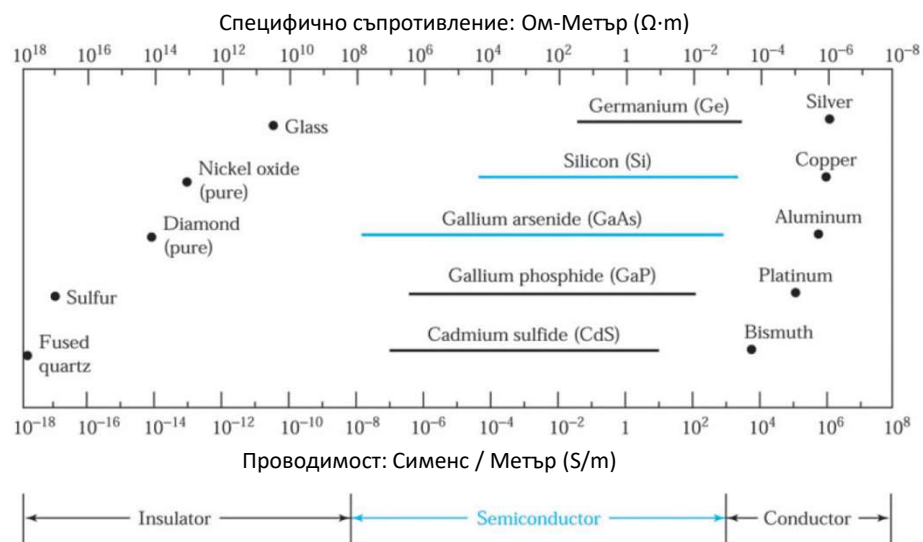




## Полупроводници

1

### Изолатори, проводници и полупроводници



2

## Проводимост на полупроводниците

Проводимостта на полупроводниците силно зависи от:

- Температура
- Осветеност
- Магнитно поле
- Примесни атоми (в много-ниски концентрации: 1 $\mu$ g – 1mg примеси на 1kg чист полупроводник)

Тази чувствителност на проводимостта прави ПП едни от най-важните материали е електрониката.

3

## Структура на Si атом

Структура на  
Si атом

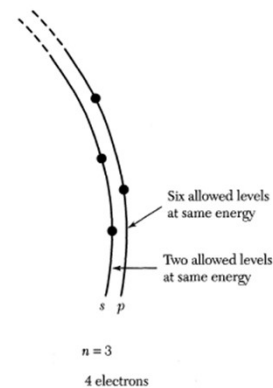
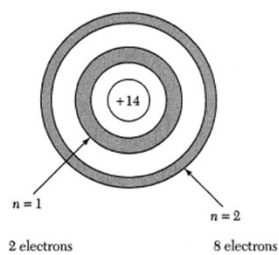
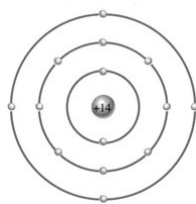


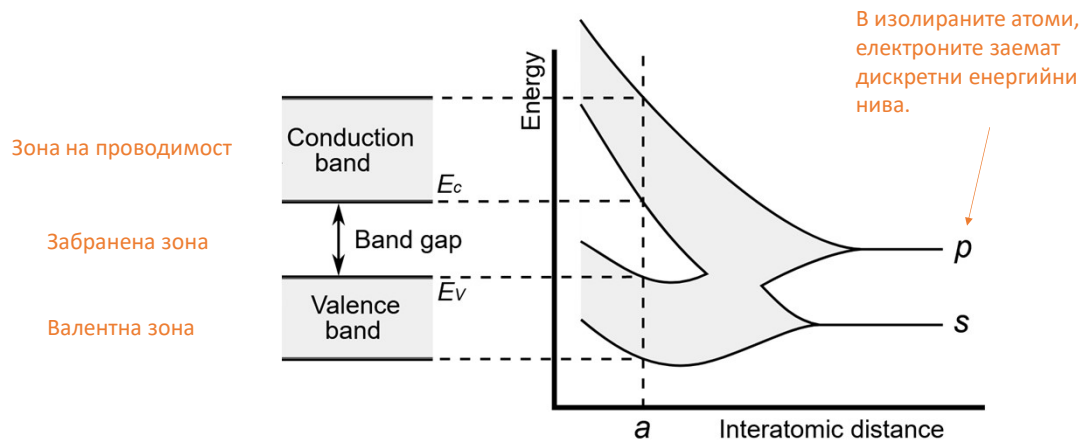
Fig. 14 Schematic representation of an isolated silicon atom.

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.

4

## Зонна структура на твърдите тела

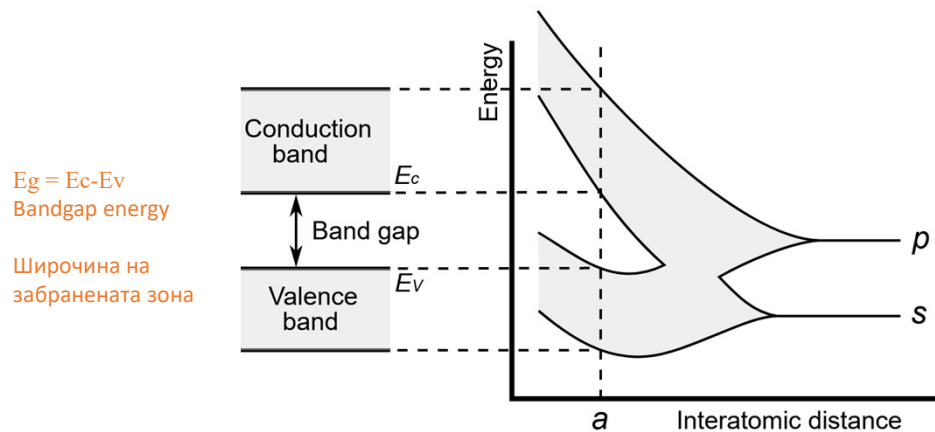


При доближаване на атомите (например в кристална решетка), всяко дискретно енергийно ниво се разделя на няколко нива. При достатъчно много атоми, нивата се преобразуват в енергийно зони.

Най-външните енергийно зони са наречени „зона на проводимост“ и „валентна зона“. Те са разделени с т.нар. „забранена зона“.

5

## Широчина на забранената зона



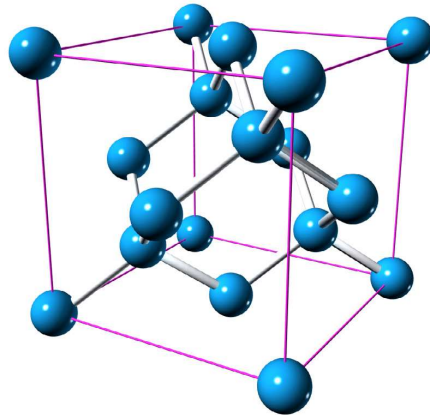
$E_g$  е енергията необходима за да се разкъса връзка в полупроводника. При това освободеният електрон преминава в зоната на проводимост, а във валентната зона остава дупка.

Широчината на забранената зона ( $E_g$ ) е определяща за електрическите свойства на елементите.

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

6

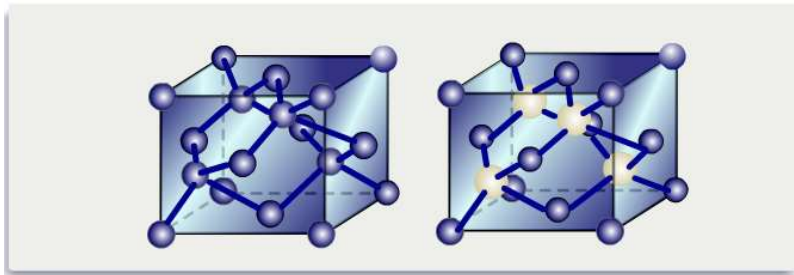
### Кристална структура на Si



Всеки Si атом е свързан с четири други атома – диамантена кубична кристална структура.

7

### Видове полупроводници



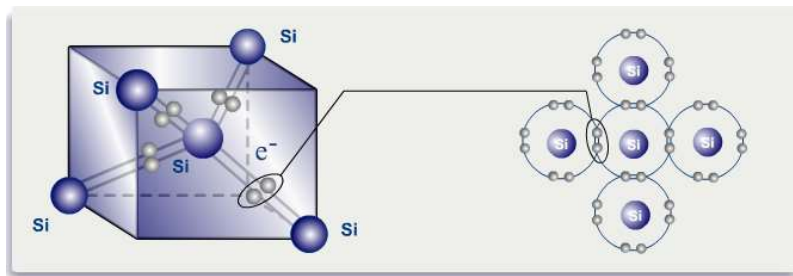
**Собствен** полупроводник (intrinsic semiconductor) – в кристалната решетка няма примесни атоми.

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

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

8

## Собствен полупроводник - Si

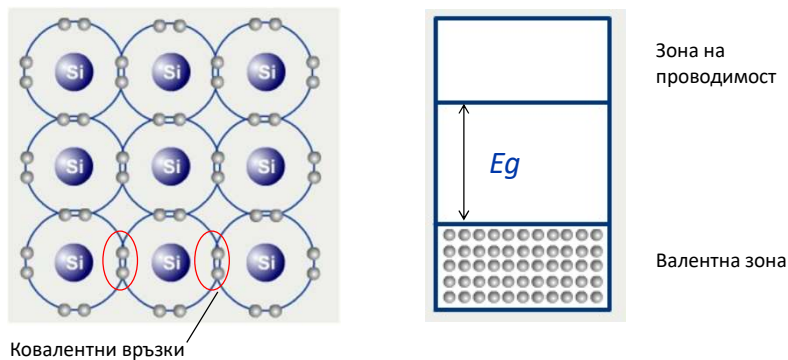


Чист полупроводник без внесени примеси се нарича **собствен полупроводник**.

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.

9

## Собствен полупроводник - Si



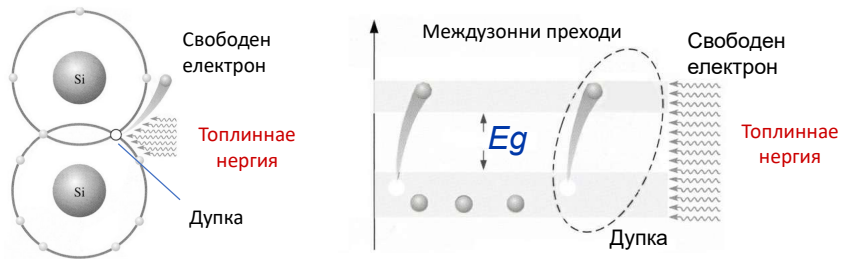
При  $T=0\text{K}$  (абсолютна нула) в собствен полупроводник всички ковалентни връзки са запълнени и няма свободни носители на заряд.

Това съответства на напълно запълнена валентна зона и празна зона на проводимост.

При тези условия няма подвижни носители на заряд и полупроводникът е **изолатор**.

10

### Собствен полупроводник - токоносители



За да се формират свободни носители на заряд е необходима енергия.

Тя може да дойде от трептенията на атомите на кристала (фонони), от облъчване с радиация или от механични деформации.

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 **междוזонни 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.

11

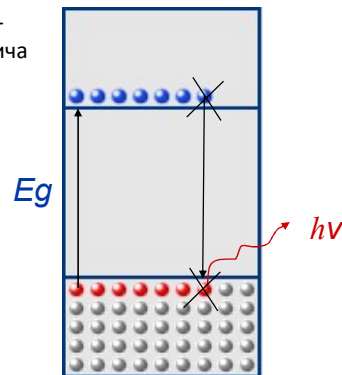
### Собствен полупроводник – генерация и рекомбинация

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.

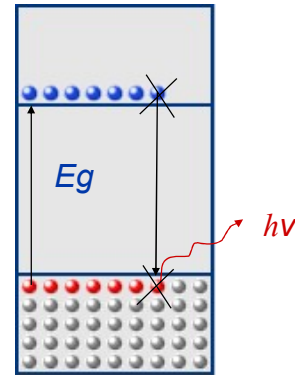
12

### 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  
 $n_i$  – собствена концентрация

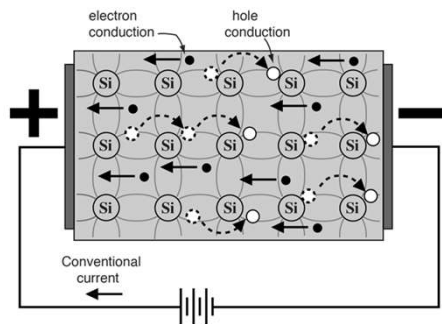


В чистия полупроводник, за дадена температура, се установява постоянна концентрация, наречена **собствена концентрация**  $n_i$ .

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

13

### Движение на токоносителите



Дрейфово движение

$$v_E = \mu E \quad \mu_n > \mu_p$$

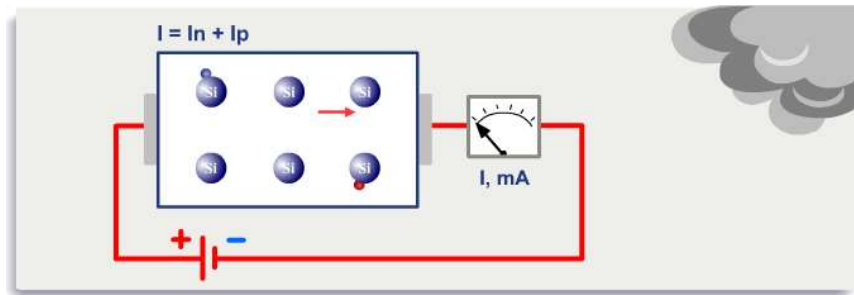
$$J = J_n + J_p$$

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  $\mu$ , свързващ дрейфовата скорост с интензитета на електрическото поле, се нарича **подвижността на токоносителите**.

14

### Собствен полупроводник – температурна зависимост



В собствен полупроводник при стайна температура има незначителен брой свободни токоносители.

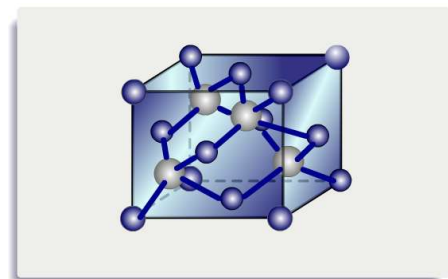
Техният брой, и респективно големината на тока, **силно зависят от температурата**.

Поради тези причини чистите полупроводници не се използват за направа на полупроводникови елементи.

15

### Примесни полупроводници

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



Примеси от **пета 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.

16



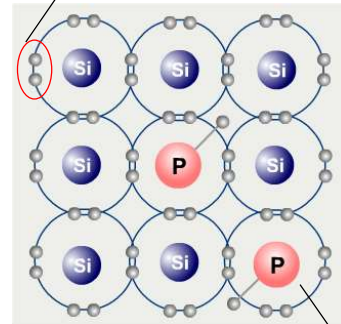
### n-тип полупроводник — формиране на токоносители

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

17

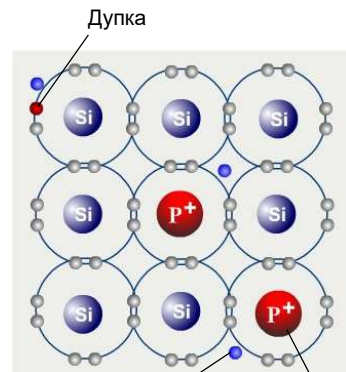
### n-тип полупроводник — формиране на токоносители

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



Положителен йон  
Свободен електрон

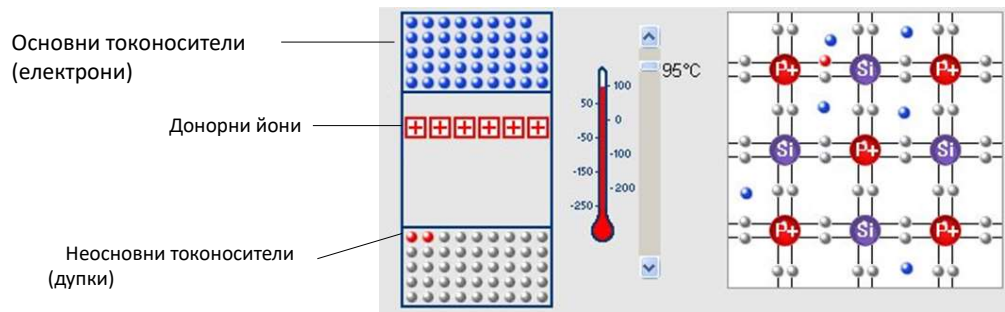
n-тип полупроводник

Електрони - основни носители (majority carriers)

Дупки – неосновни носители (minority carriers)

18

### 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.

19

### n-тип полупроводник — концентрация на токоносители

#### Закон за действие на масите

Термодинамично равновесие

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

$n$  – концентрация на електроните  
 $p$  – концентрация на дупките  
 $n_i$  – 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.

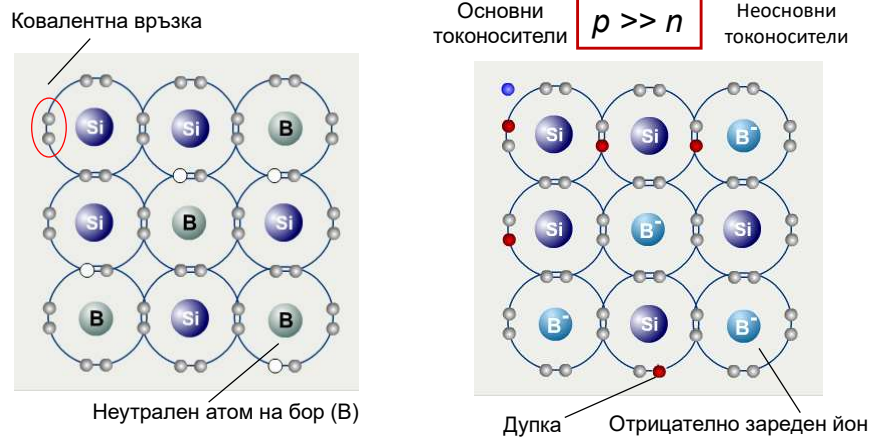
$$p = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$p = f(T)$$

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

20

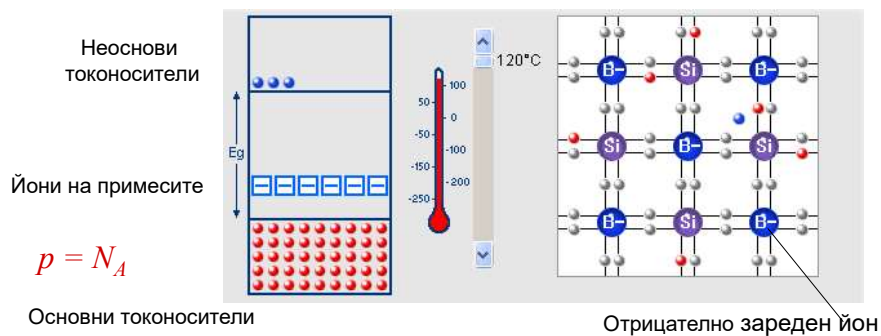
р-тип полупроводник — основни и неосновни токоносители



**Акцепторен атом** – 3 валентни електрона

21

р-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.

**Несновни** токоносители се формират при разкъсване на ковалентни връзки.

22

## 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.

Плътност на дрейфовият ток в р-полупроводник

Закон на Ом

$$J_{pE} = q p \mu_p E \text{ (A/cm}^2\text{)}$$

$q$  – заряд на електрона =  $1.6 \times 10^{-19}$  C (Кулони)

$p$  – брой на дупките в един кубичен сантиметър

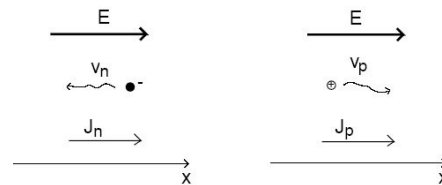
$n$  – брой на свободните електрони в един кубичен сантиметър

$\mu_p$  – подвижност на дупките ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )

$\mu_n$  – подвижност на електроните ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )

Плътност на дрейфовият ток в n-полупроводник

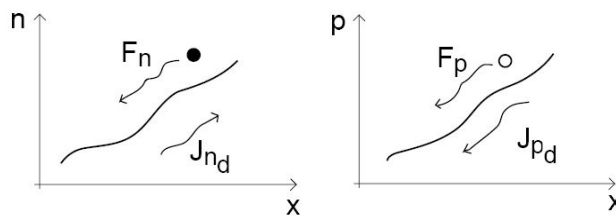
$$J_{nE} = -q n \mu_n E \text{ (A/cm}^2\text{)}$$



23

## Токове в примесни полупроводници – дифузен ток

Дифузен ток – движение на токоносителите поради разлика в концентрацията на токоносителите.



Плътност на дифузия ток в р-полупроводник

Плътност на дифузия ток в n-полупроводник

$$J_{pD} = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_{nD} = q D_n \frac{dn}{dx}$$

Закон на Фик

$D_n, D_p$  – коефициенти на дифузия

24

	Дрейфов ток	Дифузен ток
Причинява се от	Електрическо поле	Разлика в концентрацията на токоносителите
Посока на тока	Посока на електрическото поле	Градиента на концентрация на токоносителите
Закони	Закон на Ом	Закон на Фик

25

### Уравнение на Айнщайн

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

$$D = \varphi_T \mu$$

$D$  коефициент на дифузия  
 $\mu$  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)  $\varphi_T = 0.0258 \text{ V} \approx 25 \text{ mV}$

26

### Общ ток в полупроводника

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

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

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

27

### 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.



28