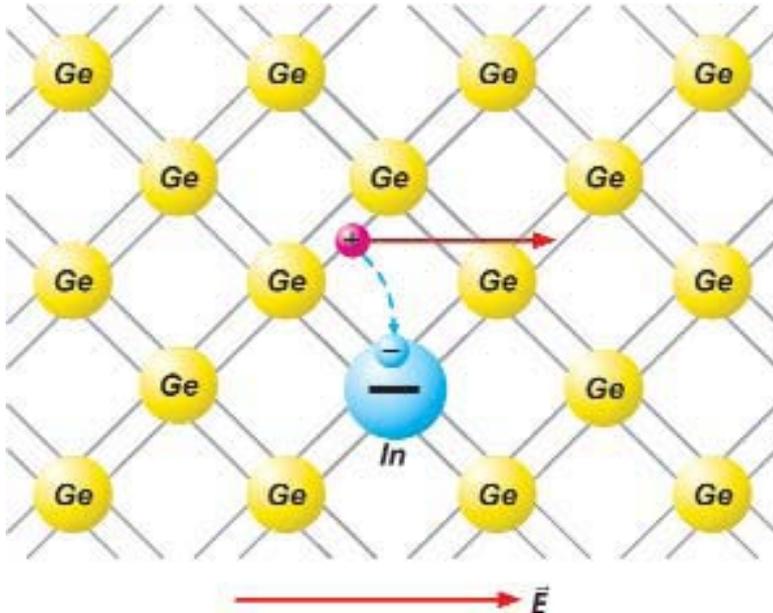


Рождение примесных дырок также не приводит к образованию электроннодырочных пар, и концентрация дырок в полупроводнике с акцепторными примесями выше, чем концентрация электронов:

$$p > n$$

Дырки в данном случае являются основными носителями заряда, а сам полупроводник называют *полупроводником p -типа* (от англ. positive) или *дырочным полупроводником*.

An atom of In in the lattice of Ge. P-type semiconductor



Birth of impurity holes do not lead to occurrence of electron-hole pairs; so, concentration of holes in a semiconductor with acceptor impurities is higher than concentration of electrons:

$$p > n$$

The holes in this case are the main carriers of charge; and such semiconductor is named P-type semiconductor (from Positive) or hole semiconductor.

Электроннодырочный переход

- Любой полупроводниковый прибор основан на одном или нескольких электроннодырочных переходах.

Электронно-дырочный переход (p-n переход) – это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.

Поскольку в полупроводнике n-типа концентрация электронов значительно превышает концентрацию дырок ($n \gg p$), а в полупроводнике p-типа – наоборот ($p \gg n$), то при контакте двух полупроводников разных типов начинается процесс диффузии: дырки из p-области стремительно диффундируют (переходят) в n-область, а электроны, наоборот, из n-области в p-область.

Electron-hole junction

- Any semiconductor device is based on one or several electron-hole junctions.

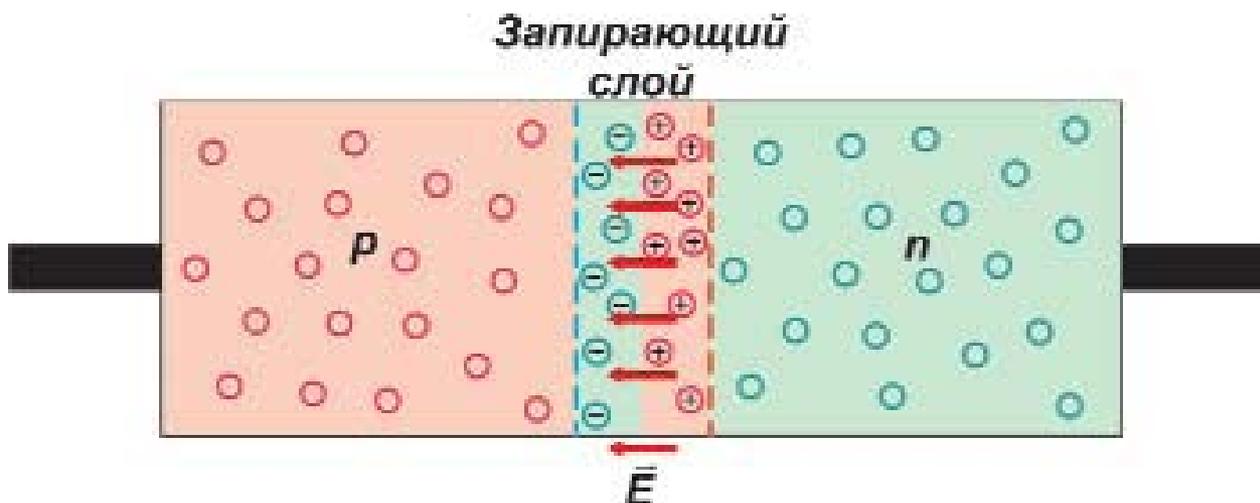
Electron-hole junction (p-n junction) – *is an area of the contact between two semiconductors with different types of conductivity.*

In n-type semiconductor, electron concentration is much higher than hole concentration ($n \gg p$), and in p-type semiconductor ($p \gg n$).

That is why in case of a contact of different types of semiconductors, a diffusion process begins immediately: the holes from p -area rush into n -area, and electrons, vice versa, go swiftly from n -area into p -area.

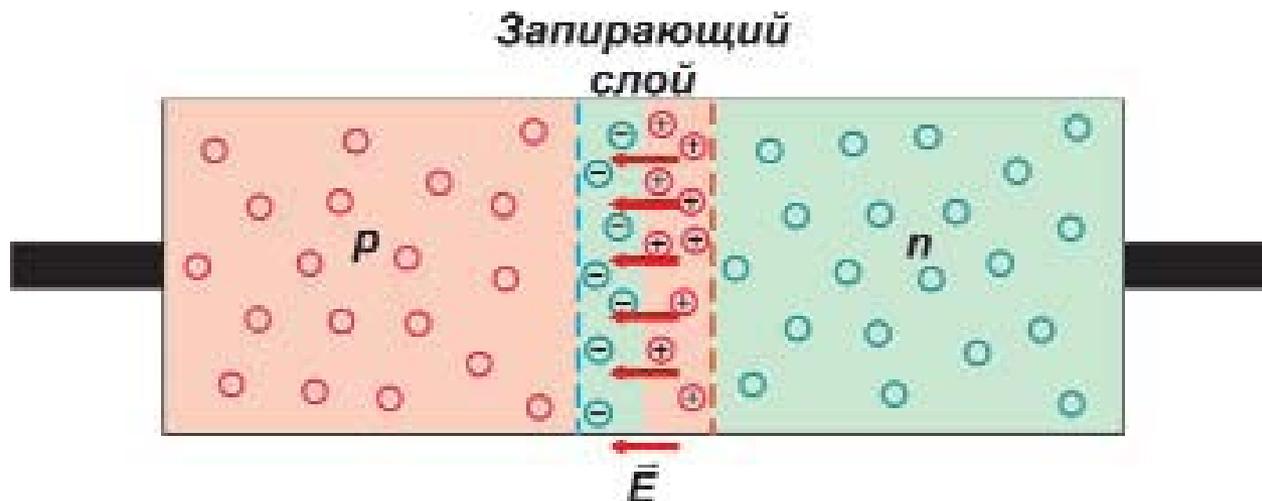
Электроннодырочный переход

- В результате диффузии в n -области на границе контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В p -области, наоборот, уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой. Таким образом на границе полупроводников образуется двойной электрический слой, препятствующий дальнейшему процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу.
- Такой слой называется **запирающим**.



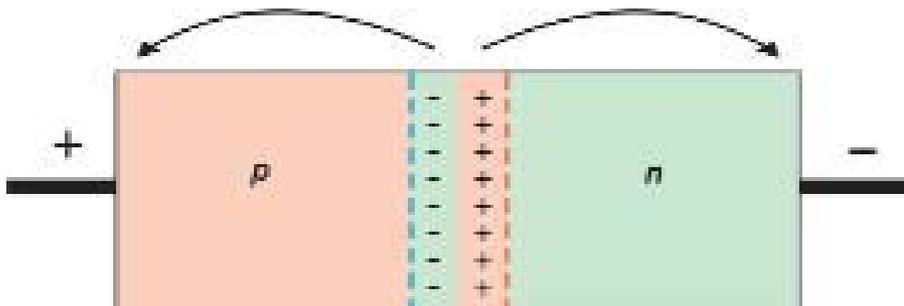
Electron-hole junction

- As a result of the diffusion, in n -area (on the border of the contact) the concentration of electrons is decreased, and positively charged layer appears. In p -area, vice versa, the hole concentration is decreased, and a negatively charged layer appears. Thus, on the border between the semiconductors, a double electric layer is created. And this barrier layer (or blocking layer) blocks the process of diffusion of electrons and holes in the opposite direction.
- Such layer is called barrier layer (*запирающий слой, запірний шар*).



Электроннодырочный переход

- *p-n*-переход обладает одной удивительной особенностью: *односторонней проводимостью (unidirectional conduction)*, то есть способностью пропускать электрический ток только в одну сторону.
- Два возможных варианта подачи напряжения на *p-n*-переход:
 - 1) положительный полюс источника соединен с *p*-областью, а отрицательный – с *n*-областью.

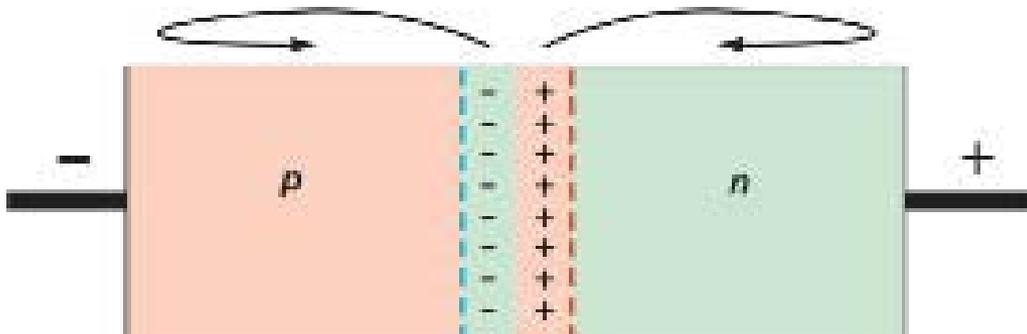


Прямое включения *p-n*-перехода

В силу притягивания разноименных зарядов (opposite charges) напряженность поля в запирающем слое будет уменьшаться. Естественно, это облегчает переход основных носителей через контактный слой. Дырки из *p*-области и электроны из *n*-области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать *p-n*-переход, создавая ток в прямом направлении. **If $U \uparrow \Rightarrow i \uparrow$.**

Electron-hole junction

2) положительный полюс источника соединен с n -областью, а отрицательный – с p -областью.



Обратное включения p - n -перехода

Ток через p - n -переход практически не идет.

Такое включение приведет к возрастанию напряженности поля в запирающем слое. Дырки в p -области и электроны в n -области не будут двигаться навстречу друг другу, что приведет к увеличению концентрации неосновных носителей в запирающем слое.

Напряжение, поданное на p - n -переход при таком включении, называют *обратным*. *Весьма незначительный обратный* ток обусловлен только собственной проводимостью полупроводниковых материалов, т. е. наличием небольшой концентрации свободных электронов в p -области и дырок в n -области.