

Физика на полупроводниците



*“Големите открития и подобрения
неизменно включват
сътрудничеството на много умове.”
Александър Греъм Бел*

Физика на полупроводниците

Цел разглеждането :

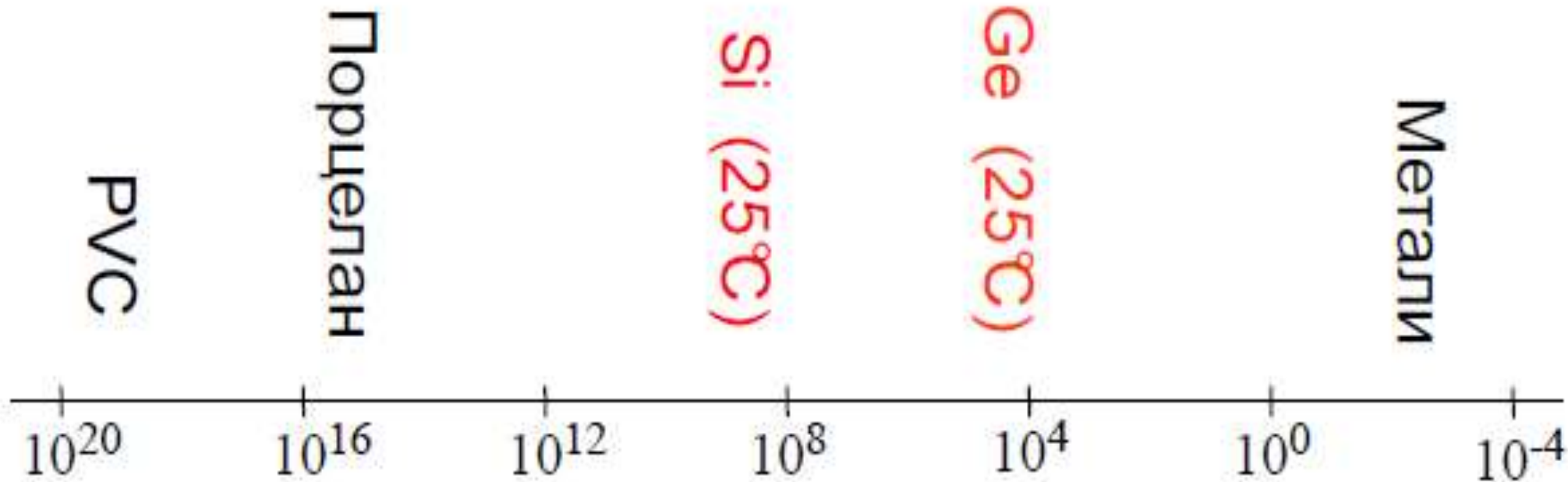
да може да отговаряте на тези или подобни въпроси:

- ✓ Какво е полупроводник (ПП);
- ✓ Каква е структурата на един ПП;
- ✓ Каква е връзката между метали, неметали и ПП;
- ✓ Какъв е механизмът за протичане на ток в металите и полупроводниците;



Място на полупроводниците

Специфично съпротивление на различни материали в $\Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$



Изолатори Полупроводници Проводници



Електрически ток

□ Какво представлява електрическият ток?

➤ Насочено движение на токоносители

□ Какви видове токоносители има?

➤ Електрони (в твърди тела, **вкл. полупроводници**) **(-)**

➤ Йони (в електролити) **(+)** или **(-)**

➤ Дупки (**в полупроводници**) **(+)**

□ Как са изградени атомите?



Строеж на атомите

□ Атомите са изградени от:

- протони (**заредени положително**);
- електрони (**заредени отрицателно**);
- неутрони (**електрически неутрални**).

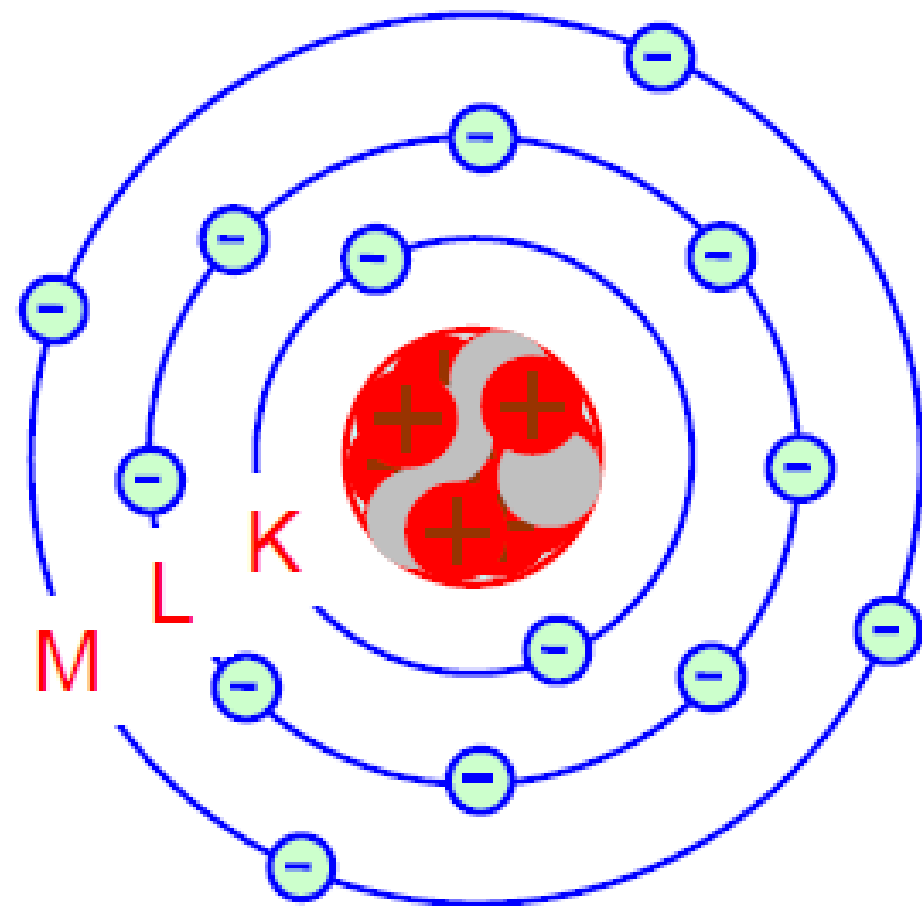
□ Атомът е електрически неутрален, тъй като:

- броят на протоните и електроните е еднакъв;
- имат еднакъв заряд.



Строеж на атомите (Si)

- ❑ 14 протона + 14 неутрона образуват ядрото
- ❑ 14 електрона обикалят ядрото
- ❑ Само по разрешени орбити
 - наречени електронни обвивки
- ❑ Отвътре навън K, L, M,....



Електронни обвивки

- ❑ Максималния брой електрони на една обвивка е:

$$N_{\max} = 2 \times n^2$$

(но най-много 8 на най-външната обвивка)

Обвивка	K	L	M	N	O	P	Q	
n	1	2	3	4	5	6	7	
N_{\max}	2	8	18	32	(50)	(72)	(98)	Вътрешни обвивки
N_{\max}	2	8	8	8	8	8	8	Най-външна обв. (на инертните газове)



Свързване на атоми

- Атомите се свързват помежду си за да постигнат максимален брой електрони на най-външната си обвивка (8), както е при устойчивата обвивка на инертните (благородните) газове
- Това може да се постигне по няколко начина:
 - *Приемане* на чужди валентни електрони в обвивката - ако липсват само няколко (до 8)
 - *Отдаване* на валентните електрони от обвивката - ако са само няколко
 - Общо използване на електроните от два атома



Свързване на атоми **при металите**

- Валентните електрони се отделят от техните атоми
 - Движат се свободно между атомите на кристалната решетка (т.н. “електронен газ”)
- При **добрите проводници** на електрически ток броят на електроните достига $5 \times 10^{22} / \text{cm}^3$



Свързване на атоми при ПП

□ Свързването на два атома става чрез **ковалентна връзка на два електрона**

➤ Според теорията на ковалентните връзки:

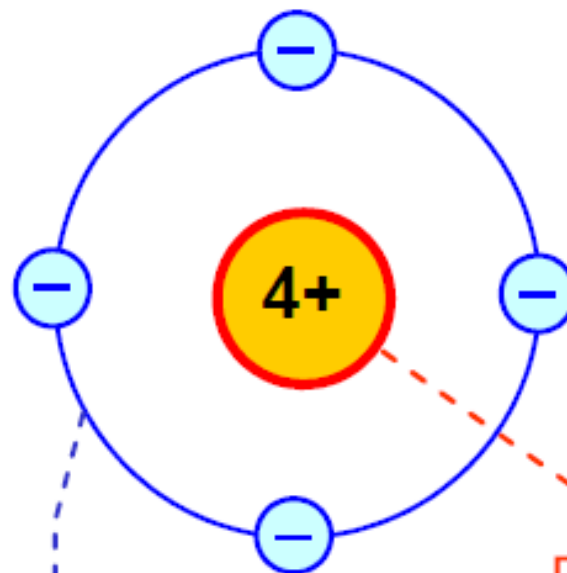
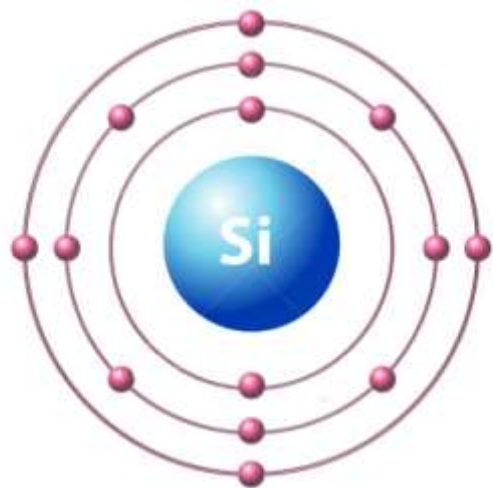
Теорията за ковалентната връзка е дадена от Люис(1916). Според нея атомите се съединяват, като от валентните им електрони се образуват една или няколко общи електронни двойки.

□ Електронната двойка се състои от по един електрон от двата атома

□ Двата електрона са свързани към атомите

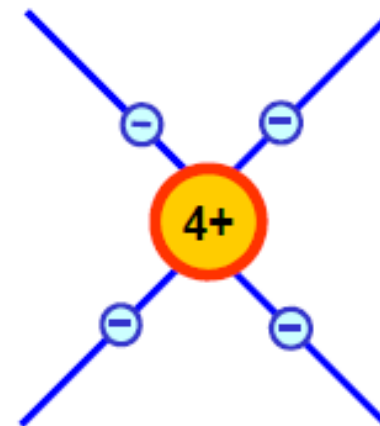


Опростено представяне на ПП атом

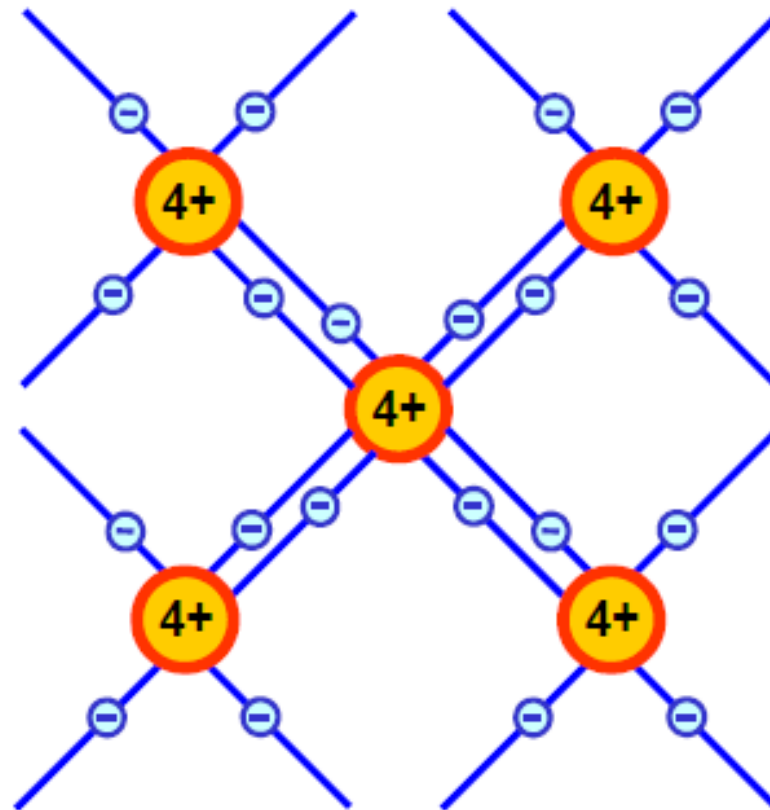
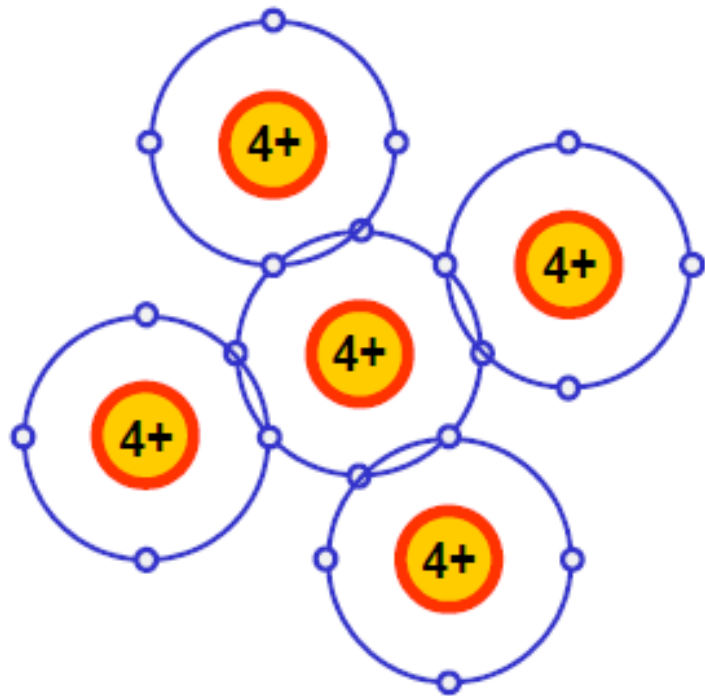


Най-външна обвивка

Ядро + вътр.
обвивки



Ковалентни връзки (Si)

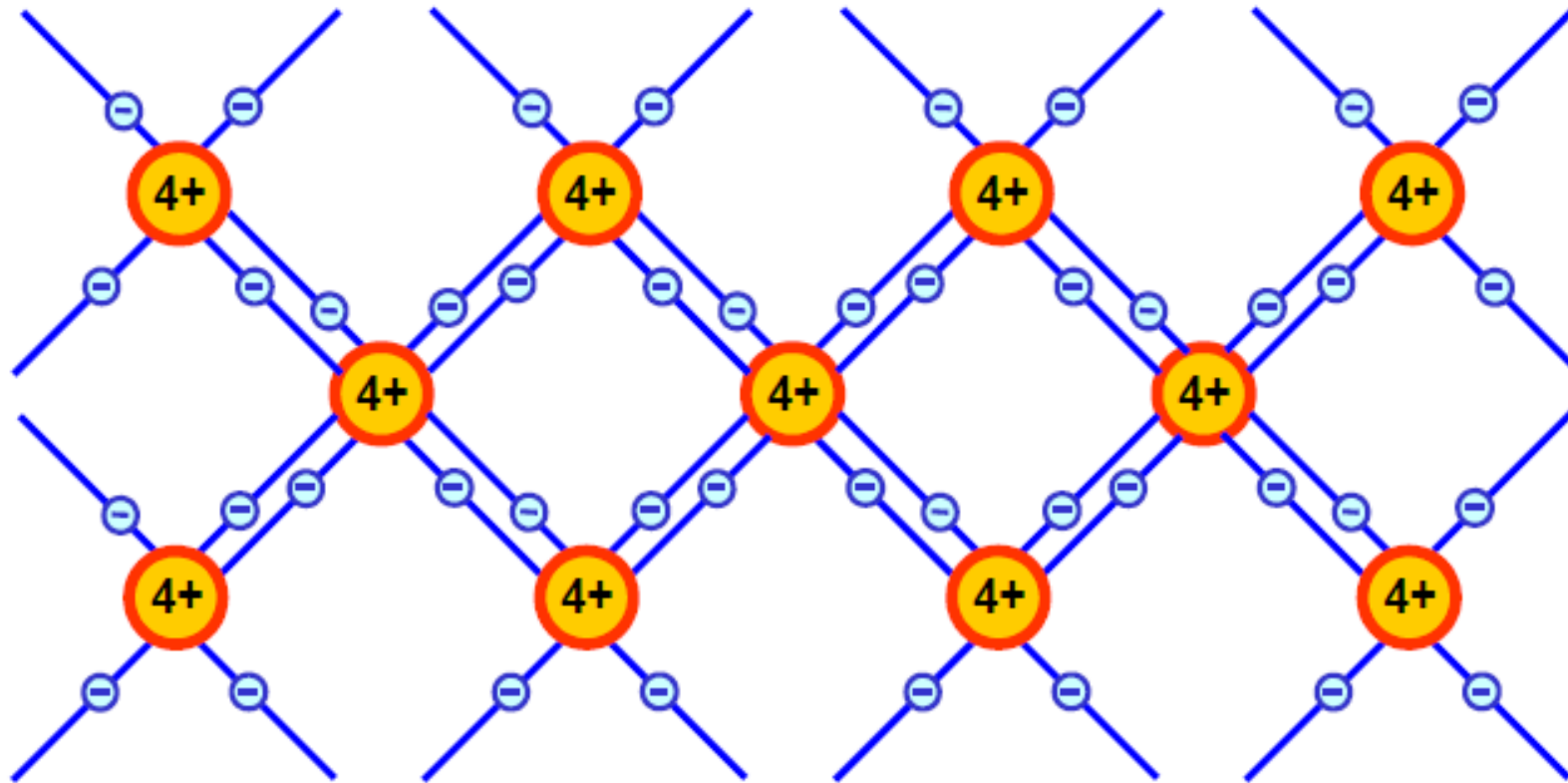


Собствена проводимост

- Под собствена проводимост се разбира възможността за протичане на ток в чист полупроводник.
- Собствената проводимост зависи силно от температурата:
- при $T = 0 \text{ K}$ \Rightarrow Всички валентни електрони са свързани чрез ковалентни връзки; Няма свободни електрони
- при $T > 0 \text{ K}$ \Rightarrow Вкарва се допълнителна енергия към атомите и техните валентни електрони;
- \Rightarrow Електроните с **най-голяма енергия** разкъсват ковалентните връзки



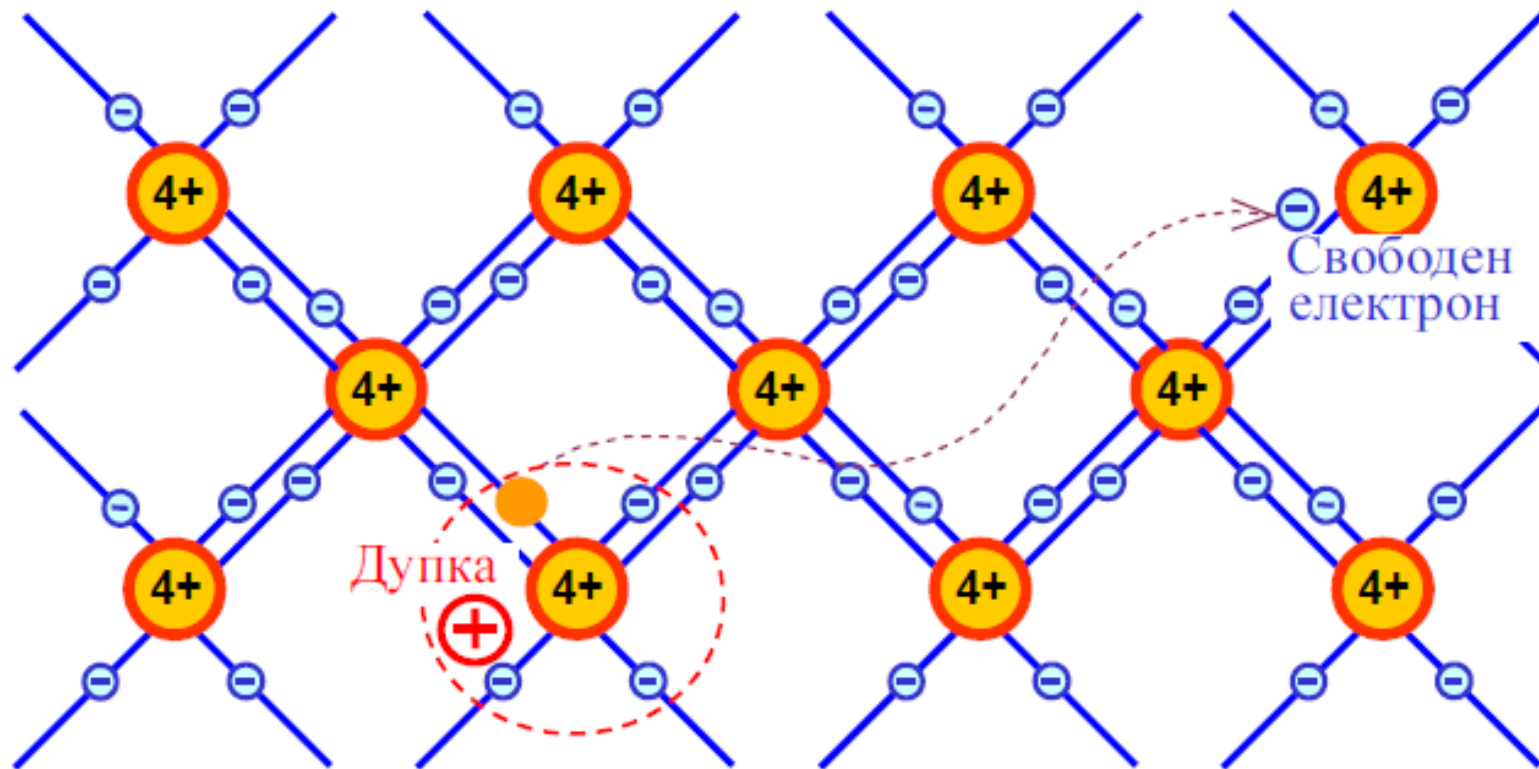
Собствена проводимост



Полупроводниците се държат като
изолатори при $T = 0$ K

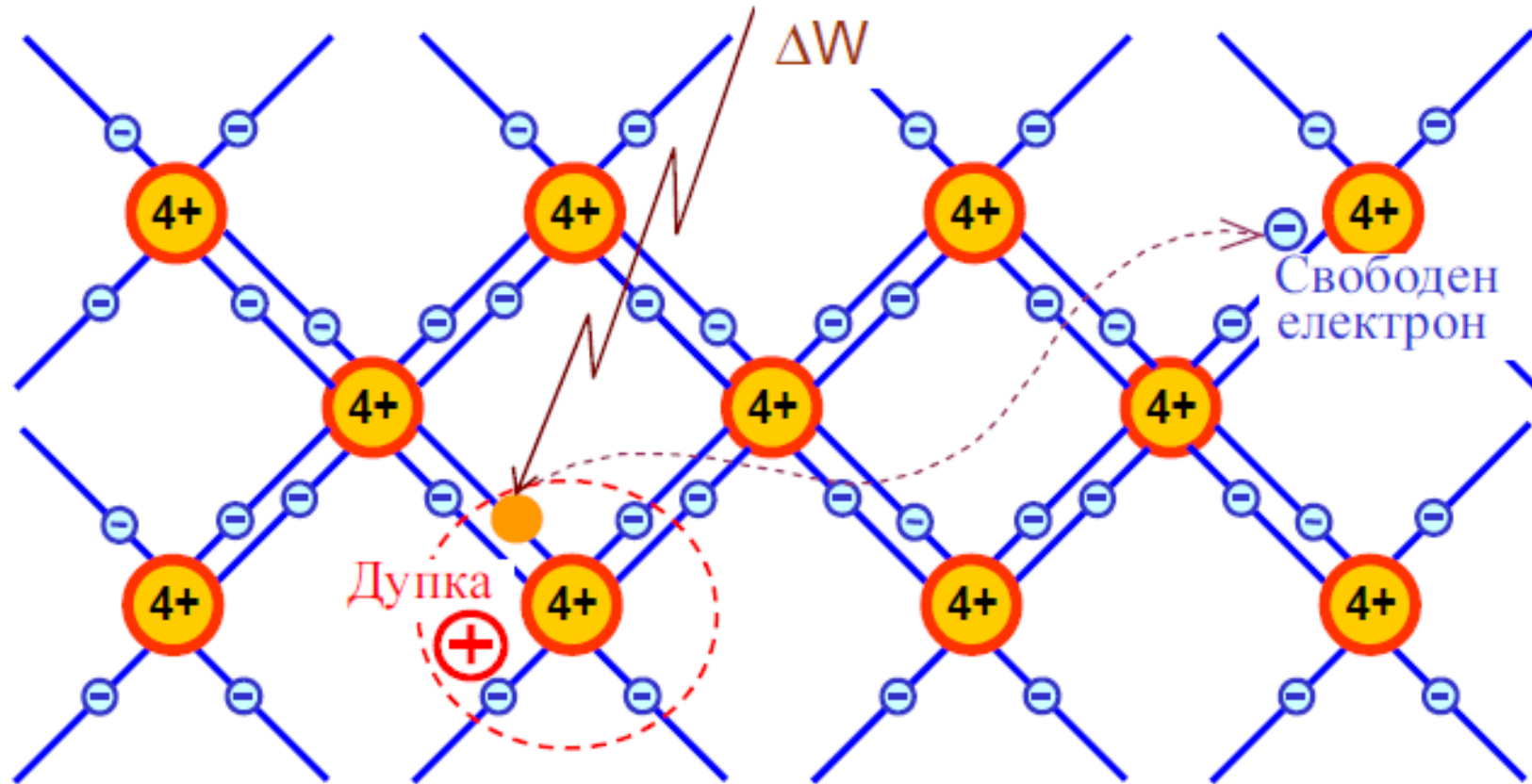


Генериране на електрон и дупка



Концентрацията **n** на свободните електрони е равна на концентрацията **p** на дупките (**n = p**)

Генериране на електрон и дупка



За йонизиране на Si необходимата енергия е $\Delta W \approx 1,1 \text{ eV}$

Рекомбиниране

- ❑ Рекомбинирането е обратния процес на генерирането
 - Свободен електрон заема свободното място в дупката
- ❑ Концентрацията (броят) на дупки и електрони е температурно зависим
 - $n = p = n_i = f(T)$,
- ❑ n_i е **собствената концентрация** в чист ПП
 - За Si $n_i = 1,5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ при $T = 300 \text{ K}$
 - Собствената концентрация се удвоява при повишаване на температурата с $\Delta T = 10 \text{ K}$



Дотиране

- ❑ Проводимостта на ПП може значително да се повиши чрез добавяне (**дотиране**) на чужди (**примесни**) атоми в кристала
- ❑ За дотиране се използват атоми от **3**-а или **5**-а валентност, т.е. всеки атом дава по един токоносител (електрон или дупка)
 - 5-а валентност (донатори): **P, As, Sb**
 - 3-а валентност (акцептори): **B, Al, In**
- ❑ Дотират се сравнително малки количества чужди атоми
 - (чужди атоми : ПП атоми = 1:1000 до 1:10¹⁰)

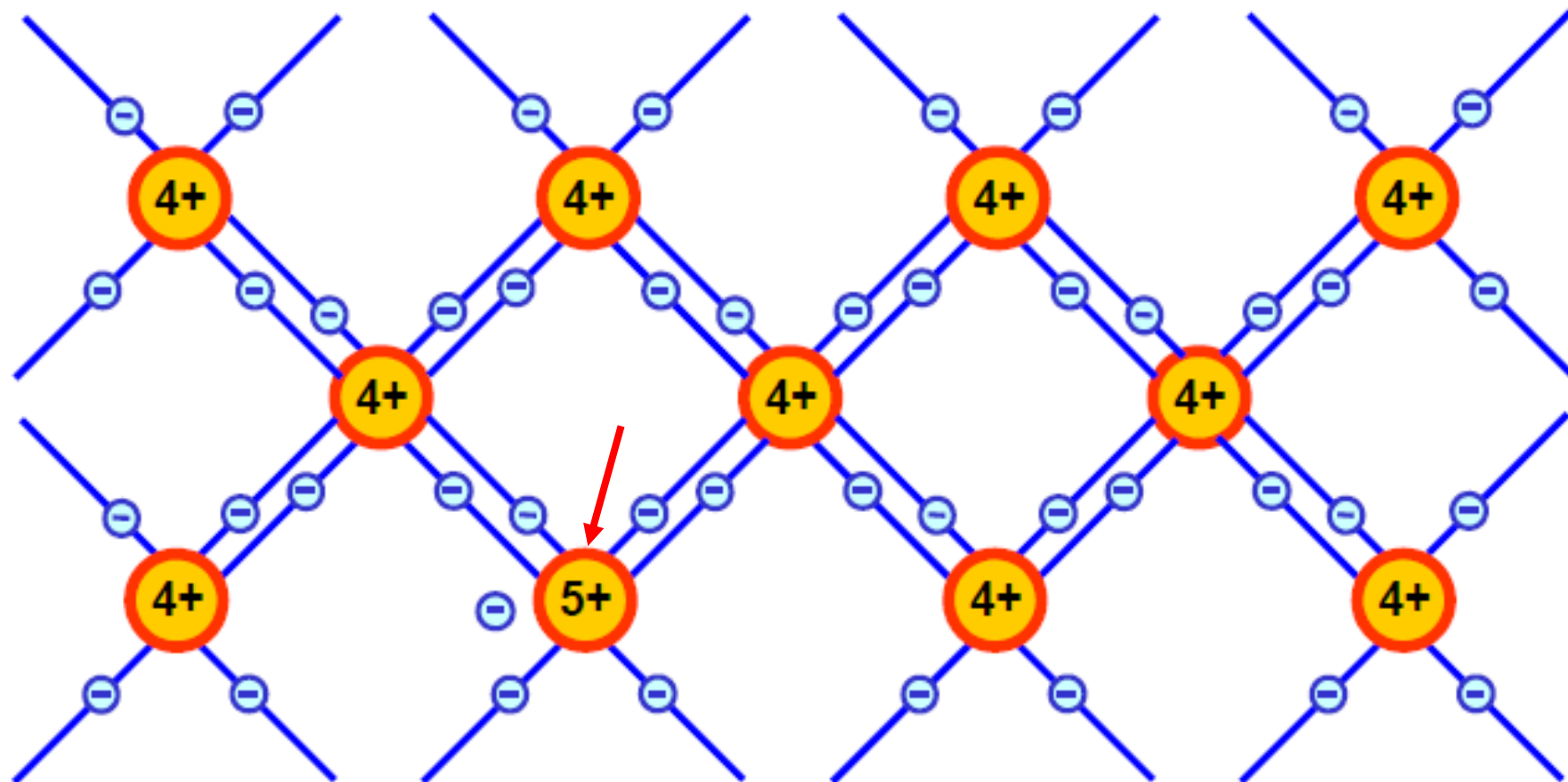


Методи за дотиране

- ☐ Легиране
- ☐ Дифузия
- ☐ Епитаксия (израстване на кристала в газова среда)
- ☐ Йонна имплантация

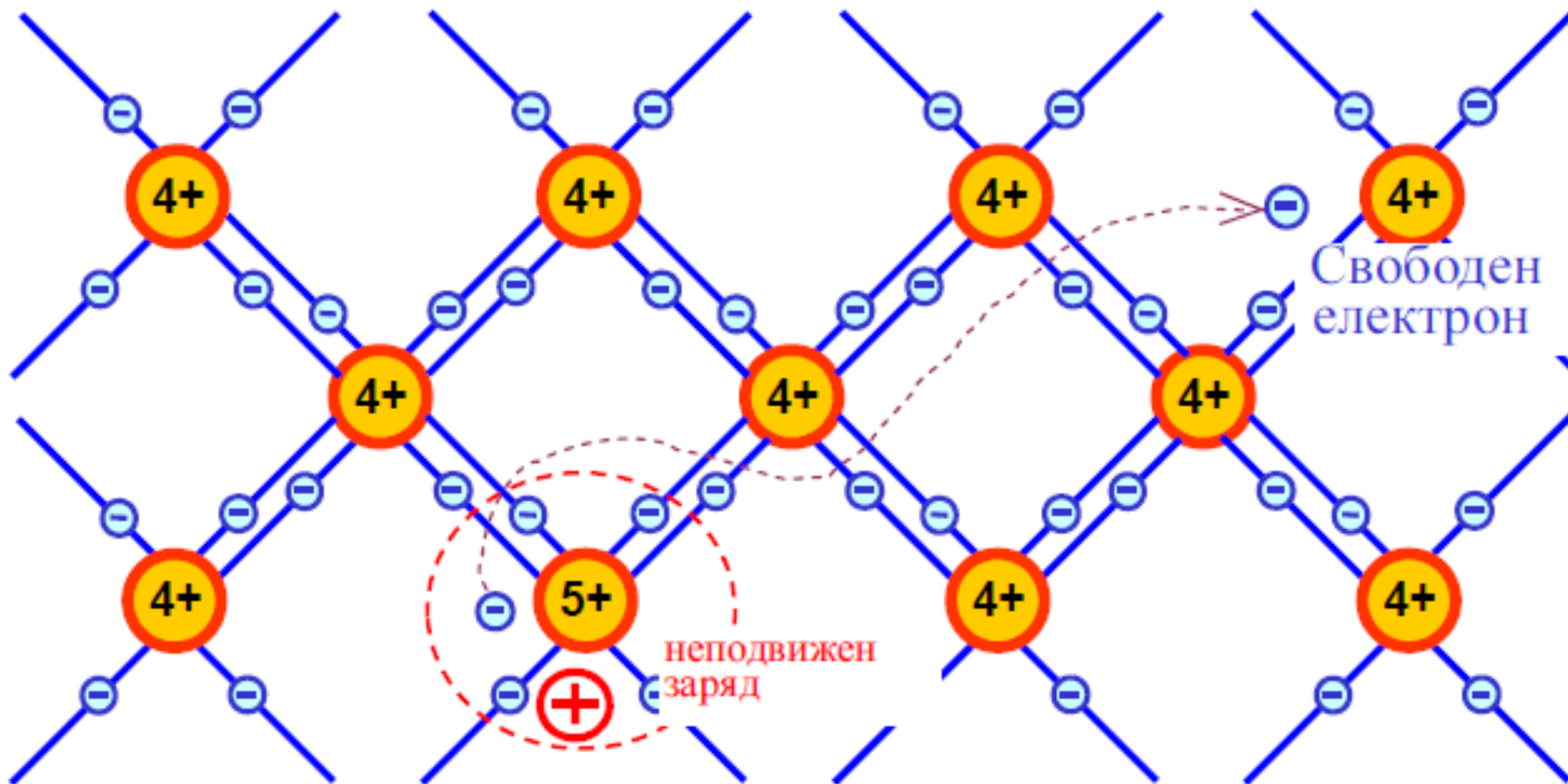


Дотиране с атоми от 5-а валентност



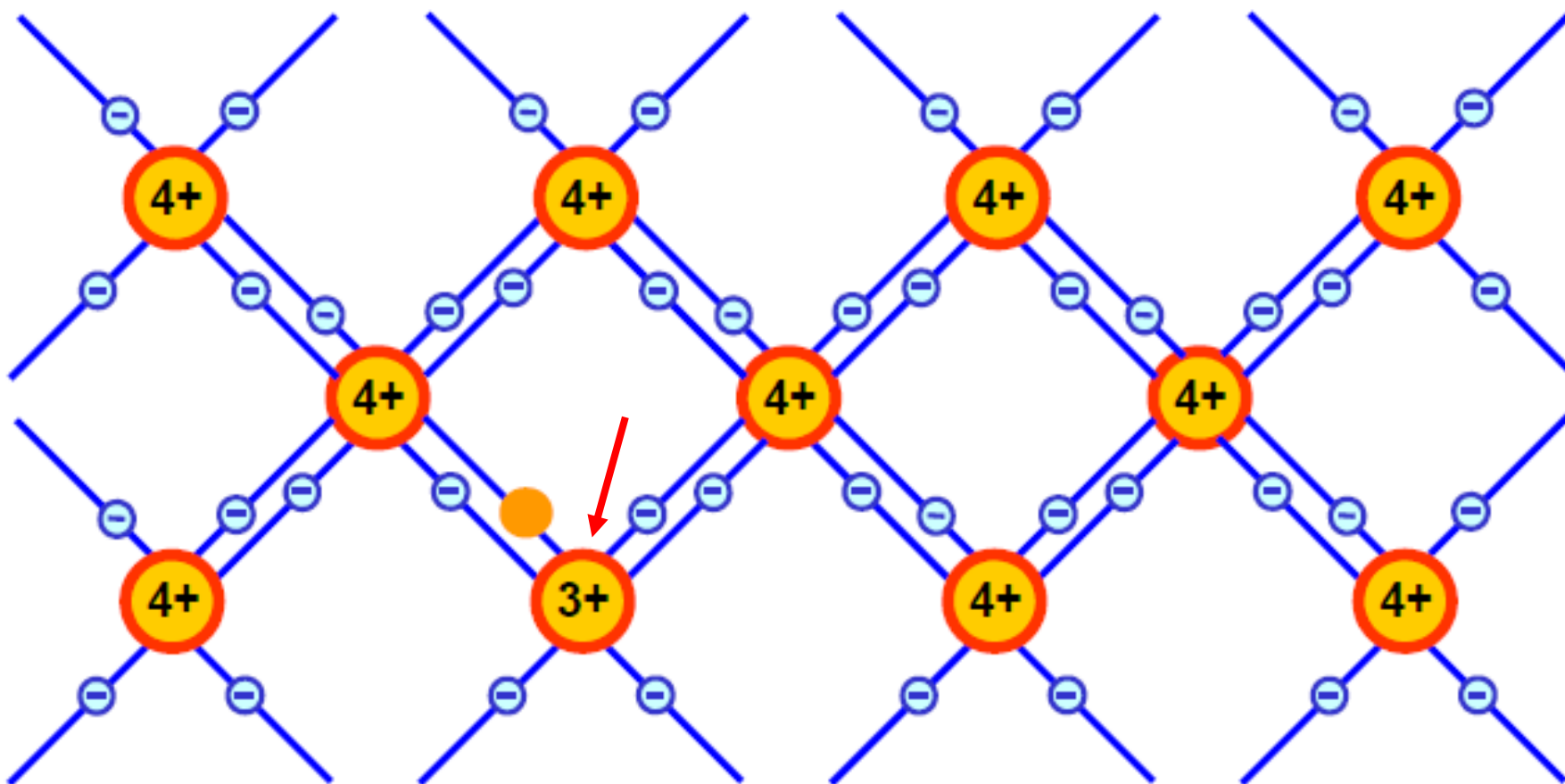
В първия момент, или при ниска температура

Дотиране с атоми от 5-а валентност



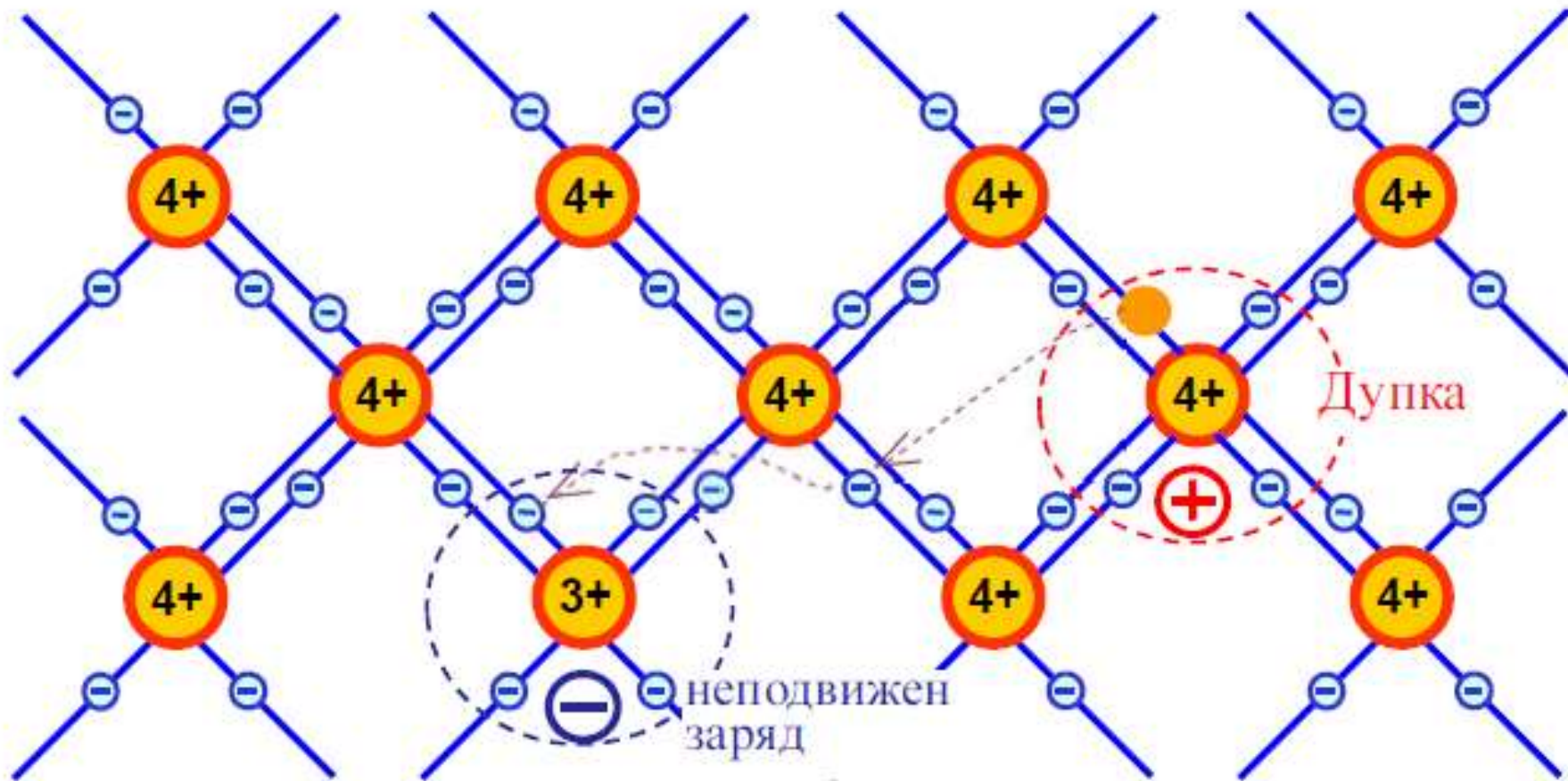
N-тип ПП (токоносителите са свободните електрони)

Дотиране с атоми от 3-а валентност



В първия момент, или при ниска температура

Йонизиране при вкарване на енергия



Р-тип ПП (токоносителите са **дупките**, те се преместват, когато валентен електрон заеме празното място)

Примесна проводимост

- Концентрацията на свободните токоносители се определя от концентрацията на примесите (n_A, n_D) и собствената проводимост (n_i)
- Ако примесната концентрация се избере много по-голяма от собствената, то свойствата на ПП се определят от примесите
- Концентрацията на електрони и дупки в дотирания ПП не е еднаква



Примесна проводимост

- ❑ Токоносителите, които преобладават се наричат “основни токоносители”
- ❑ Токоносителите, които са по-малко се наричат “неосновни токоносители”
- ❑ Концентрация на основните токоносители влияе върху концентрацията на неосновните токоносители
- ❑ При по-голяма концентрация на основните токоносители се увеличава вероятността за рекомбинация, при което ще намаляват неосновните токоносители



Електрическа проводимост

□ Специфичната електрическа проводимост σ се определя от плътността на тока и интензитета на електрическото поле $\sigma = J/E$. Като се вземе пред вид:

- Елементарен заряд – e ; Заряд – Q ; Брой електрони – N ;
- Плътност на тока $J = I/A$; Сила на тока $I = dQ/dt = e \cdot dN/dt$;
- Концентрация $n = dN/dV$; Обем $dV = A \cdot dx$;
- Скорост $v = dx/dt$; Подвижност на токоносителите $\mu = v/E$;

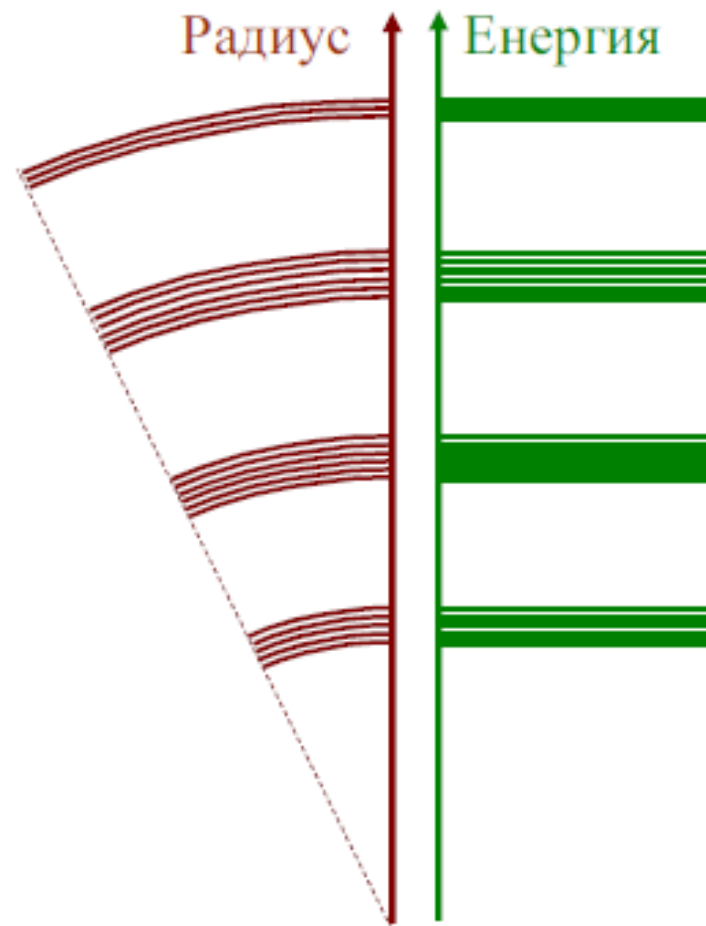
се получава: $\sigma = e \cdot n \cdot \mu$

За ПП с електрони и дупки: $\sigma = e \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$



Зонна теория (енергиен модел)

- ❑ Радиусите на орбитите на електроните служат като мярка за тяхната енергия
- ❑ Всяка от орбитите на отделния атом представлява линия от енергийната диаграма



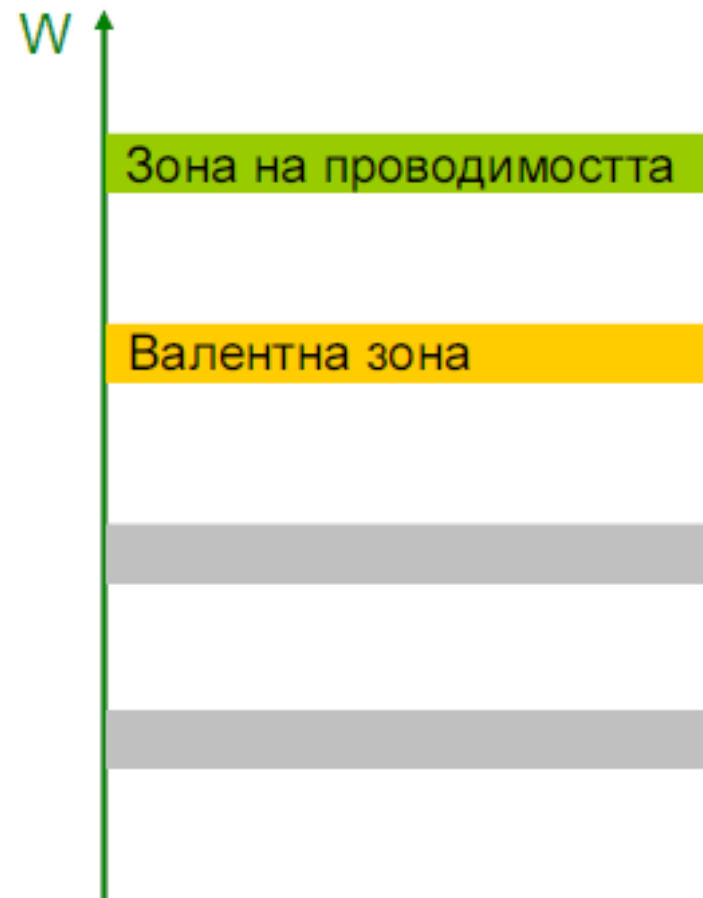
Зонна теория (енергиен модел)

- ❑ Електроните на много атоми, както е в един кристал си влияят взаимно.
- ❑ Отделните линии не могат да се различават и се получават зони
- ❑ Между отделните енергийни зони има забранени зони



Зонна теория (енергиен модел)

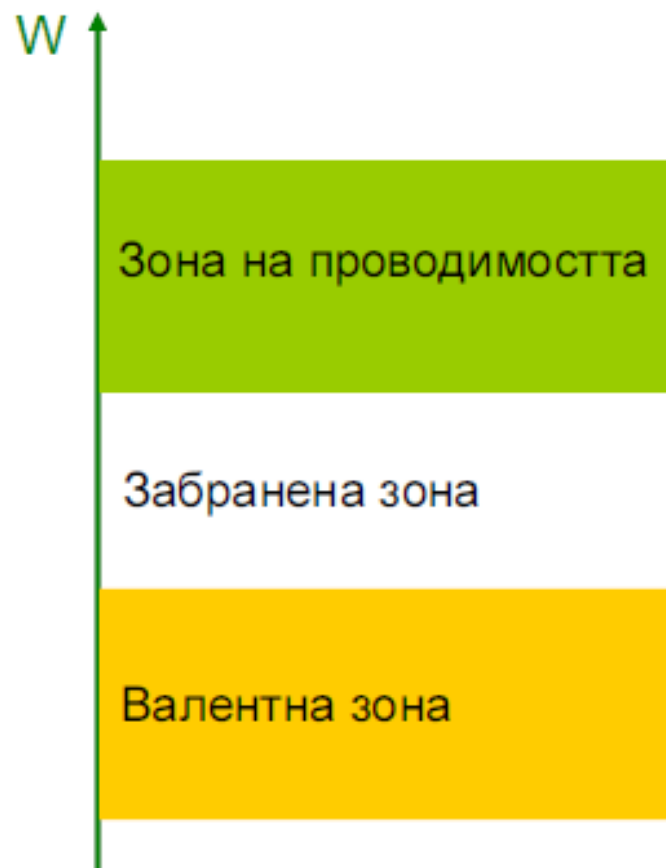
- ❑ Енергийната зона на най-външната електронна обвивка се нарича **валентна зона**.
- ❑ Над нея се намира **зоната на проводимостта**.
- ❑ В тази зона се намират отделените от атомите **свободни електрони**, които осигуряват проводимостта на ПП.



Зонна теория (енергиен модел)

□ Взаимодействието между атоми се осъществява само от електрони, които се намират във **валентната зона** или **зоната на проводимостта**.

□ Затова обикновено се показват само тези две зони и намиращата се между тях **забранена зона**.



Зонна теория (енергиен модел)

- $W_C - W_V = \Delta W$ се нарича ширина на забранената зона
- Ако електрон придобие по-голяма енергия от W_{\max} , той може да напусне кристала



Енергиен модел при метали

- При металите валентната зона и зоната на проводимостта **се припокриват**
- По този начин валентните електрони могат да минават в зоната на проводимост без да им е необходима допълнителна енергия



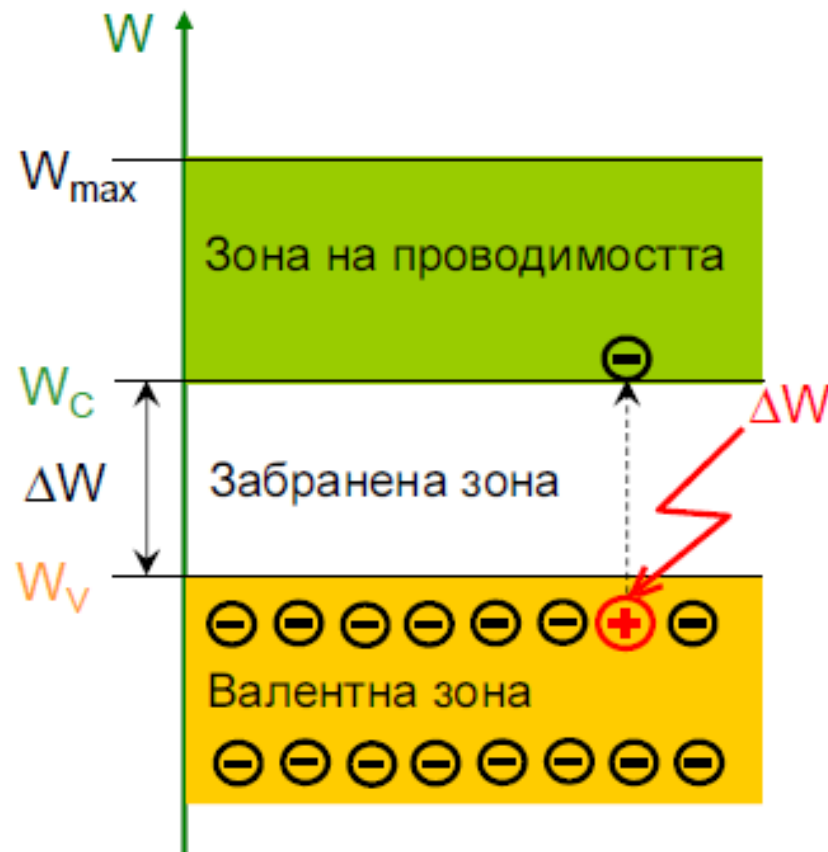
Енергиен модел при чист ПП

- При полупроводниците съществува забранена зона
- При различните ПП тя е с различна ширина:
 - За Ge: $DW \gg 0,7 \text{ eV}$
 - За Si: $DW \gg 1,1 \text{ eV}$
- при $T = 0 \text{ K}$ всичките електрони са във валентната зона
- ПП се държи като **изолатор**



Енергиен модел при чист ПП

- При $T > 0\text{ K}$ електроните придобиват допълнителна Енергия
- Ако тази енергия е $\geq \Delta W$, то електронът напуска валентната зона и преминава в зоната на проводимостта
- Генерират се един свободен електрон и една дупка



Енергиен модел при изолатори

- ❑ Не е възможно да се вкара на валентните електрони енергия по-голяма от **2,5 eV**
- ❑ Следователно материали с $\Delta W \geq \mathbf{2,5\ eV}$ са изолатори и не могат да провеждат ток
- ❑ Напр. за диаманта $\Delta W \approx \mathbf{7\ eV}$

