

## **ВЪВЕДЕНИЕ.**

### **МЕТАЛИ, ДИЕЛЕКТРИЦИ, ПОЛУПРОВОДНИЦИ**

#### **1. Въведение**

Целта на този курс е да се представят основните понятия, свойства и явления, свързани с полупроводниковите и диелектричните материали, които представляват физическите основи на съвременната микро-, опто- и наноелектроника. С други думи физиката на полупроводниците и диелектриците е теоретичната основа на съвременната електроника, чието развитие може да се свърже със следната проста схема:

#### **МАТЕРИАЛИ → ДИСКРЕТНИ ЕЛЕМЕНТИ → ЕЛЕКТРОННИ ПРИБОРИ и УСТРОЙСТВА**

Материалите, които се използват в съвременната електроника за изготвяне на различни прибори и устройства са метали, полупроводници и диелектрици. Например, съвременните интегрални схеми се създават на базата на полупроводникови подложки, върху които се отлагат различни диелектрични и метални слоеве; хибридни интегрални схеми се получават като върху диелектрични подложки се разполагат полупроводникови елементи.

Специфичните електрофизични свойства на материалите се използват, за да се получат от тях различни дискретните елементи, като например диоди, транзистори, термоелементи, фотоелементи, светодиоди, лазери и др. Те се свързват в електронни схеми в интегрално изпълнение, наричани интегрални схеми, които се използват за изготвяне на електронни прибори и устройства с различно предназначение. Много електронни прибори се използват и като датчици или сензори: за измерване на температурата - термистори, за регистрация на светлинни излъчвания - фоторезистори, за регистрация на радиоактивни излъчвания - дозиметри, за измерване на налягане – тензодатчици, за измерване на големината на магнитно поле – ефект на Хол и др.

В основата на работата на всеки прибор лежат определени физически процеси и явления, протичащи в материалите. Следователно физиката на полупроводниците и диелектриците е теоретичната основа на съвременната електроника.

#### **2. Класификация на веществата**

Всички вещества в природата могат да бъдат разделени на метали, полупроводници и диелектрици на базата на техните електрофизични свойства.

Може да се направи такова разделение според свойството **електропроводимост** и основната им характеристика - **специфичното електрично съпротивление** на веществата.

- В металите електропроводимостта е най-добра и е само електронна. Специфичното им електрично съпротивление е много малко и като примерни граници могат да се посочат  $(10^{-6} - 10^{-4})\Omega.cm$ .
- В диелектриците проводимостта е изключително слаба и тя може да бъде електронна и йонна. Специфичното им електрично съпротивление е много високо и като примерни граници могат да се посочат  $(10^9 - 10^{16})\Omega.cm$ .
- В полупроводниците проводимостта заема промеждутъчни стойности между тези за проводници и диелектрици. Свободните токови носители са електрони и дупки. Като примерни граници за специфичното им електрично съпротивление могат да се посочат  $(10^{-4} - 10^9)\Omega.cm$ .

Трябва да се има в предвид, че това свойство електропроводимост, зависи от структурата на веществото и от външните условия, при които се намира то. Така например въглеродът, в зависимост от това в каква форма кристализира, показва различни електропроводящи свойства:

като диамант е диелектрик,  
като графит е проводник,  
като карбин е полупроводник.

Металите са най-добрите проводници, но металният прах с размер на частиците от порядъка на микрон е много добър диелектрик.

Класификацията на материалите по електропроводимост показва, че полупроводниците заемат междинно място между металите и проводниците, но границите не са ясно очертани и в някои случаи силно се припокриват. Затова специфичното електрично съпротивление на веществата не може да служи за еднозначен критерий за класификация на веществата.

Установено е обаче, че температурните зависимости на електропроводимостта на металите и полупроводниците се различават.

**За металите**, специфичното съпротивление  $\rho$  нараства с температурата и е пропорционално на абсолютната температура  $T$ :

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) = \frac{\rho_0}{T_0} T,$$

където  $\rho_0$  - специфичното съпротивление на метала при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  - термичен коефициент на съпротивление, равен на  $1/273$ ,  $T_0 = 273$ .

Характерна особеност за специфичната проводимост  $\sigma$  на металите е наличието на отрицателен температурен коефициент на специфична електропроводимост, т.е.

$$\sigma_1(T_1) > \sigma_2(T_2), \text{ където } T_1 < T_2,$$

или специфичната проводимост на метала  $\sigma_1$  при по-ниска температура  $T_1$  е по-голяма от тази  $\sigma_2$  при по-висока температура  $T_2$ . Следователно, с понижаване на температурата специфичната проводимост на металите расте.

**За полупроводниците** температурните зависимости на специфичното съпротивление и специфичната проводимост са други:

$$\rho = \rho_0 e^{\beta/T}$$
$$\sigma = \sigma_0 e^{-\beta/T},$$

където  $\rho_0$ ,  $\sigma_0$ ,  $\beta$  са константи, характерни за дадения полупроводник.

Тези зависимости са характерни за така наречените неизродени полупроводници и те имат положителен температурен коефициент на специфичната електропроводимост, т.е.

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta T} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{T_2 - T_1} > 0.$$

Изглежда, че различаването на полупроводниците и металите може да става чрез знака на температурния коефициент на специфичната електропроводимост. Но трябва много да се внимава, т.к. в случаите на изродени полупроводници, техните свойства стават много подобни на тези на металите.

С понижаване на температурата специфичната проводимост на металите расте и това е възможно, защото независимо от температурата в металите винаги има свободни носители на заряд – електрони. При полупроводниците става обратното - специфичната електропроводимост намалява с понижаване на температурата и с приближаване до абсолютната нула полупроводниците по своите свойства се приближават до диелектриците. От тук следва, че в полупроводниците свободните носители на заряд възникват при подаване на топлинна енергия. Такива носители на заряд се наричат **топлинни или равновесни**.

Възникването на свободни носители на заряд в полупроводниците може да стане и при други въздействия като осветяване със светлина, облъчване с ядрени частици, прилагане на електрично поле, изменение на налягането и др. Тогава създадените носители на заряд се наричат **неравновесни**.

Процесът на възникване на равновесните и на неравновесните носители на заряд съществено зависи от строежа на веществото и от наличието на примеси в него.

*Полупроводниците са вещества, които при стайна температура имат специфична проводимост в границите ( $10^4 - 10^9$ ) S, силно зависеща от структурата на веществото, от вида и количеството примеси и от външните условия като температура, налягане, осветяване, облъчване с ядрени частици, електрично и магнитно поле.*

*Диелектриците са вещества, които при стайна температура имат специфична проводимост в границите ( $10^9 - 10^{16}$ ) S, силно зависеща от структурата на веществото.*

Общи електрофизични свойства на метали, полупроводници и диелектрици:

- **Проводимост** – под действие на приложено външно електрично поле, протича електричен ток – насочено движение на свободни носители на заряд. В трите вида материали свободните носители на заряд се различават по вид и концентрация. Различава се електронна и йонна проводимост. Металите имат електронна проводимост. Полупроводниците и диелектриците могат да имат и електронна и йонна проводимост, но в този курс ще разгледаме само електронната. Вследствие на различната концентрация на токовите носители във веществата, електропроводимостта е най-голяма при металите, най-малка при диелектриците и има междинни стойности за полупроводниците. Трябва да се отбележе, че изменение на концентрацията на токовите носители се наблюдава само при полупроводниците.
- **Дисипация** – разсейване на електрична енергия, вследствие на протичане на електричен ток. Специфичната дисипация  $P_d$  - мощността на енергията, разсеяна от единица обем, е пропорционална на квадрата на интензитета на електричното поле  $E$ :

$$P_d = d \cdot E^2,$$

където  $d$  е коефициент на дисипация, характеризиращ веществото.

### 3. Основни положения на класическата електронна теория на проводимост.

Нека веществото (метал или полупроводник) има кристална структура и е изградено от положителни йони, намиращи се във възлите на кристалната решетка и слабо свързани валентни електрони. Тогава основните положения в **класическата електронна теория (КЕТ)** за проводимост могат да се запишат така:

1) Във възлите на кристалната решетка има положителни йони. Валентните електрони, които са слабо свързани с йоните, образуват „електронен газ“ и се движат свободно между тях. Концентрацията им в металите е приблизително ( $10^{28} \div 10^{29}$ ) брой електрони/ $m^3$ , в полупроводниците - ( $10^{17} \div 10^{22}$ ) брой електрони/ $m^3$ , а в диелектриците – под  $10^{16}$  брой електрони/ $m^3$ . Между електронния газ и йоните на кристалната решетка съществува топлинно равновесие.

2) Свободните електрони не взаимодействат помежду си и с йоните на кристалната решетка, освен в момента на удара с последните. Средният свободен пробег  $\bar{\lambda}$  на свободните електрони (разстоянието, което изминават електроните между два последователни удара) е от порядък на  $10^{-10}$  m (константата на кристалната решетка  $d$  е от същия порядък:  $d \approx 10^{-10}$  m).

3) Свободните електрони извършват хаотични топлинни движения във всички посоки с различни скорости (т.е. те имат произволни стойности на енергията).

4) Електроните имат маса и заряд с определени стойности.

5) В сила е статистиката на Максвел-Болцман от молекулно-кинетичната теория на идеалните газове за разпределение по енергии на топлинното движение:

$$f(E) = A e^{-\frac{E}{kT}}, \text{ където } E \text{ е пълната енергия на електроните.}$$

Класическата теория на електронния газ, разглеждаща проводимостта на проводника като дължаща се на ударите на електроните с възлите на кристалната решетка на метала, може да се приложи и за проводимостта на полупроводниците поради следното съображение:

*Електроните на проводимост в полупроводниците могат да се разглеждат като идеални частици, нямащи собствен обем и невзаимодействащи помежду си.*

Свободните електрони могат да извършват във веществото два вида движение:

- топлинно движение – За сметка на топлинната енергия електроните се преместват по реалната кристална решетка като непрекъснато се сблъскват с различни дефекти – топлинни трептения на атомите на решетката, примеси, точкови дефекти, дислокации и др. В резултат на тези удари, електроните непрекъснато изменят траекторията на движението си и топлинното движение на свободните електрони става хаотично с определена скорост.
- дрейфово движение – При прилагане на електрично поле, електроните се ускоряват и получават скорост по направление на полето. Наблюдава се насочено движение на електроните с определена скорост наречена дрейфова.

От КЕТ могат да се определят двете скорости - скоростта на топлинното движение ( $\bar{v}_{\text{тв.}}$ ) и дрейфовата скорост ( $\bar{v}_{\text{др.}}$ ) на електроните.

Кинетичната енергия на движещия се електрон е:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT,$$

където  $\frac{3}{2}kT$  е средната вътрешна енергия при топлинно постъпателно движение. От тук може да се определи средната квадратична скорост:

$$\bar{v}_{кв.} = \sqrt{v^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

Като се знаят стойностите  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/kg;  $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$  kg,  $T = 300$  K, може да се изчисли големината на скоростта на топлинното движение на електроните при стайна температура:

$$\boxed{\bar{v}_{кв.} \approx 10^5 \text{ m/s}}. \quad (1)$$

Топлинното движение на електроните е хаотично и не може да предизвика възникване на електричен ток. Ако се приложи външно електрично поле върху метален проводник или полупроводник, то към хаотичното топлинно движение на електроните се наслагва насоченото им движение в полето, т. е. възниква електричен ток.

При наличие на електрично поле, големината на средната скорост на насоченото движение на електроните (така наречената дрейфова скорост -  $\bar{v}_{др.}$ ) може да се определи от формулата за плътността на тока:

$$j = ne\bar{v}_{др.}$$

$$\bar{v}_{др.} = \frac{j}{ne}.$$

При плътност на тока за меден проводник  $j = 10^7$  A/m<sup>2</sup> и концентрацията на токовите носители  $10^{29}$  m<sup>-3</sup>, за големината на дрейфовата скорост на метали се получава:

$$\boxed{\bar{v}_{др.} \approx 10^{-3} \text{ m/s}}. \quad (2)$$

При плътност на тока за Si полупроводник:  $j = 10^{-2}$  A/m<sup>2</sup> и концентрацията на токовите носители  $10^{19}$  m<sup>-3</sup>, за големината на дрейфовата скорост се получава:

$$\boxed{\bar{v}_{др.} \approx 10^{-2} \text{ m/s}}. \quad (3)$$

При плътност на тока за LiIO<sub>3</sub> диелектрик:  $j = 10^{-9}$  A/m<sup>2</sup> и концентрацията на токовите носители  $10^{12}$  m<sup>-3</sup>, за големината на дрейфовата скорост се получава:

$$\boxed{\bar{v}_{др.} \approx 10^{-2} \text{ m/s}}. \quad (4)$$

Сравнението на големините на двете скорости показва:

$$\bar{v}_{др.} \ll \bar{v}_{кв.}.$$

Следователно, средната скорост на насоченото движение на електроните, обуславяща електричния ток, е значително по-малка от скоростта на тяхното топлинно движение.

Трябва да се отбележи, че електричният ток се разпространява по електричната верига с много по-голяма скорост - скоростта на светлината във вакуум ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s), и това е скоростта, с която се разпространява електромагнитното поле в проводника.

Според теорията на Друде, електронът се движи ускорително за времето между два последователни удара с йоните на кристалната решетка, като при всеки удар той отдава цялата си енергия на решетката и скоростта му става нула.

В електрично поле на електрона действа сила:

$$\vec{f} = e\vec{E} \text{ или } m\vec{a} = e\vec{E},$$

и той получава ускорение с големина:

$$a = \frac{e}{m} E.$$

В края на ускорителното движение скоростта е максимална:

$$v_{\max} = at = \frac{e}{m} Et,$$

където  $t$  е средното време между два последователни удара на електрона с йоните на кристалната решетка.

При отчитане на условието:  $\bar{v}_{op.} \ll \bar{v}_{кв.}$ , времето  $t$  може да се изрази така:

$$t = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}} = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}_{кв.}},$$

където  $\bar{\lambda}$  е средният свободен пробег между два последователни удара.

С този израз за времето се замества във формулата за максимална скорост и се получава:

$$v_{\max} = \frac{e}{m} E \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}_{кв.}}.$$

Според теорията на Друде в края на свободния си пробег електроните, удряйки се в йоните на кристалната решетка, отдават придобитата от полето енергия и скоростта на насоченото им движение става равно на нула. Плътността на тока може да се изрази по следния начин:

$$j = ne\bar{v} = ne \frac{1}{2} (v_{\max} + 0) = \frac{ne^2 \bar{\lambda}}{2m\bar{v}_{кв.}} E.$$

Във векторен вид зависимостта се записва по следния начин:

$$\vec{j} = \frac{ne^2 \bar{\lambda}}{2m\bar{v}_{кв.}} \vec{E}. \quad (5)$$

От закона на Ом в диференциална форма  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ , за специфичната електропроводимост се получава:

$$\sigma = \frac{ne^2 \bar{\lambda}}{2m\bar{v}_{кв.}}. \quad (6)$$

Уравнението (5) изразява линейната връзка между плътността на тока  $\vec{j}$  и интензитета на електричното поле  $\vec{E}$  и е закон на Ом, изведен от класическата теория на електронния газ. Според тази теория *съпротивлението на проводника се дължи на ударите на електроните с възлите на кристалната решетка на веществото.*

#### 4. Моделни представи за механизма на електропроводимост в твърдите тела.

Електропроводимостта на полупроводниците може да се обясни от гледна точка на енергетичните представи за строежа на веществото. Според квантовата теория електроните в изолиран атом заемат дискретни енергетични нива, отделени едно от друго с широки области на забранени стойности на енергии. При това съгласно принципа на Паули на всяко ниво могат да се намират по два електрона с противоположни спинове.

При образуването на твърдо тяло, когато атомите се разполагат на много близко разстояние  $r_0$  от порядъка на няколко нанометри, енергетичното състояние на един електрон се определя не само от взаимодействието му с ядрото, но и от взаимодействието му с всички атоми на твърдото тяло. Поради взаимодействието между атомите при образуването на твърдото тяло - кристал (от  $N$  атома, разположени на разстояние  $r_0$ ), всяко позволено енергетично ниво на електрона в изолирания атом  $E_i$  се разцепва на  $N$  на брой енергетични поднива в кристала, разположени много близо едно до друго, които образуват разрешени зони (РЗ)  $\Delta E_i$  от позволени стойности на енергията с ширина няколко eV.



Големината на разцепване на различните енергетични нива е различна: за вътрешните електрони разцепването е много по-слабо от това за валентните електрони.

Разрешените енергетични зони в твърдото тяло са разделени от зони със забранени стойности на енергиите. Те се наричат **забранени зони** (ЗЗ) -  $E_g$ . Ширините на РЗ и ЗЗ са от един порядък - няколко eV. Ако броят атоми в един кристал е  $N \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ , то разстоянието между поднивата в зоната е  $\Delta \varepsilon \sim 10^{-22} \text{ eV}$ , т.е. енергетичната зона е квазинепрекъсната.

Енергетичното ниво на валентните електрони се разцепва и образува т.н. валентна зона (ВЗ). От високоенергетичното ниво на възбудените атоми се образува т.н. зона на проводимост (ЗП). Тези две зони са разделени от зона със забранени стойности на енергиите наречена забранена зона (ЗЗ).

**При температура 0 К се дефинират тези две зони така:**

**Валентна зона** - най-високо (енергетически) лежащата зона, която е изцяло запълнена с електрони. Това е разрешената енергетична зона, която възниква от енергетичното ниво на валентните електрони в нормалното състояние на атома.

**Зона на проводимост** – най-нисколежащата (енергетически) частично запълнена или напълно свободна зона.

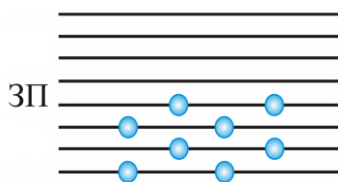
Електроните в кристалите могат да преминават от едно на друго енергетично ниво в РЗ, за което е необходима много малка енергия, от порядък на  $10^{-22} \text{ eV}$ , или от

една в друга РЗ, за което е необходима много по-голяма енергия – няколко eV. Енергията, която електронът получава при хаотичното му движение при стайна температура, е стотни от eV, което е достатъчно за преходи на електроните вътре в РЗ, но не и за преминаването им от една РЗ в друга. При повишаване на температурата или при други външни въздействия (прилагане на силни електрични полета, облъчване с различни лъчения) електроните могат да получат достатъчно голяма енергия, която позволява преминаването им от една в друга РЗ.

Всички процеси в твърдото тяло се изразяват чрез трите зони – ВЗ, ЗЗ и ЗП. Нека с  $E_c$  означим енергетичното ниво на дъното на ЗП и това съответства на минималната енергия, която могат да имат свободните електрони в кристала. Нека с  $E_v$  означим енергетичното ниво на тавана на ВЗ и това съответства на максималната енергия, която могат да имат електроните във валентната зона. Ширината на ЗЗ се означава с  $E_g$ .

От гледна точка на енергетичните представи за строежа на веществото разликата между трите групи вещества се обуславя от запълването на валентната зона с електрони и от ширината на забранената зона. За полупроводниците ширината на ЗЗ е под (2,5 – 3,0) eV, за диелектриците – над (2,5 – 3,0) eV, а металите нямат ЗЗ.

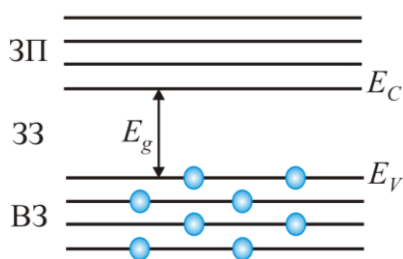
#### а) проводници (метали)



Най-високоенергетичната зона, която не е изцяло запълнена с електрони, независимо от температурата, се нарича **зона на проводимост**. При прилагане на електрично поле, към хаотичното движение на електроните се прибавя и насочено движение, електроните получават по-висока енергия и заемат по-високите енергетични нива в зоната. Така, чрез насочено движение, те се придвижват в

обема на кристала, при което протича електричен ток в кристала.

#### б) полупроводници (ПП)



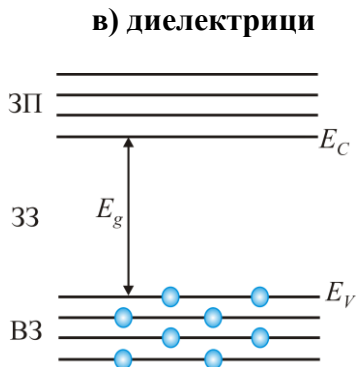
При температура 0 °K, ВЗ на един чист полупроводник е изцяло запълнена с електрони, а ЗП е изцяло свободна. Ширината на ЗЗ ( $E_g$ ) е не-повече от (2,5 – 3,0) eV. За най-често използваните полупроводници Si, Ge, GaAs, тя е около 1 eV.

Чистият полупроводник при температура 0 K не провежда електричен ток. При повишаване на температурата, енергията на топлинното движение на електроните става достатъчна за преминаването им от най-горните нива на валентната зона в зоната на проводимост.

При прескачане на определен брой електрони от валентната зона в зоната на проводимост, във валентната зона се появяват същият брой дупки (свободни от електрони нива). При отсъствие на външно електрично поле свободните електрони и дупки се движат хаотично. При наличие на електрично поле към хаотичното движение се прибавя и насочено движение, на дупките в посока на полето, а на свободните електрони в обратна посока.

Следователно, електроните от зоната на проводимост са отрицателни носители на заряд, а дупките – положителни.





Диелектриците се различават от полупроводниците по ширината на ЗЗ  $E_g$ , която е по-голяма и е над (2,5 – 3,0) eV. Тази граница е условна и не е точно определена.

Диелектриците могат да се нарекат **широкозонни ПП**.

**Теснозонните ПП** с  $E_g \sim 10^{-1}$  eV, могат да се нарекат **полуметали**.

## 5. Моделни представи за механизма на електропроводимост в полупроводниците

### 5.1. Собствена проводимост

**Собствена проводимост** се наблюдава в чист ПП (без примеси).

#### Пример:

Разглежда се кристал от IV група с четири валентни електрона: силиций -  $Si(4)$ .

<i>Структура на чист Si ПП</i>	<i>Енергетични зони на чист Si ПП</i>
<p>Със стрелка е показан процесът на превръщане на свързания електрон в свободен.</p>	<p>Със стрелка е показан процесът на преход на електрон от ВЗ в ЗП.</p>

**Собствена проводимост** възниква при преход на електрони от ВЗ в ЗП и това става за сметка на енергията на различни процеси – прилагане на топлинно въздействие, облъчване с различни лъчения и др.

- Тази енергия трябва да е поне равна на ширината на ЗЗ.
- Нивото на Ферми  $E_F$  се намира точно по средата на ЗЗ.

Нивото на Ферми е най-високото ниво, заето с електрони, при абсолютната нула. Нивото на Ферми е ниво, вероятността за запълването на което при температура, различна от абсолютната нула е 1/2.

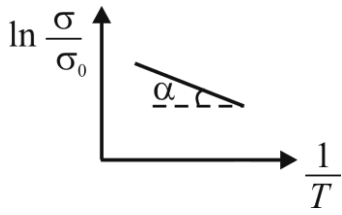
Процесът на превръщане на свързания електрон в свободен се нарича **генерация**.

На мястото на избития електрон се образува незавършена (неизградена) връзка, която се оказва положително заредена. Вакантното място се нарича **дупка**.

Процесът на превръщане на свободния електрон в свързан се нарича **рекомбинация**.

В резултат на разкъсване на валентни връзки се образуват равен брой свободни електрони и дупки, на които се дължи и собствената проводимост на ПП. Специфичната електропроводимост на ПП нараства бързо с температурата по закона:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}} \rightarrow \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = -\frac{E_g}{2k} \frac{1}{T}$$



За да се определи ширината на ЗЗ се измерва специфичната електропроводимост при нагряване на ПП. Построява се експерименталната крива  $\ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = f\left(\frac{1}{T}\right)$ , от

нея се определя наклонът  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{E_g}{2k}$  и се изчислява ширината на ЗЗ -  $E_g$ .

## 5.2. Примесна проводимост

### а) донорна проводимост

**Донорна проводимост** се наблюдава в примесни ПП, в които са вкарани (легирани) донори.

**Донорите** са примеси, които вкарват допълнително електрони в ПП.

**Пример:** Разглежда се кристал от IV група с четири валентни електрона, легиран с елемент от V група с пет валентни електрона: силиций, легиран с фосфор - примес  $P(5) \rightarrow Si(4)$ .

<b>Структура на донорен ПП (Si+P)</b>	<b>Енергетични зони на донорен ПП (Si+P)</b>
<p>С пунктир е показано движението на петия валентен електрон на примесния атом.</p>	<p>Със стрелка е показан процесът на преход на електрон от донорното ниво <math>E_d</math> в ЗП.</p>

- Петият валентен електрон на атома на фосфора  $P(5)$  се движи в Кулоновото поле на положителния примесен йон на фосфора  $P^{4+}$ .
- Примесните атоми  $P(5)$  създават локални (донорни) нива  $E_d$  в ЗЗ в близост до ЗП приблизително на разстояние  $kT$  при стайна температура ( $T_{ст.}$ ).
- Нивото на Ферми  $E_F$  се намира между донорното ниво  $E_d$  и дъното на ЗП.

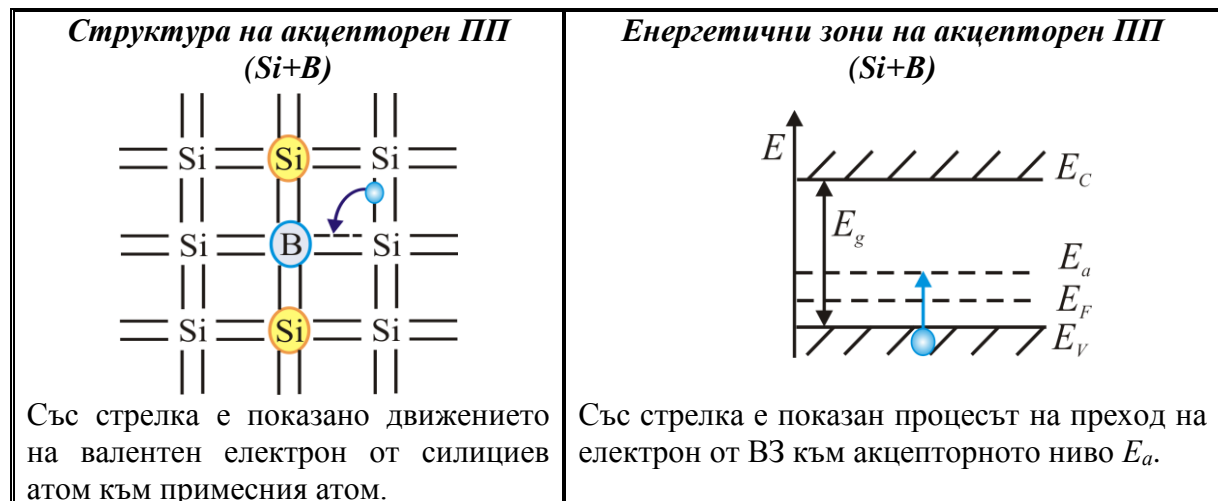
- При  $T_{ст.}$  голяма част от атомите  $P(5)$  се йонизират, като техните електрони преминават в ЗП. Тези електрони свободно се движат в ПП, а не около своя йон  $P^{4+}$  и създават примесна проводимост от  $n$  тип.
- Основни носители са електроните.
- ПП се нарича ПП от  $n$  – тип (електронен или донорен ПП).

### б) акцепторна проводимост

**Акцепторна проводимост** се наблюдава в примесни ПП, в които са вкарани (легирани) акцептори.

**Акцепторите** са примеси, които водят до недостиг на електрони в кристала.

**Пример:** Разглежда се кристал от IV група с четири валентни електрона, легиран с елемент от III група с три валентни електрона - силиций, легиран с бор - примес  $B(3) \rightarrow Si(4)$ .

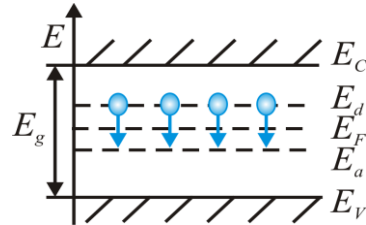


- Четворна връзка на борния атом  $B(3)$  може да се създаде от електрони на някой от останалите силициеви атоми  $Si(4)$ , което превръща примесния атом  $B(3)$  в едноряден отрицателен йон  $B^{4-}$ .
- Примесните атоми  $B(3)$  създават локални акцепторни нива  $E_a$  в ЗЗ в близост до ВЗ приблизително на разстояние  $kT$  при  $T_{ст.}$
- Нивото на Ферми  $E_F$  се намира между акцепторното ниво  $E_a$  и върха на ВЗ.
- При  $T_{ст.}$  голяма част от атомите  $B(3)$  се йонизират, като приемат електрони от ВЗ. На мястото на избития електрон се образува незавършена (неизградена) връзка, която се оказва положително заредена. Вакантното място се нарича дупка. Тези дупки свободно се движат във ВЗ, а не около своя йон  $B^{4-}$  и създават примесна проводимост от  $p$  тип.
- Основни носители са дупките.
- ПП се нарича ПП от  $p$  – тип (дупчест или акцепторен ПП).

### в) компенсирани полупроводник

**Компенсираният ПП** съдържа равни количества донорни и акцепторни примеси в съответните нива.

**Енергетични зони на компенсирани ПП**



Със стрелка е показан процесът на преход на валентен електрон от донорното  $E_d$  към акцепторното  $E_a$  ниво.

- Електроните ще преминат от донорните  $E_d$  в акцепторните  $E_a$  нива, тъй като тези преходи са енергетически по-изгодни.
- В резултат на този преход на електроните, всички донорни атоми се превръщат в положителни йони, а всички акцепторни – в отрицателни йони.
- Нивото на Ферми за електрони и дупки се премества в центъра на ЗЗ, там където е разположено при чист ПП.