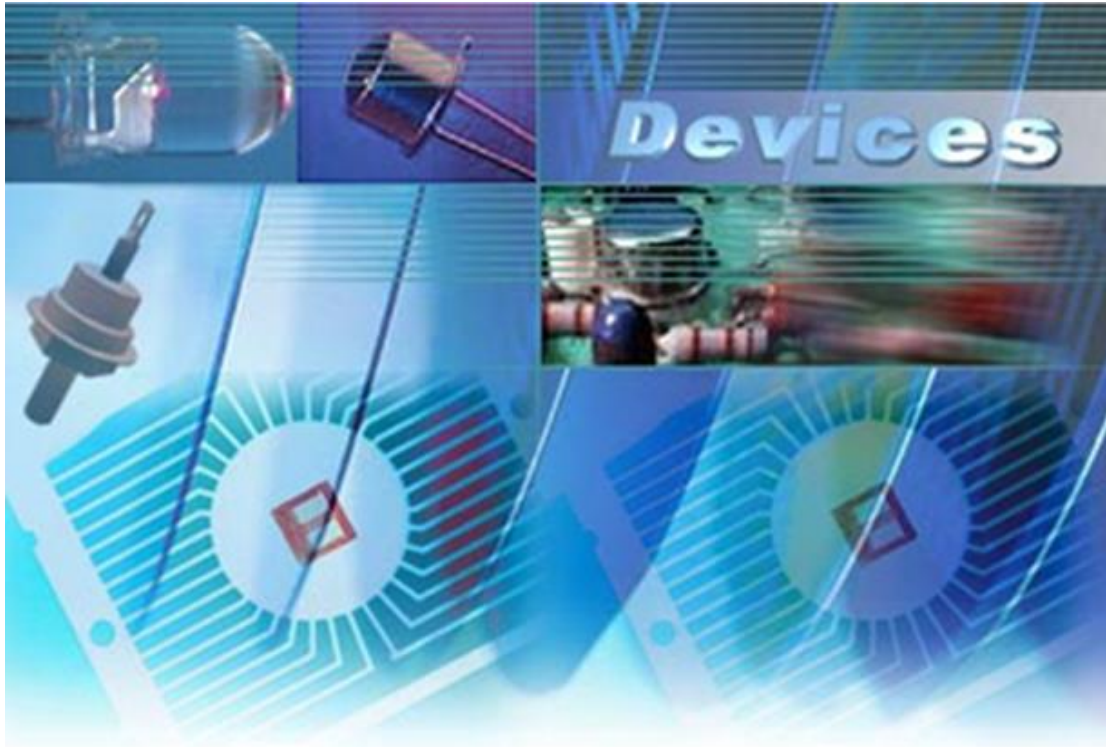




Полупроводници



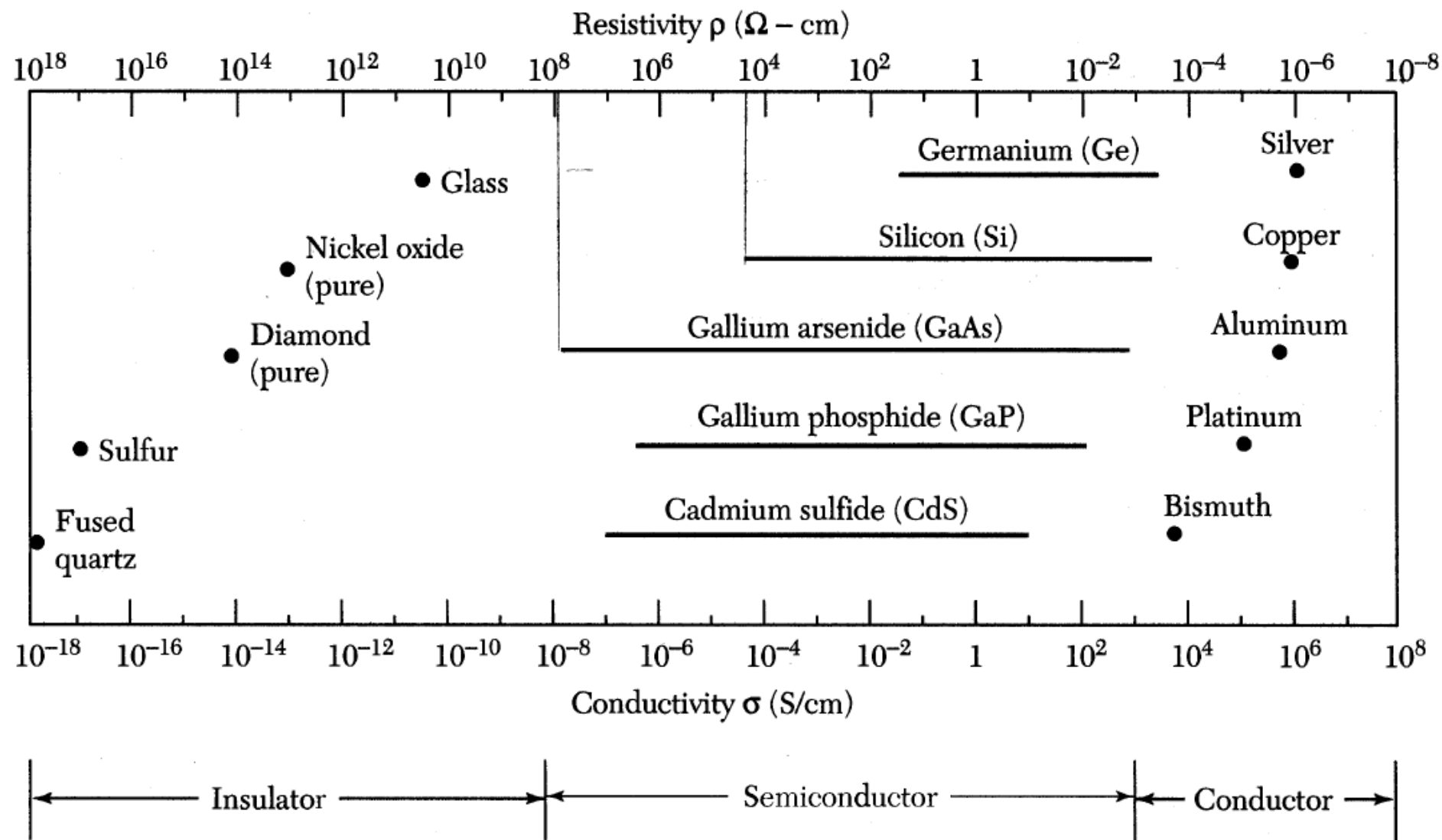
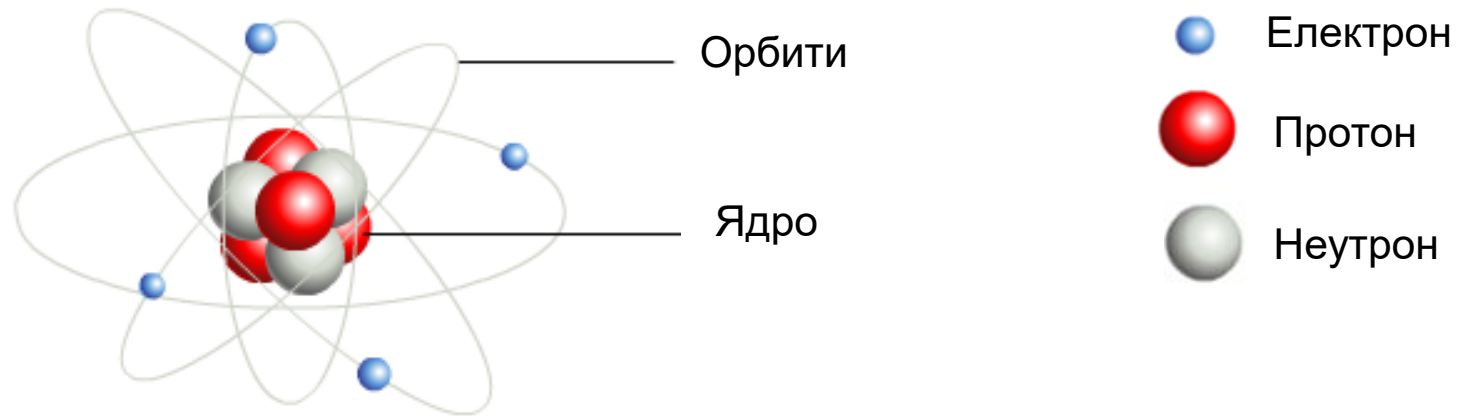


Fig. 1 Typical range of conductivities for insulators, semiconductors, and conductors.

Структура на атома



Причина за специфичните свойства на полупроводниците е уникалната структура на атома им. Атомът на всеки материал се състои от ядро и електрони, които обикалят в орбити около него. Ядрото е съставено от положително заредени частици (протони) и неутрални частици (неутрони).

Електроните имат отрицателен заряд. Техният брой е равен на броя на протоните в ядрото, така че атомът като цяло е **електронеутрален**.

Структура на Si атом

Структура
на Si атом

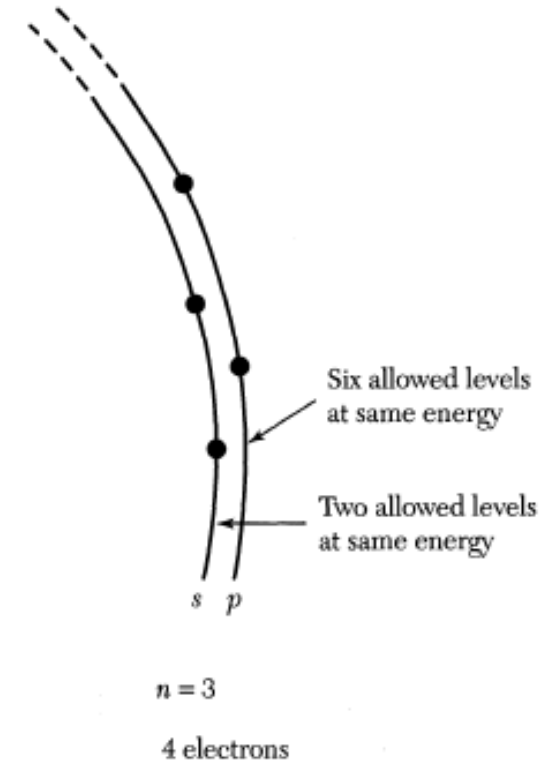
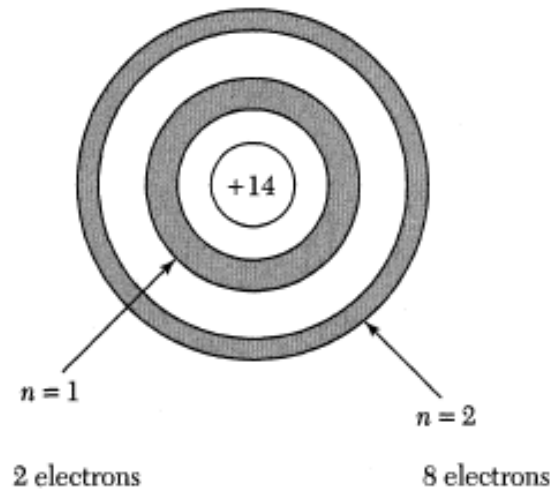
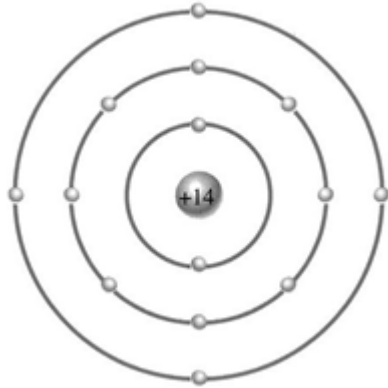
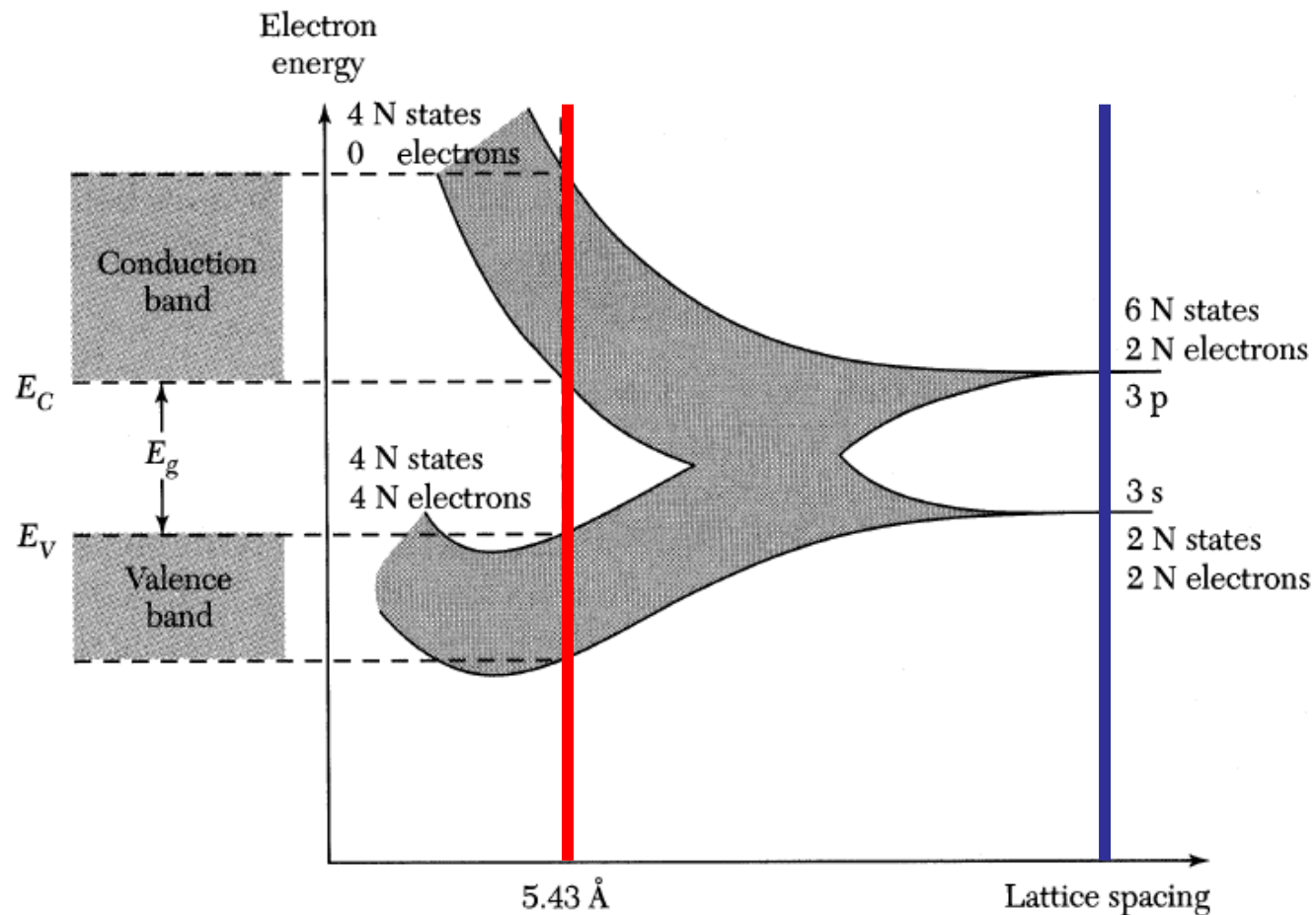


Fig. 14 Schematic representation of an isolated silicon atom.

Електроните от най-външната орбита са относително слабо свързани с атома. Те се наричат **валентни електрони** и определят химическите и електрическите свойства на елементите.

Атомите на силиция (Si) имат по четири валентни електрона.



$$E_g = E_C - E_V$$

Bandgap energy

Ширина на забранената зона

Fig. 15 Formation of energy bands as a diamond lattice crystal is formed by bringing isolated silicon atoms together.

E_g е енергията необходима за да се разкъса връзка в полупроводника. При това освободеният електрон преминава в зоната на проводимост (conduction band), а във валентната зона остава дупка.

Ширина на забранената зона (E_g) е определяща за електрическите свойства на елементите и съединенията.

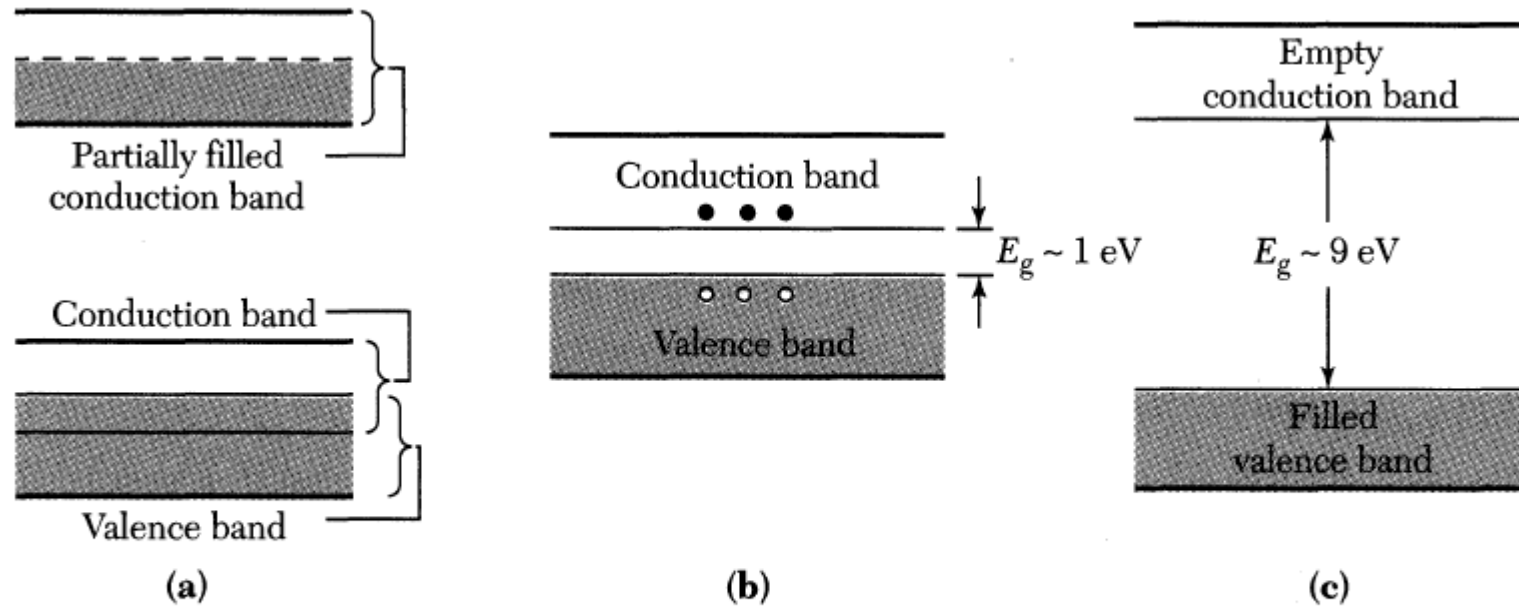
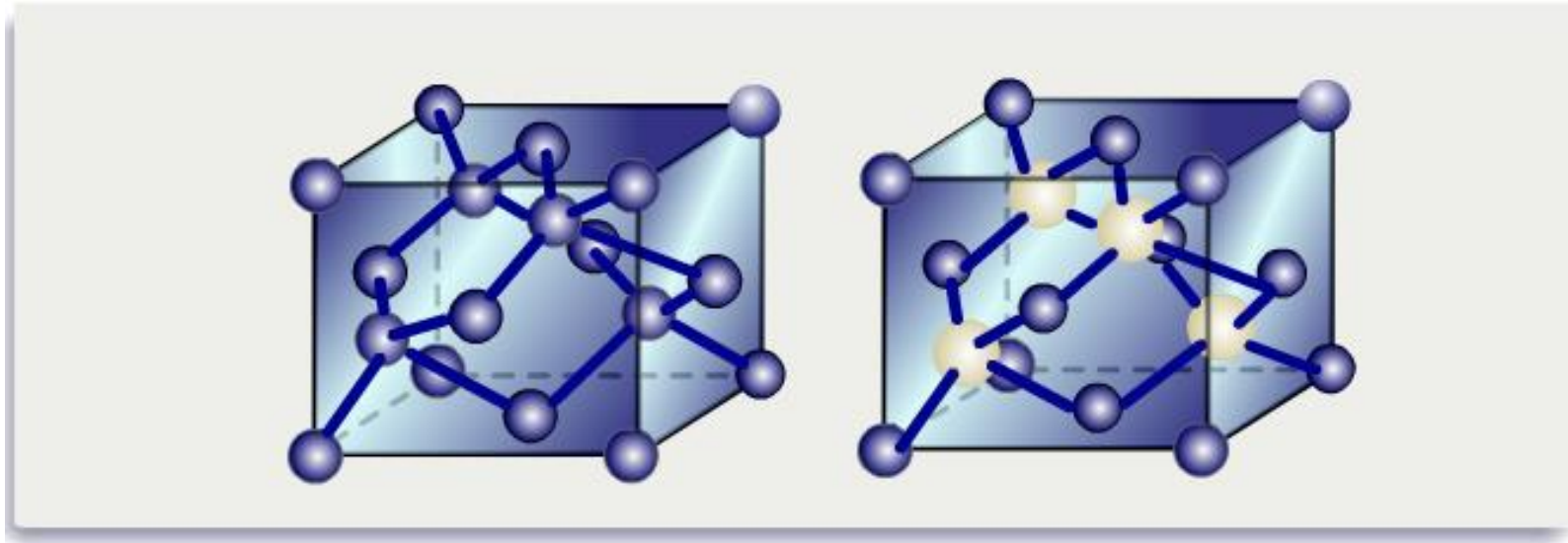


Fig. 19 Schematic energy band representations of (a) a conductor with two possibilities (either the partially filled conduction band shown at the upper portion or the overlapping bands shown at the lower portion), (b) a semiconductor, and (c) an insulator.

Properties	Si	4H-SiC	GaAs	GaN
Crystal Structure	Diamond	Hexagonal	Zincblende	Hexagonal
Energy Gap (eV)	1.12	3.26	1.43	3.5

Видове полупроводници



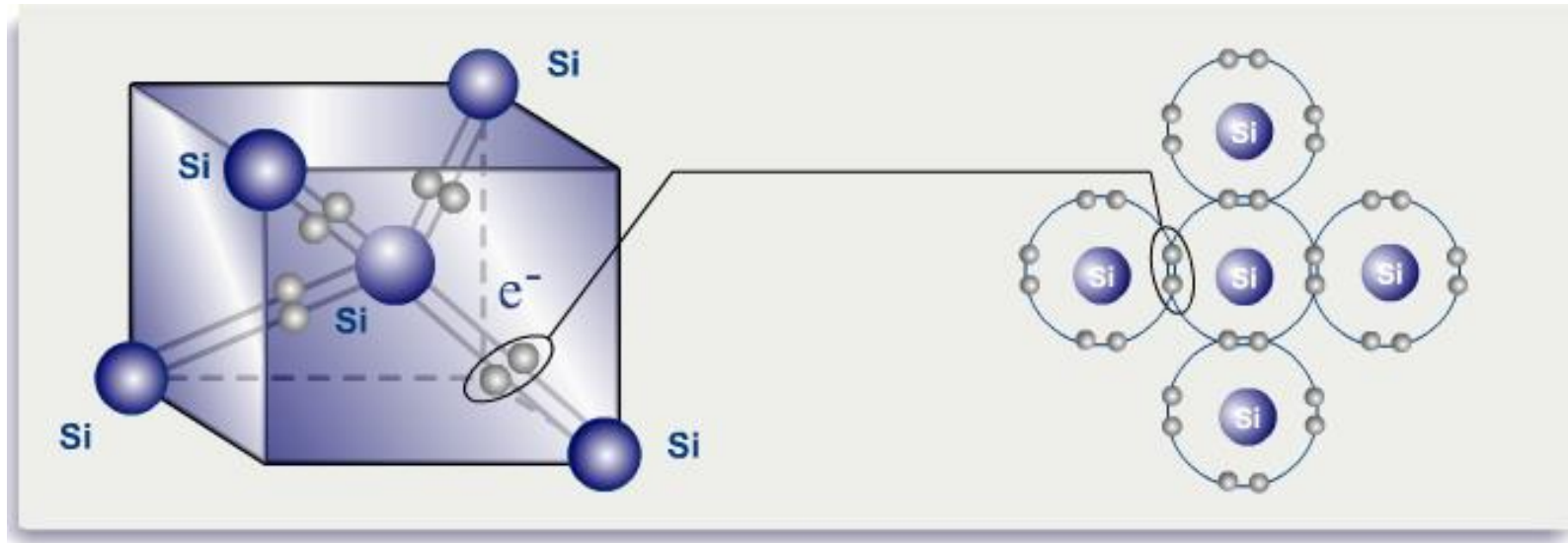
Съществуват два вида на полупроводници:

Собствен полупроводник (intrinsic semiconductor) – в кристалната решетка няма примесни атоми.

Примесен полупроводник (extrinsic semiconductor) – в кристала са въведени примесни атоми.

Концентрацията на въведените примесни атоми влияе значително върху електрическото поведение на полупроводниците.

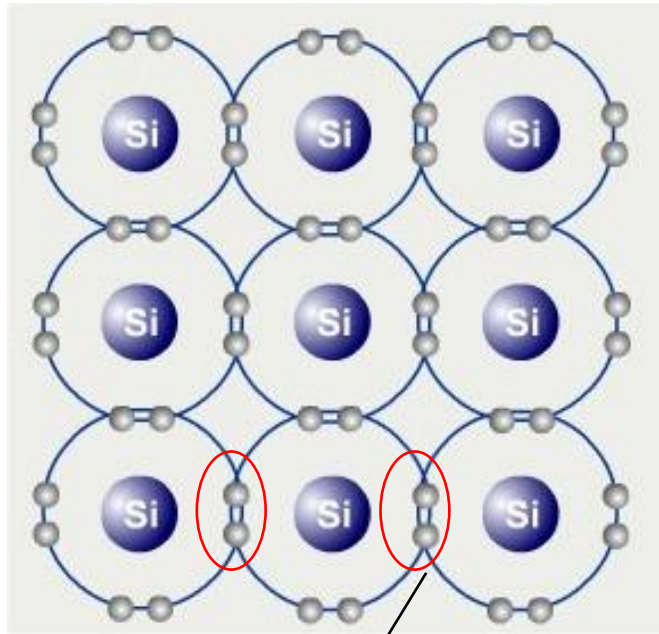
Собствен полупроводник - Si



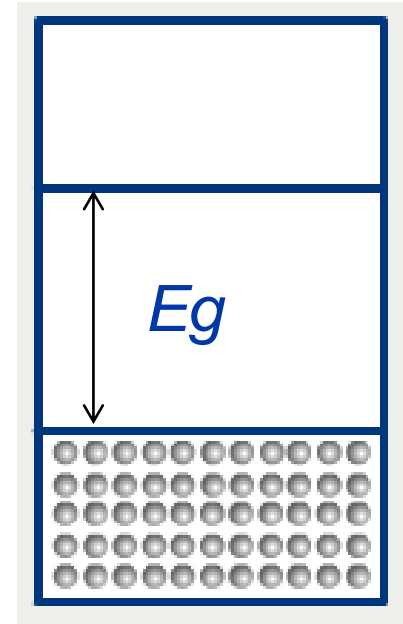
Чист полупроводник без внесени примеси се нарича **собствен полупроводник**.

Всеки един от четирите валентни електрона на Si атом формира **ковалентна връзка** с валентен електрон от съседни Si атоми. Така валентният електрон става общ за два съседни атома. Ковалентните връзки задържат атомите заедно в кристала.

Собствен полупроводник - Si



Ковалентни връзки

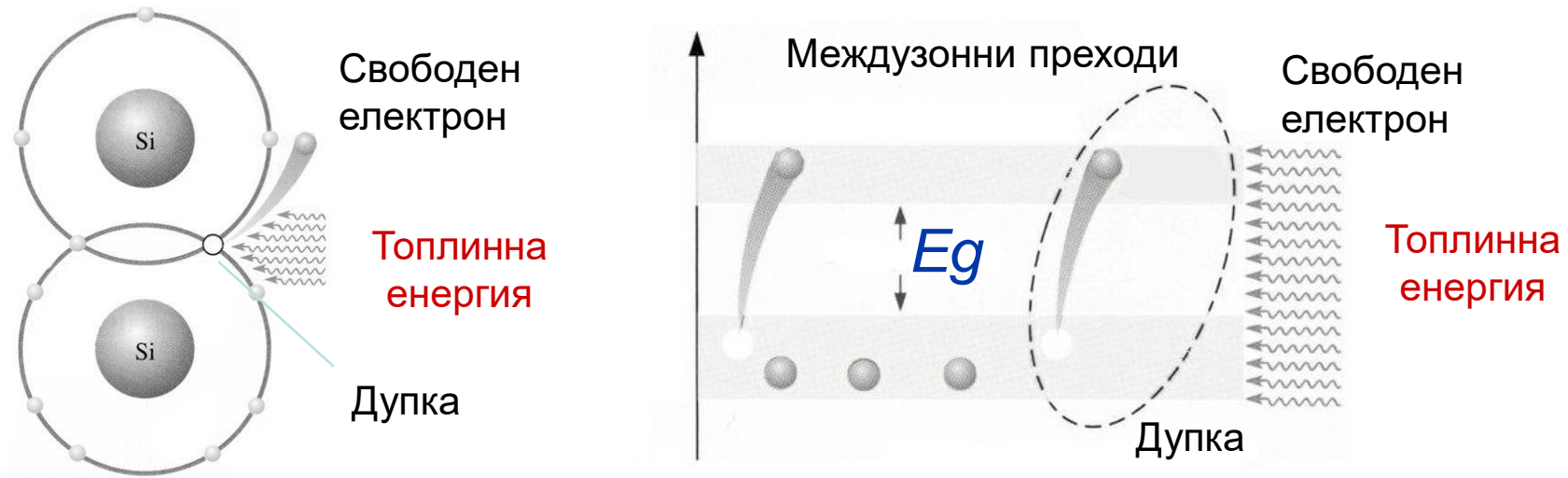


Зона на проводимост

Валентна зона

При $T=0\text{K}$ (абсолютна нула) в собствен полупроводник всички ковалентни връзки са запълнени и няма свободни носители за заряд. Това съответства на напълно запълнена валентна зона и празна зона на проводимост. При тези условия няма подвижни носители на заряд и полупроводникът е **изолатор**.

Собствен полупроводник - токоносители



За да се формират свободни носители на заряд е необходима енергия, която се набавя от околната температура. При достатъчна енергия се **разкъсват ковалентни връзки**. Електронът се откъсва от атома и става **свободен**, оставяйки празно място – **дупка** с еквивалентен положителен заряд.

Процесът е еквивалентен на **междузонни преходи** на валентни електрони. Когато електрон премине от валентната зона в зоната на проводимост (също така се нарича „свободна зона“), във валентната зона остава празно място – дупка.

Собствен полупроводник – генерация и рекомбинация

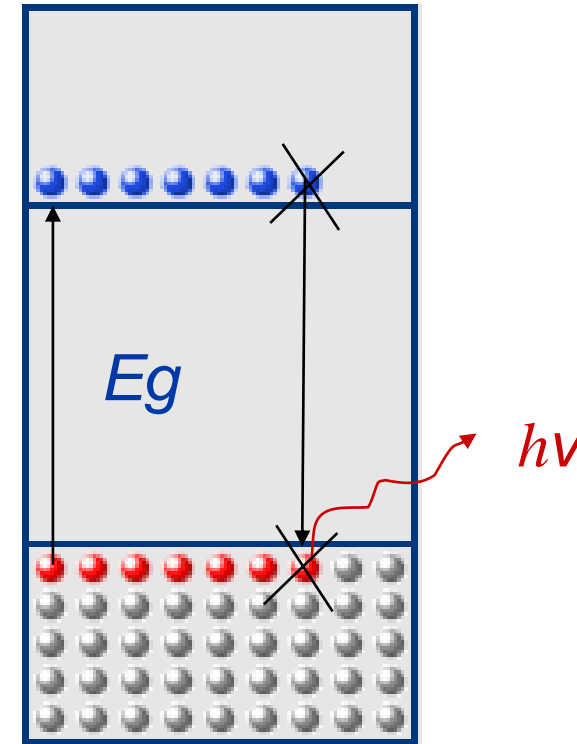
Процесът на формиране на **двойка** свободни носители на заряд – електрон и дупка, под действие на допълнителна енергия, се нарича **генерация**.

Концентрациите на генерираните двойки токоносители са **равни**.

$$n = p$$

n – концентрация на електроните

p – концентрация на дупките



Процесът, при който електрон от свободната зона губи енергия и се връща обратно във валентната зона, се нарича **рекомбинация**. При това „изчезват“ свободните носители електрон и дупка и се отделя енергия.

Собствен полупроводник – термодинамично равновесие

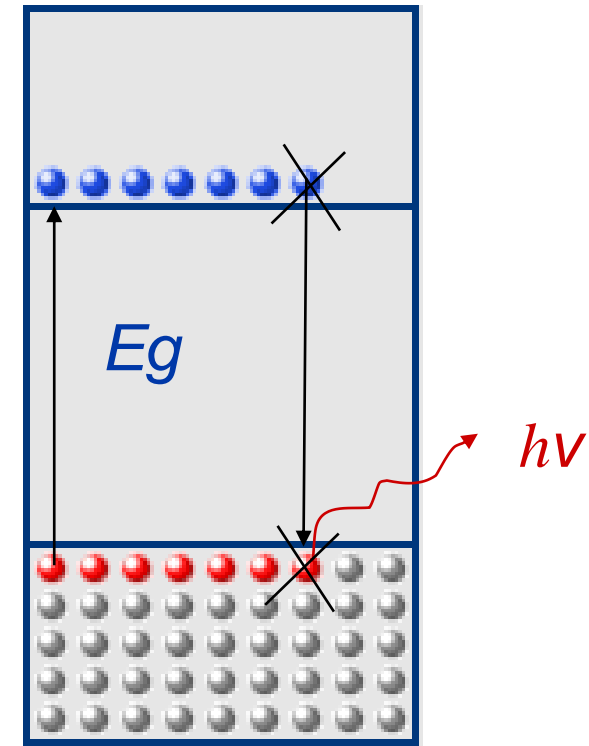
При $T = \text{const}$, настъпва **термодинамично равновесие** между процесите на генерация и рекомбинация.

$$n \cdot p = n_i^2$$

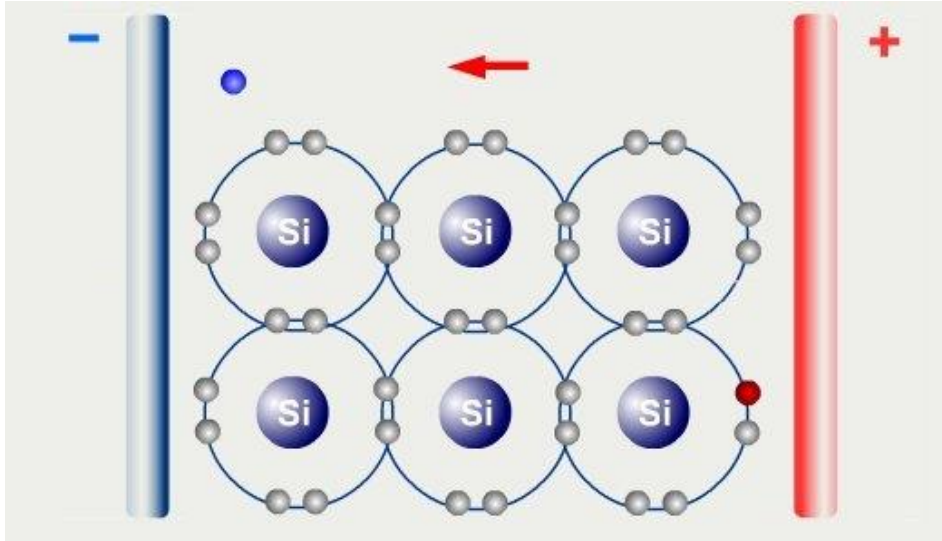
n – концентрация на електроните
 p – концентрация на дупките

В чистия полупроводник, за дадена температура, се установява постоянна концентрация, наречена **собствена концентрация** n_i .

Собствената концентрация на токоносителите зависи само от **температурата** и от широчината на забранената зона.



ток в собствен полупроводник



Дрейфово движение

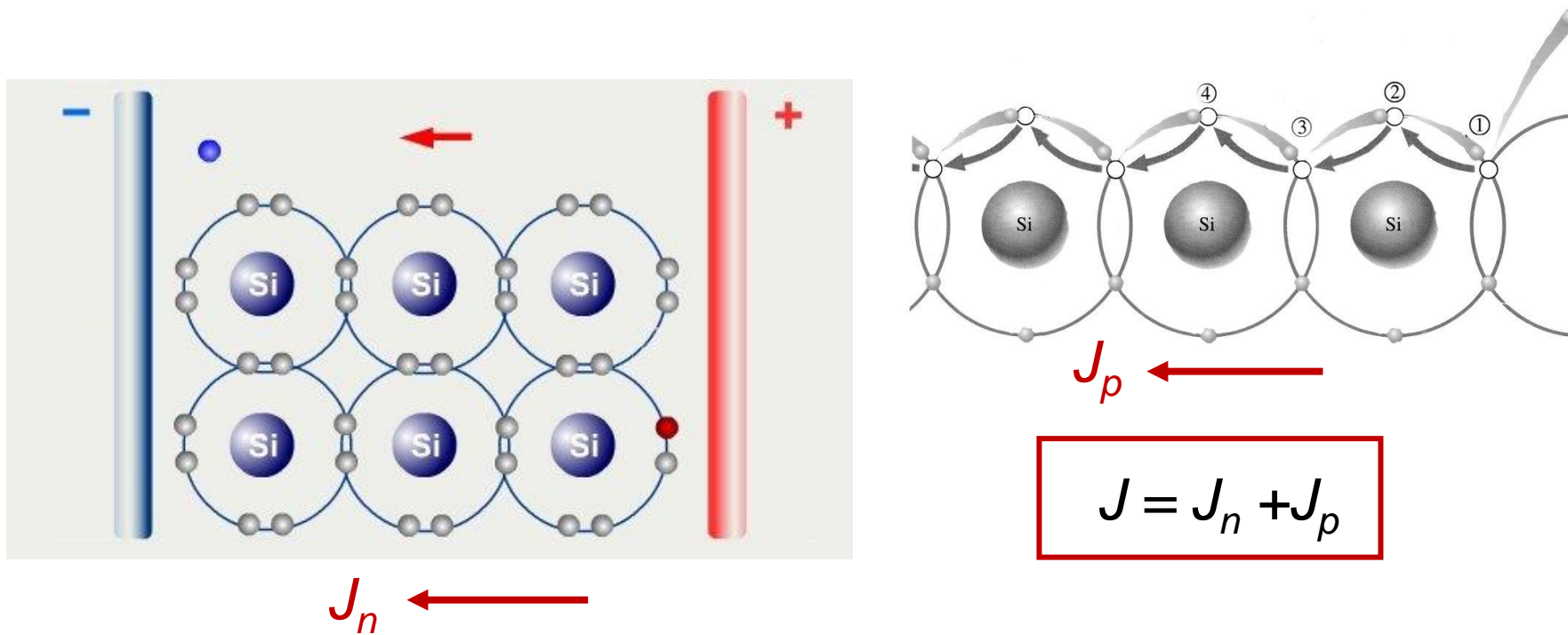
$$v_E = \mu E$$

$$\mu_n > \mu_p$$

Електроните и дупките са **подвижни частици**. Те могат да се преместват между възлите на кристалната решетка под въздействие на електрическо поле, т.е. да участват в протичането на ток. Затова се наричат **токоносители**.

Движението на токоносителите под действие на електрическо поле се нарича **дрейфово**, а средната скорост, с която се преместват – дрейфова скорост v_E . Параметърът μ , свързващ дрейфовата скорост с интензитета на електрическото поле, се нарича **подвижността на токоносителите**.

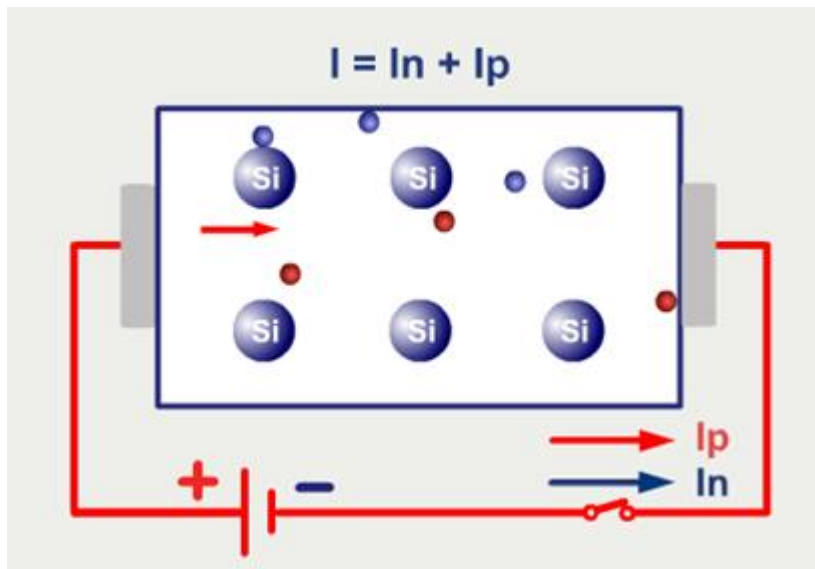
собствен полупроводник – компоненти на тока



Насоченото движение на електроните под действие на електрическото поле създава **електронната съставка на тока** J_n в полупроводника.

Електроните от валентната зона са свързани с ядрото на атома и не могат да се движат свободно в кристала. Обаче, те могат да заемат мястото на съседна дупка, оставяйки дупка там, откъдето са тръгнали. По този начин дупките се придвижват в кристала, създавайки **дупчестата компонента на тока** J_p .

собствен полупроводник – посока на тока

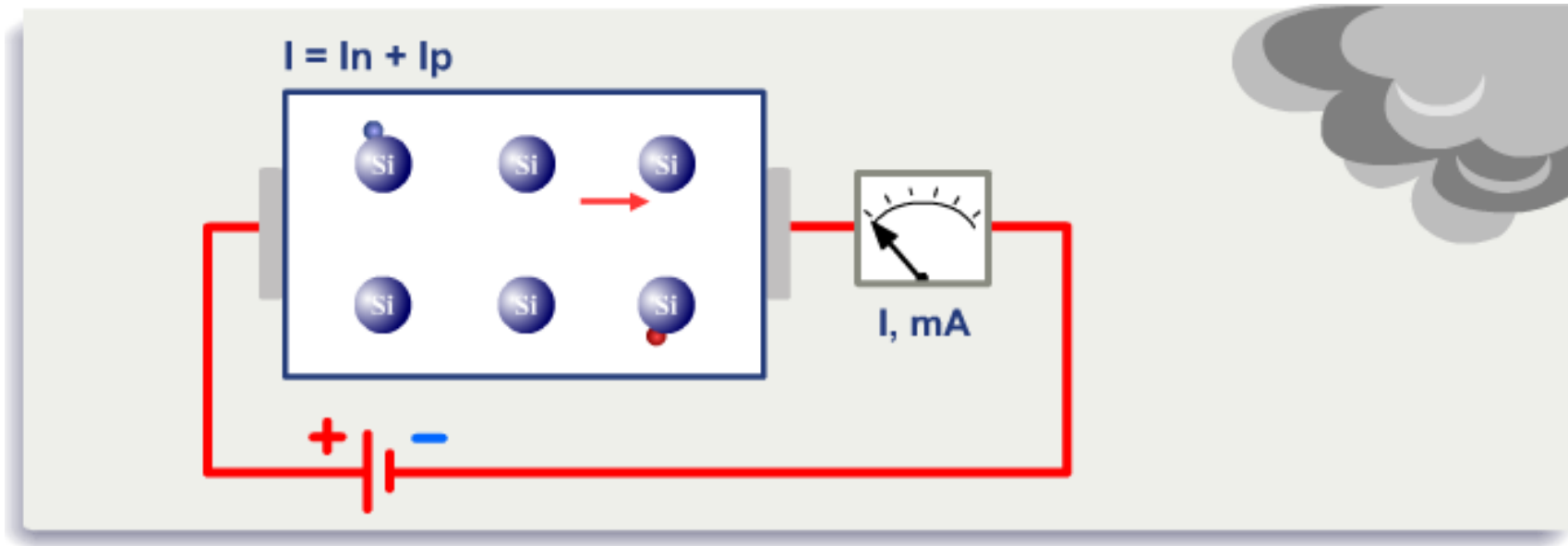


$$J = J_n + J_p$$

Техническата посока на тока е приета да съвпада с посоката на движение на положителните заряди. Посоката на дупчестия ток J_p съвпада с движението на положителните токоносители и с приетата техническа посока на тока.

Посоката на електронният ток е противоположна на физическото движение на електроните в кристала.

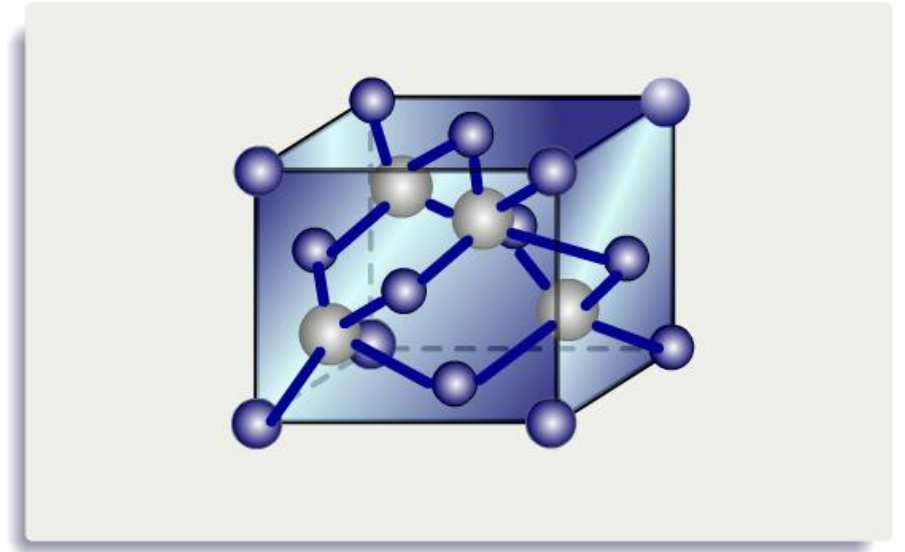
собствен полупроводник – температурна зависимост



В собствен полупроводник при стайна температура има незначителен брой свободни токоносители. Техният брой, и респективно големината на тока, **силно зависят от температурата**. Поради тези причини чистите полупроводници не се използват за направа на полупроводникови елементи.

примесни полупроводници

Полупроводник, електрическите характеристики на който се определят от наличието на примеси, се нарича **примесен**.



Примеси от **5-та валентност** - арсен (As), фосфор (P), антимон (Sb) се наричат **донори**, защото отдават един от валентните си електрони си към полупроводниковия кристал.

Примеси от **трета валентност** - бор (B), алуминий (Al), галий (Ga) се наричат **акцептори**, защото приемат един електрон от съседен атом и така оставят дупка (празно място) в полупроводниковия кристал.

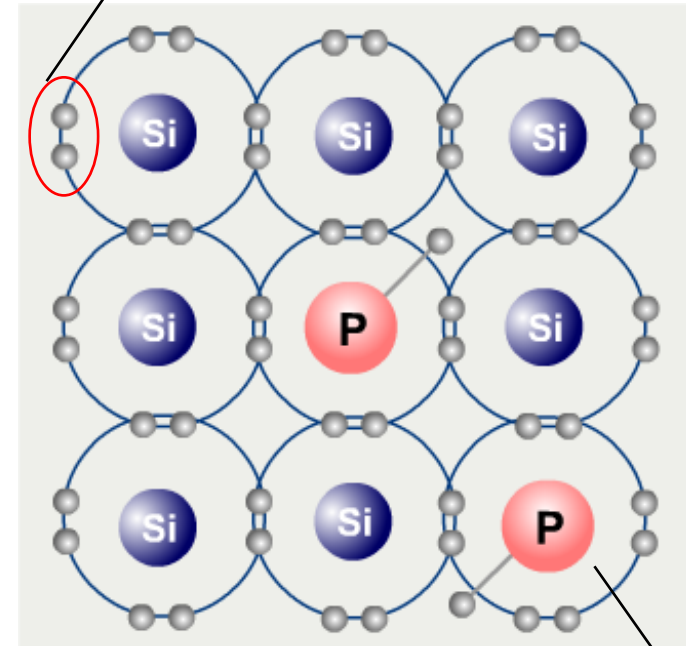
n-тип полупроводник — формиране на токоносители

Четири от валентните електрони на донорния атом (P) образуват ковалентни връзки със съседни силициеви атоми.

Петият електрон остава слабо свързан с ядрото и при незначително количество енергия може лесно се отдели от атома и става **свободен електрон**.

Електроните са доминиращ тип токоносители и се наричат **основни токоносители**, а полупроводникът — **N** тип полупроводник.

Ковалентна връзка



Донорни атоми – V валентност

Неутрален фосфорен атом

n-тип полупроводник — формиране на токоносители

Когато неутрален фосфорен атом отдаде електрон, той става положително зареден йон. Той е свързани в кристалната решетка и не участва при формиране на тока.

Йонизацията на донорите довежда до образуване само на **един тип подвижни токоносители – свободни електрони**.

$$n \gg p$$

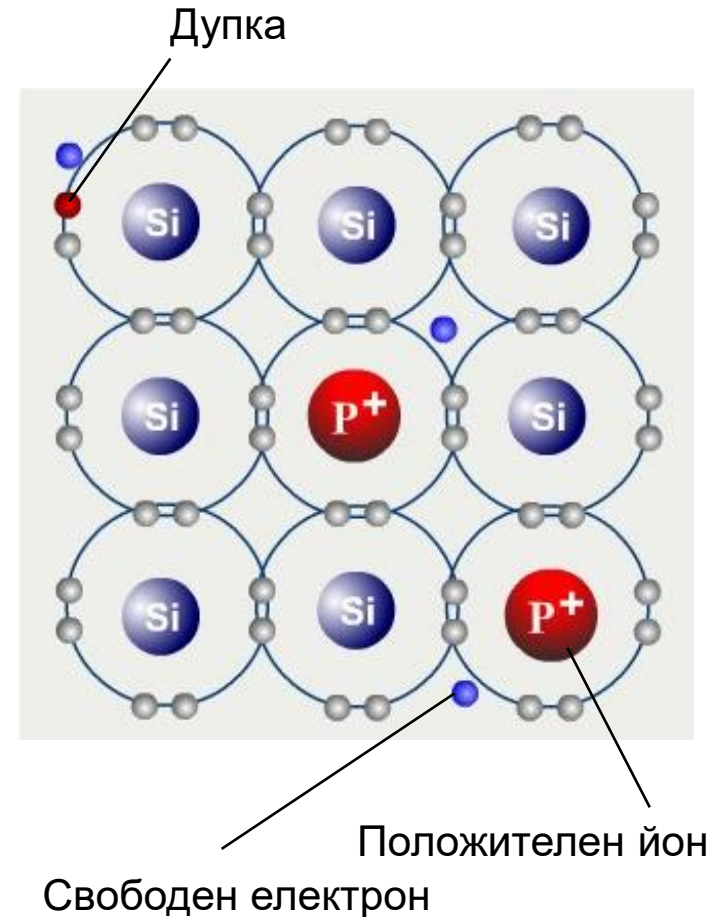
n – концентрация на електроните

p – концентрация на дупките

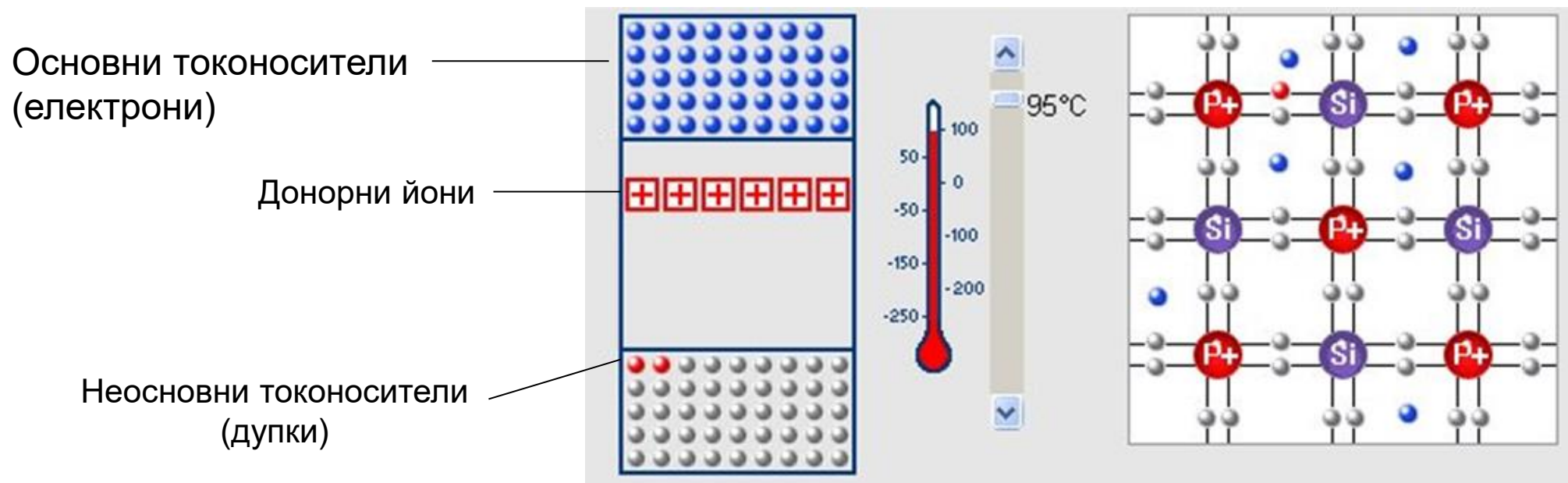
n-тип полупроводник

Електрони - основни носители (majority carriers)

Дупки – неосновни носители (minority carriers)



n-тип полупроводник — основни и неосновни токоносители



Основни токоносители се формират при йонизация на примесите. Тяхната концентрация е строго определена, защото количеството на въведените в кристала примеси може точно да се контролира при производството.

$$n = N_D$$

n – концентрация на електроните

N_D – концентрация на донорните йони

Неосновни токоносители се формират при разкъсване на ковалентни връзки.

n-тип полупроводник — концентрация на токоносители

$T = \text{const}$ Термодинамично равновесие

$$n \cdot p = n_i^2$$

Закон за действие на масите

Собствена
концентрация

$$n = N_D$$

$$n = \text{const}(T)$$

Концентрацията на **основните токоносители не зависи от температурата** в нормалния температурен диапазон на експлоатация на ПП елементи.

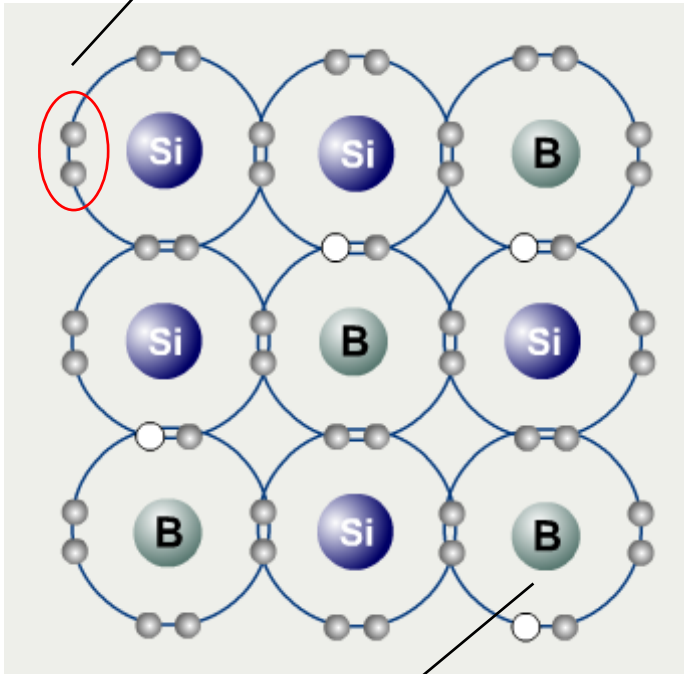
$$p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$p = f(T)$$

Концентрацията на **неосновните токоносители много силно зависи от температурата**.

p-тип полупроводник — основни и неосновни токоносители

Ковалентна връзка



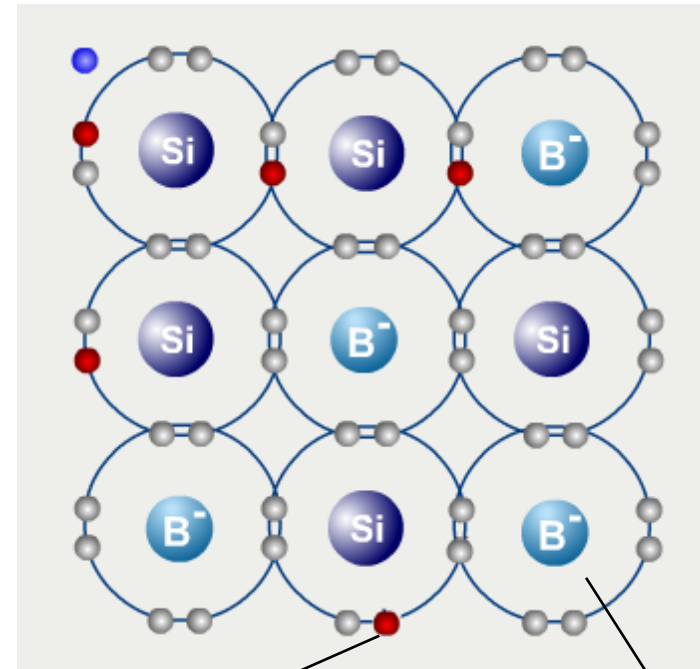
Неутрален атом на бор (B)

Акцепторен атом – 3 валентни електрона

Основни
токоносители

$$p \gg n$$

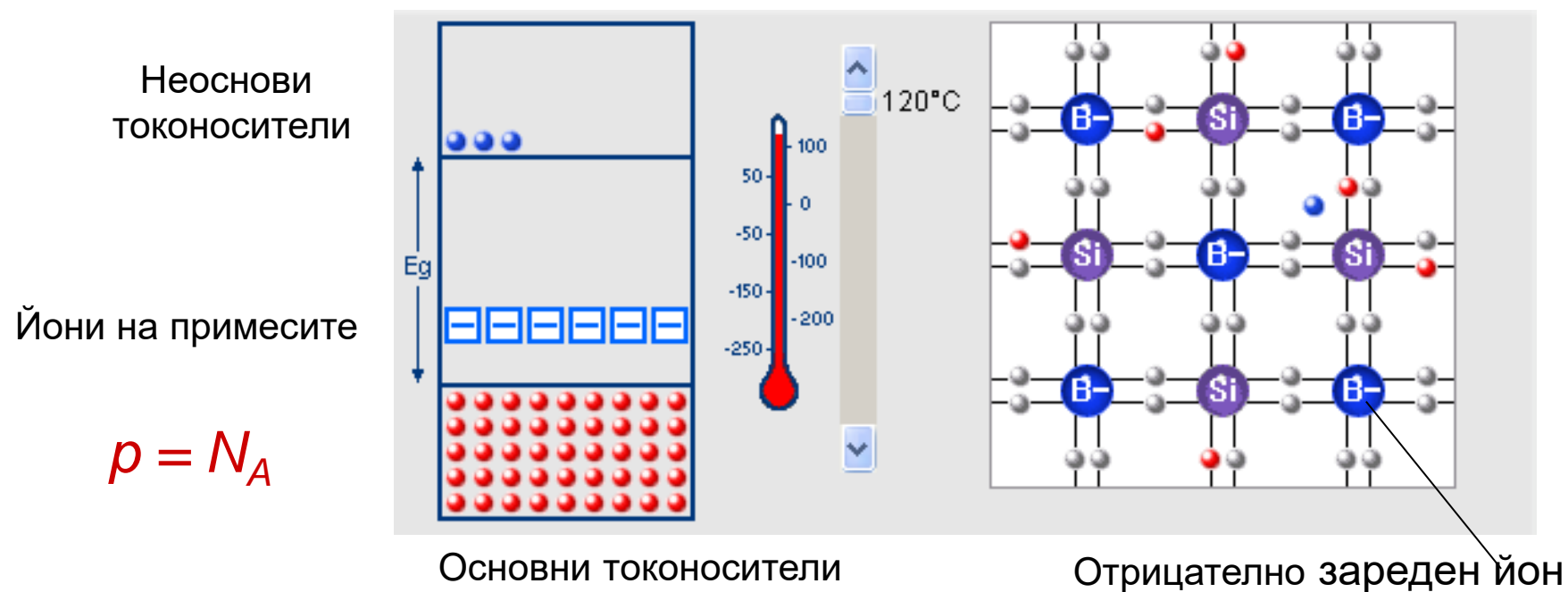
Неосновни
токоносители



Дупка

Отрицателно зареден йон

p-тип полупроводник — основни и неосновни токоносители

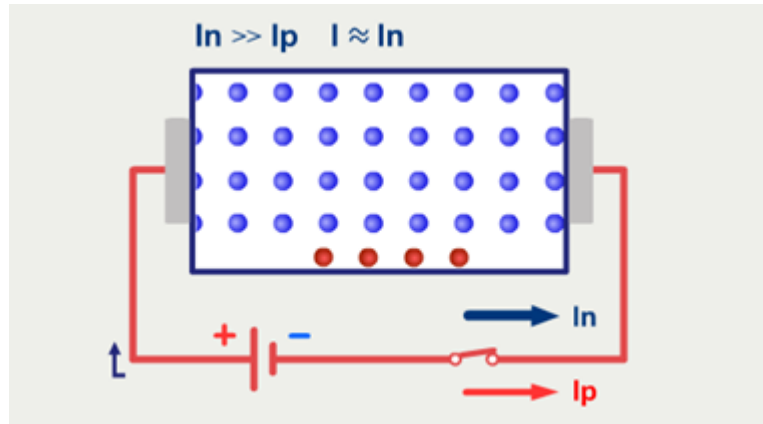


Основните токоносители се формират при **йонизация на акцепторните** атоми. При това се създава **дупка**, без да се образува електрон.

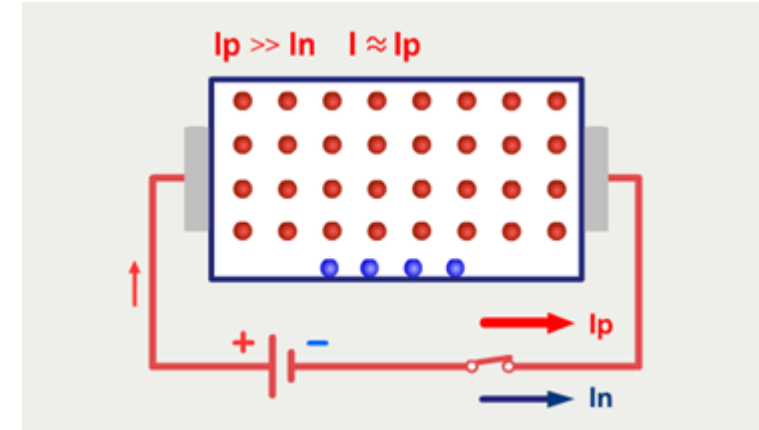
Неосновни токоносители се формират при разкъсване на ковалентни връзки.

ТОКОВЕ В ПРИМЕСНИ ПОЛУПРОВОДНИЦИ

В полупроводника има два типа токоносители – електрони и дупки. Затова общият ток в полупроводника има електронна и дупчеста съставки.



В *n*-тип полупроводници, електроните са основни токоносители и електронната съставка на тока значително превишава дупчестата.



В *p*-тип полупроводници, дупките са основни токоносители и дупчестата съставка на тока значително превишава електронната.

токове в примесни полупроводници – дрейфов ток

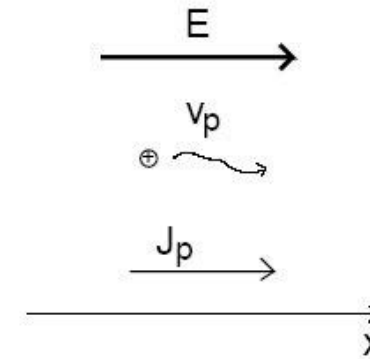
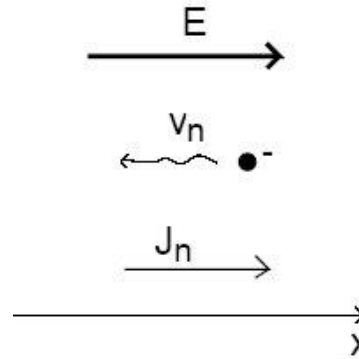
Електропроводимостта се обуславя от движението на свободни токоносители под действие на електрическо поле. Плътността на тока J се определя от заряда, пренесен от токоносителите за единица време през единица сечение.

$$J_{nE} = -qn v_{En} = qn\mu_n E$$

$$J_{pE} = qp v_{Ep} = qp\mu_p E$$

$$J = (q\mu_n n + q\mu_p p)E = \sigma E = \frac{E}{\rho}$$

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q\mu_n n + q\mu_p p$$



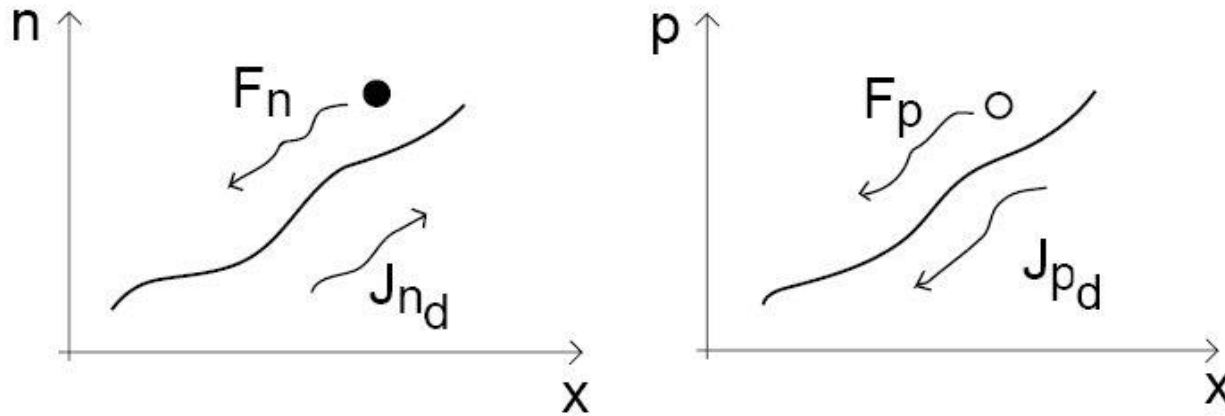
Специфична електропроводимост

J_{nE} Дрейфов ток в n-полупроводник

J_{pE} Дрейфов ток в p-полупроводник

токове в примесни полупроводници – дифузен ток

Токоносителите се придвижват в кристала под действие на възникнал в обема градиент (dn/dx) на концентрацията. Потокът на токоносителите F при дифузионното им движение се определя от броя на токоносителите, които преминават за единица време през единица сечение [$\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$].



$$F_n = -D_n \frac{dn}{dx} \quad J_{nD} = qD_n \frac{dn}{dx} \quad F_p = -D_p \frac{dp}{dx} \quad J_{pD} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

D_n, D_p – коефициенти на дифузия

J_{nD} Дифузен ток в n-полупроводник

J_{pD} Дифузен ток в p-полупроводник

Уравнение на Айнщайн

Връзката между коефициент на дифузия и подвижност е изразена чрез уравнението на Айнщайн.

$$D = \varphi_T \mu$$

D коефициент на дифузия

μ подвижност

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} \approx \frac{T}{11600}$$

Температурен потенциал

k – константа на Болцман, T – темпетатура (K), q - заряд на електрона

За „стайна температура“ (300 K) $\varphi_T = 0.0258 \text{ V} \approx 25 \text{ mV}$

Общ ток в полупроводника

Токоносителите могат да се движат чрез дрейф и дифузия и да формират съответно дрейфова и дифузионни съставки на тока.

$$J_n = J_{nE} + J_{nD} = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_{pE} + J_{pD} = q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx}$$

Общият ток е сума от тези съставки

$$J = J_n + J_p = J_{nE} + J_{nD} + J_{pE} + J_{pD}$$

J_{nD} Дифузен ток в n-полупроводник

J_{pD} Дифузен ток в p-полупроводник

J_{nE} Дрейфов ток в n-полупроводник

J_{pE} Дрейфов ток в p-полупроводник

Неравновесни концентрации

При локално действие на друг вид енергия – облъчване, рентгенови и гама-лъчи, силно електрическо поле и др. поради генерацията на нови **добавъчни** токоносители, се създават **неравновесни концентрации** на електрони n_n и на дупки p_n , които превишават равновесните за дадена температура.

