

# Polovodič

- měrný odpor  $10^{-1} \Omega^{-1}\text{m}^{-1} - 10^4 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$

závisí na teplotě, na poruchách krystalové mříže  
koncentraci příměsí, na el. a mag. poli, na záření

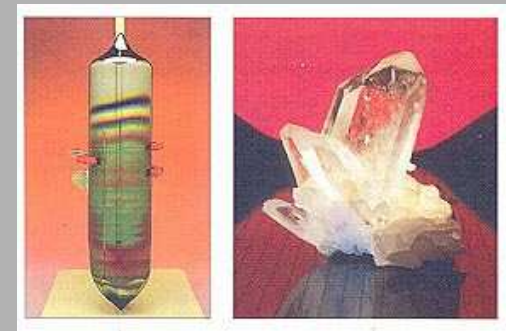
- šířka zakáz.pásu 2-3eV

- monokrystal, polykrystal, amorfní

- vlastní (intrinsický)  $p = n = n_i$   
nevlastní (příměsový)

kompensovaný (Příměs P kompenzuje vliv N)

- $P^{++}$ ,  $N^{++}$  tzv. degenerovaný polovodič, kdy Fermiho  
hladina leží uvnitř vodivostního pásu nebo ve valenčním  
pásu



# Pásový model pevné látky

## Elektronový obal atomu

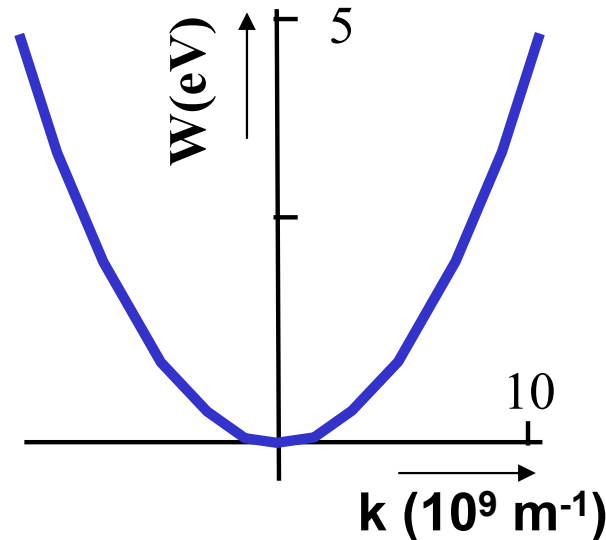
Schrödingerova rovnice  
pro **volný elektron ve vakuu**

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}W\Psi(x) = 0$$

Řešení:

$$\psi(x) = A \exp(jkx)$$

$$W = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} = \frac{mv^2}{2}$$



Tedy : energie **volného** elektronu **není kvantována**, elektron může nabývat

$$W \in \langle 0, \infty \rangle$$

# Pásový model pevné látky

## Elektronový obal atomu v elast. poli

Schrödingerova rovnice

pro elektron v poli konstantního potenciálu

$$\nabla^2 \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (W - V) \Psi = 0$$

**Příklad :** kov - elektron se pohybuje volně v potenciálu iontů a ostatních elektronů

Řešení:

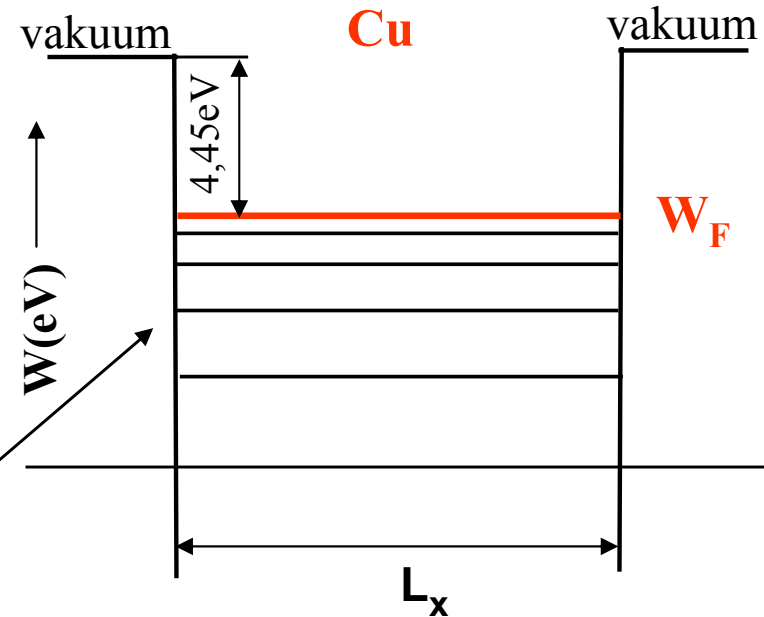
$$\psi = C \exp [j (\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$$

$$k_i = n_i \frac{2\pi}{L_i}$$

$$(i = x, y, z)$$

$$W(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 \mathbf{k}^2}{2m}$$

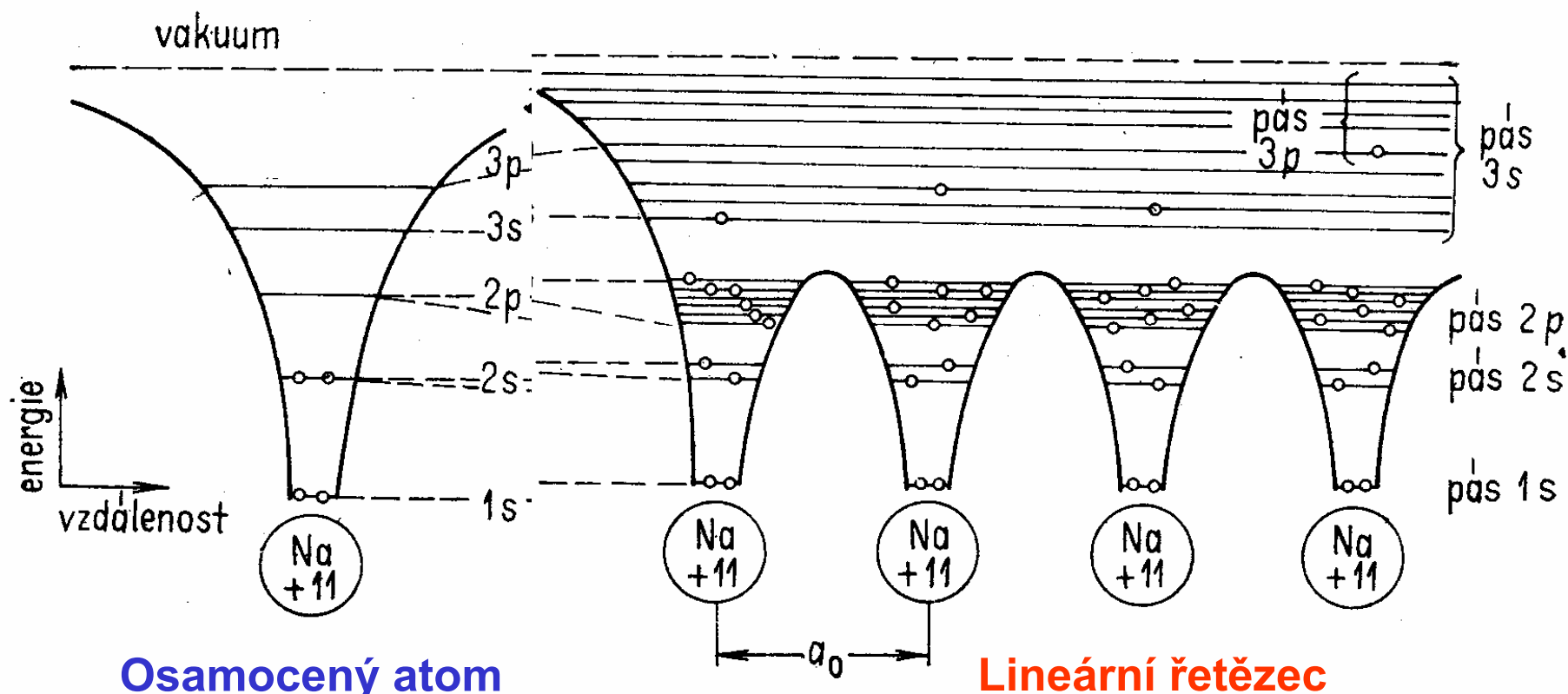
Periodičnost  $\psi \Rightarrow$  diskrétní  $\mathbf{k}$  ! - kv.stavy



**Tedy : Diskrétní hodnoty energie ! Každý kvantový stav dva  $e^-$  (opačný spin)**

Poslední obsazený kvant. stav ( $T = 0K$ ) je  $W_F$

# Místní průběh potenciálu a kvantové stavy



Diskrétní jednoduché hladiny kvantové stavy

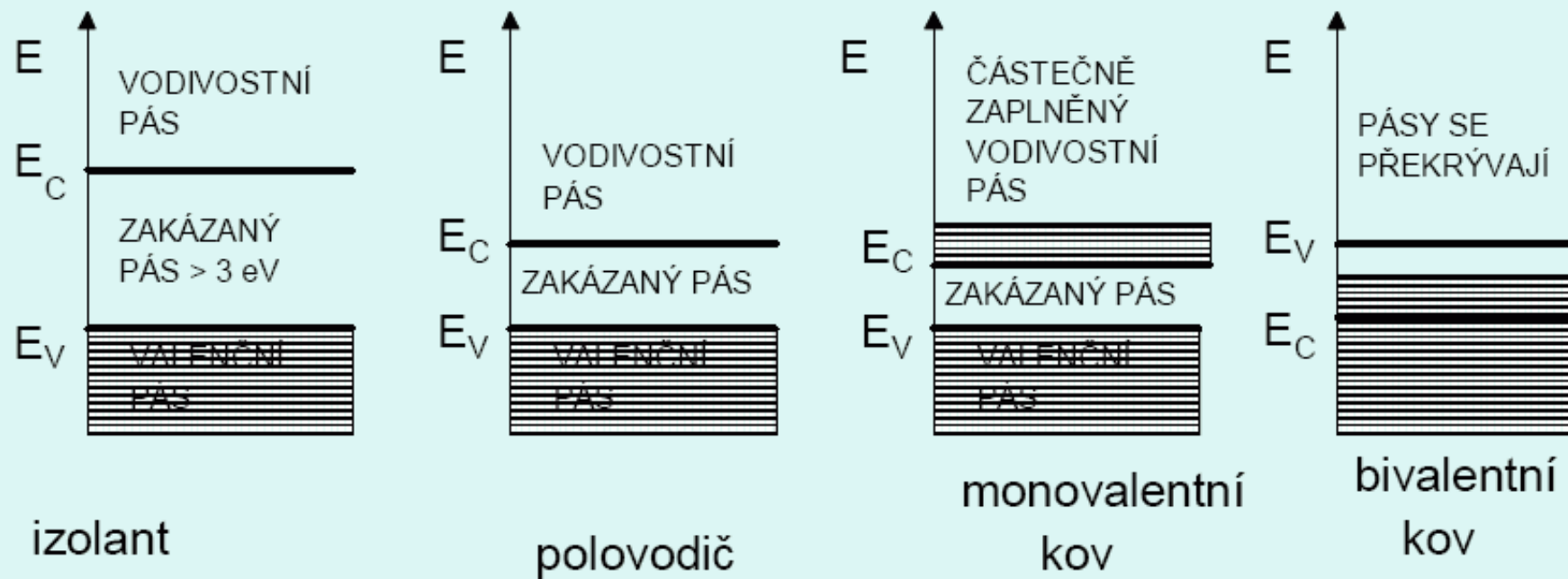
Rozštěpení hladin vlivem vzájemného působení atomů a důsledku Pauliho principu

# Elektrická vodivost pevných látek

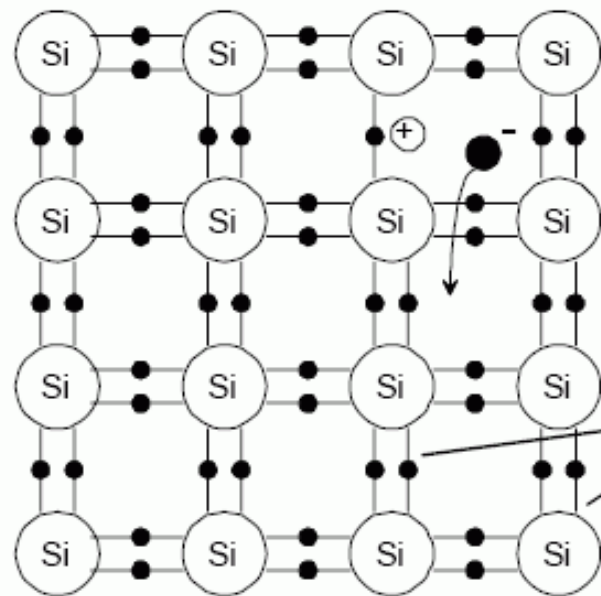
Aby se elektron účastnil vedení elektrického proudu musí být jeho energie na některé z energetických hladin ve vodivostním pásu.

Energie potřebná k uvolnění elektronu je dána šířkou zakázaného pásu mezi vodivostním a valenčním pásem.

**!! O elektrické vodivosti pevných látek rozhoduje pásová struktura !!**



## Intrinzický polovodič



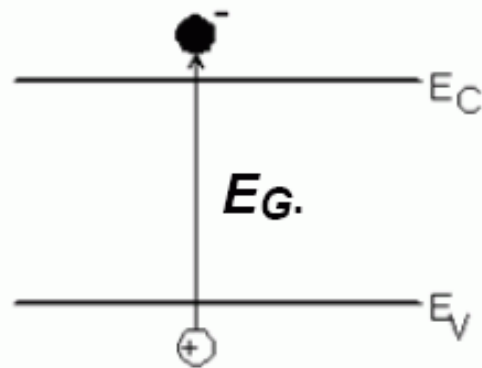
Dokonalý krystal bez poruch a příměsí (?)

Stejné vzdálenosti atomů a úhly vazeb

Energetické pásy jsou u všech atomů deformovány stejným způsobem !!!!!!!

Ionizační (aktivační) energie:

- k uvolnění elektronu
- odpovídá  $E_G$ .



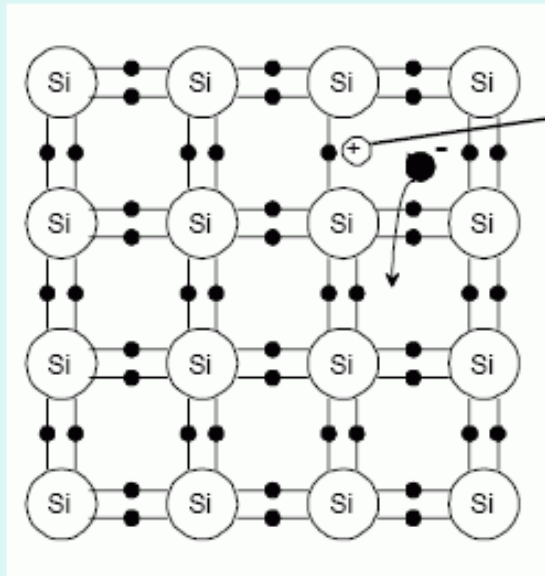
Elektron ji získá:

Z tepelných kmitů krystalové mříže

Od fotonu při osvětlení ( $E_f > E_G$ )

Od jiného elektronu ( $E_e > E_G$ )

## Dva nosiče elektrického proudu



Uvolněný elektron zanechá volnou vazbu

Volná vazba se může přesunout k jinému atomu

Přeskakováním elektronu ve vazbách se mění náboj u příslušného atomu – krystalem se pohybuje „díra“ s kladným nábojem

*Díra je fiktivní nosič elektrického proudu,  
kterému přisuzujeme kladný náboj.*

Ke každému uvolněnému elektronu ( $-q$ ) je vygenerována díra ( $+q$ ).

**Celkový náboj se nezmění !!!!!**

## Intrinzická koncentrace nosičů

$$n = p = n_i$$

***n*** ....koncentrace elektronů

Energie elektronů nabývá hodnot ve vodivostním pás ( $E > E_C$ )

***p***.....koncentrace děr

Energie elektronů nabývá hodnot ve vodivostním pásu ( $E < E_V$ )

***n<sub>i</sub>*** ...intrinzická koncentrace nosičů

T = 300 K

Si.....  $n_i = 10^{16} \text{ m}^{-3} = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Ge ... $n_i = 10^{19} \text{ m}^{-3} = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$



# Nevlastní polovodič typu N

Atomy příměsí - donory (dávají elektron) - pevně vázané v krystalové mříži

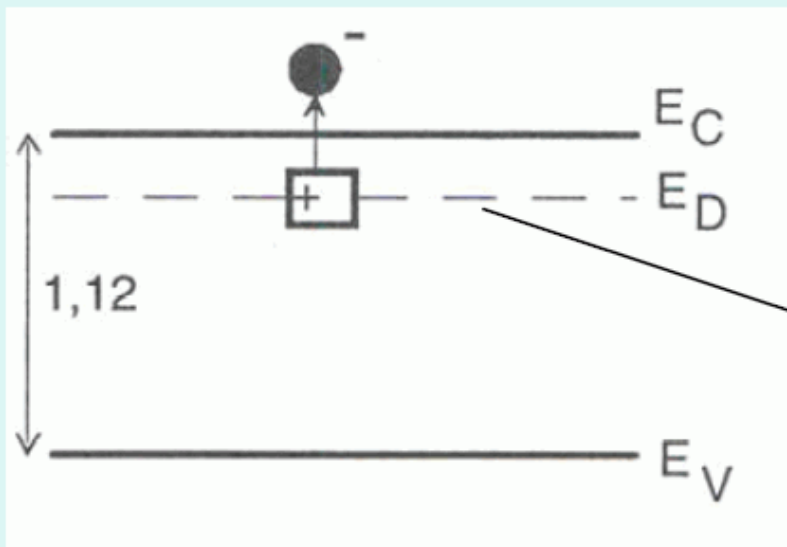
Koncentrace donorů -  $N_D$

Náboj (elektrický proud) přenášen převážně elektrony - majoritní nosiče :

Koncentrace elektronů  $n_n = \approx N_D$

Náboj přenášený děrami je zanedbatelný – minoritní nosiče

Koncentrace děr  $p_n \ll n_n = \approx N_D$

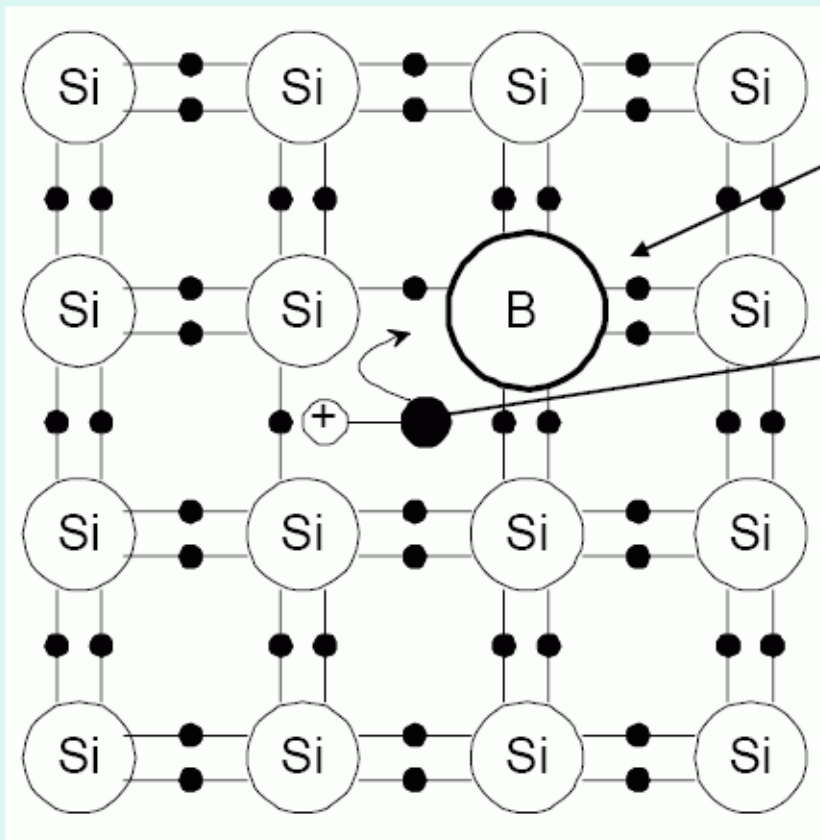


Pátý elektron příměsí je vázán velmi slabě !!!!!

Donorová hladina:

$$|E_C - E_D| = 40 - 50 \text{ meV}$$

## Nevlastní polovodič typu P



Příměs je trojmocný prvek : B (Al)

Volná vazba ochotně přijímá elektron: vznikne pohyblivá díra

Atom příměsi má po přijetí elektronu záporný náboj

Elektrony vznikající tepelnou generací jsou zachycovány děrami od příměsí

Koncentrace (počet) děr je stejná jako koncentrace příměsí

Koncentrace elektronů je velmi malá

Nábojová neutralita je zajištěna ionizovanými atomy příměsí (-q)

# Nevlastní polovodič typu P

Atomy příměsí - akceptory (přijímají elektron) - vázané v krystalové mříži

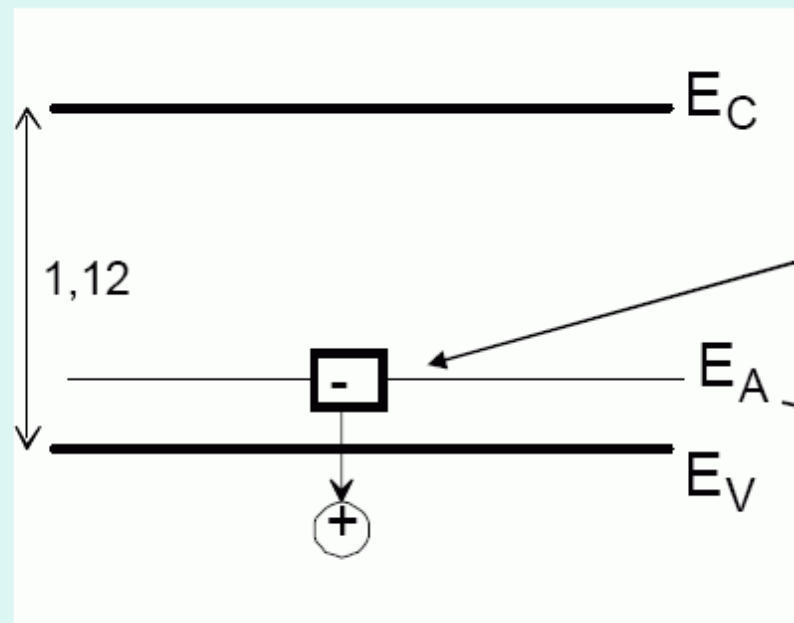
Koncentrace akceptorů -  $N_A$

Náboj (elektrický proud) přenášen převážně děrami - majoritní nosiče :

Koncentrace děr  $p_p \approx N_A$

Náboj přenášený elektrony je zanedbatelný – minoritní nosiče

Koncentrace elektronů  $n_p \ll p_p \approx N_A$



Chybějící elektron je vázán velmi snadno !!!

Akceptorová hladina :

$$|E_A - E_V| = 40 - 50 \text{ meV}$$

## Fermi - Diracova rozdělovací funkce

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right]}$$

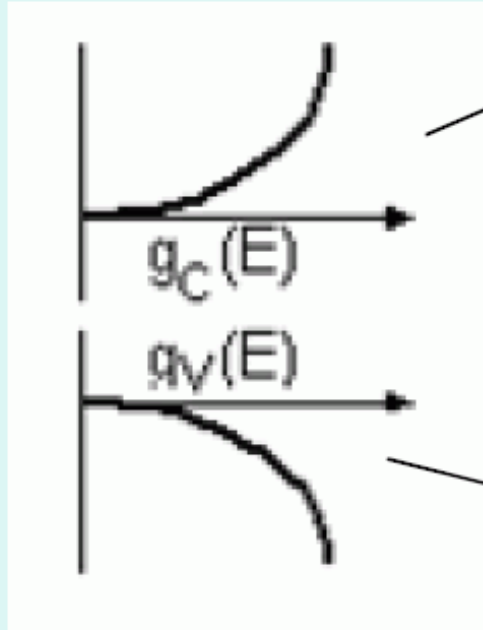
$E$  → Energie částice (právě v tom okamžiku kdy to zkoumáme)

$E_F$  → Fermiho energie (termodynamická veličina)  
= vztažná úroveň proti které to počítáme)

**F- D rozdělovací funkce vyjadřuje pravděpodobnost obsazení energetického stavu na příslušné energetické úrovni**

# Hustota stavů

(hustota energetických stavů pro elektrony a díry)



$$g_C(E) = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^* (E - E_C)}}{\pi^2 \hbar^3} = \text{konst.} \sqrt{E - E_C}$$

....pro vodivostní pás :  $E \geq E_C$

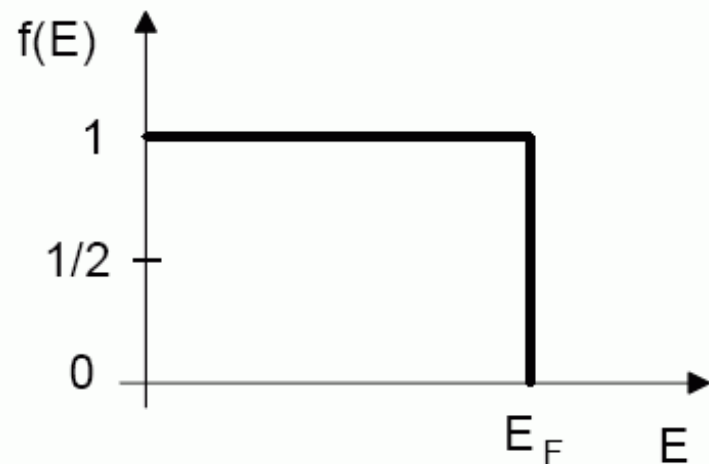
$$g_V(E) = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^* (E_V - E)}}{\pi^2 \hbar^3} = \text{konst.} \sqrt{E_V - E}$$

....pro valenční pás :  $E \leq E_V$

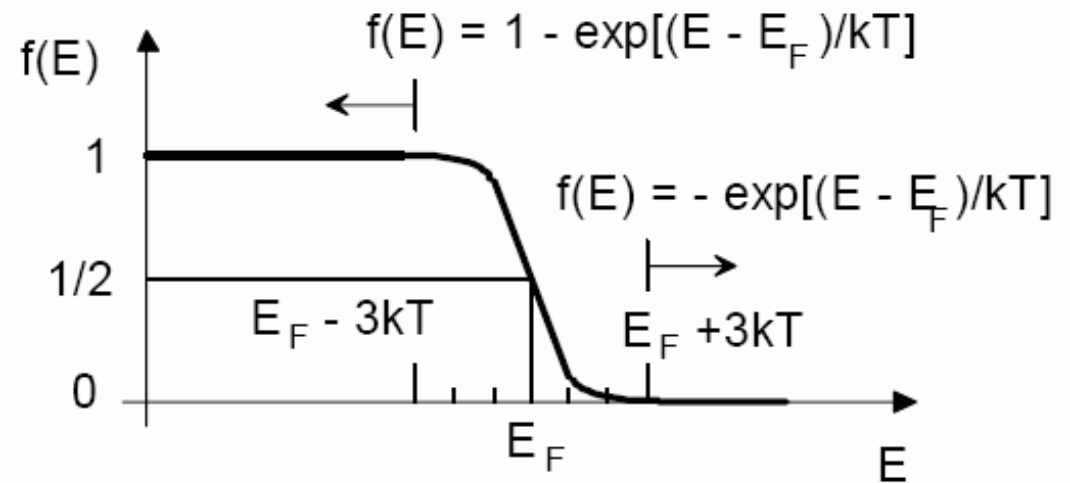
**Na hraně pásu je hustota stavů rovna nule.**

**Zvětšuje se s odmocninou „vzdálenosti“ od hrany pásu**

# Dvě možnosti určení velikosti Fermiho energie



a)



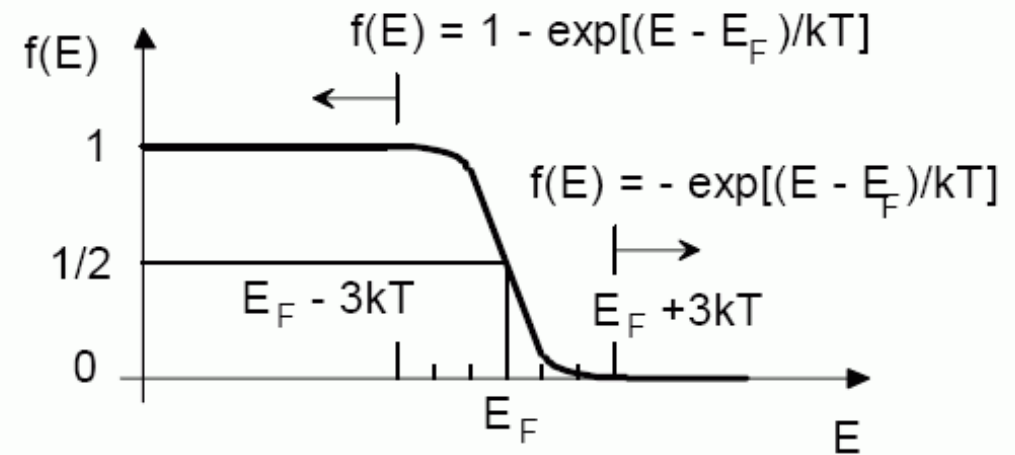
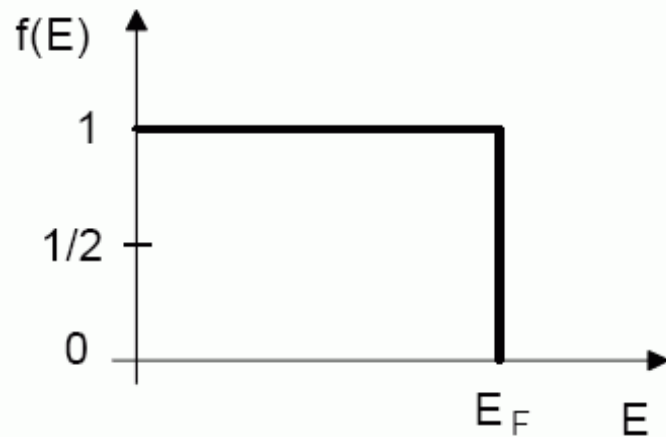
b)

a) Při teplotě  $T = 0\text{K}$  odděluje obsazené stavy od neobsazených

b) Při teplotě  $T > 0\text{K}$  je obsazena s pravděpodobností  $1/2$

## Určení průběhu F-D rozdělovací funkce

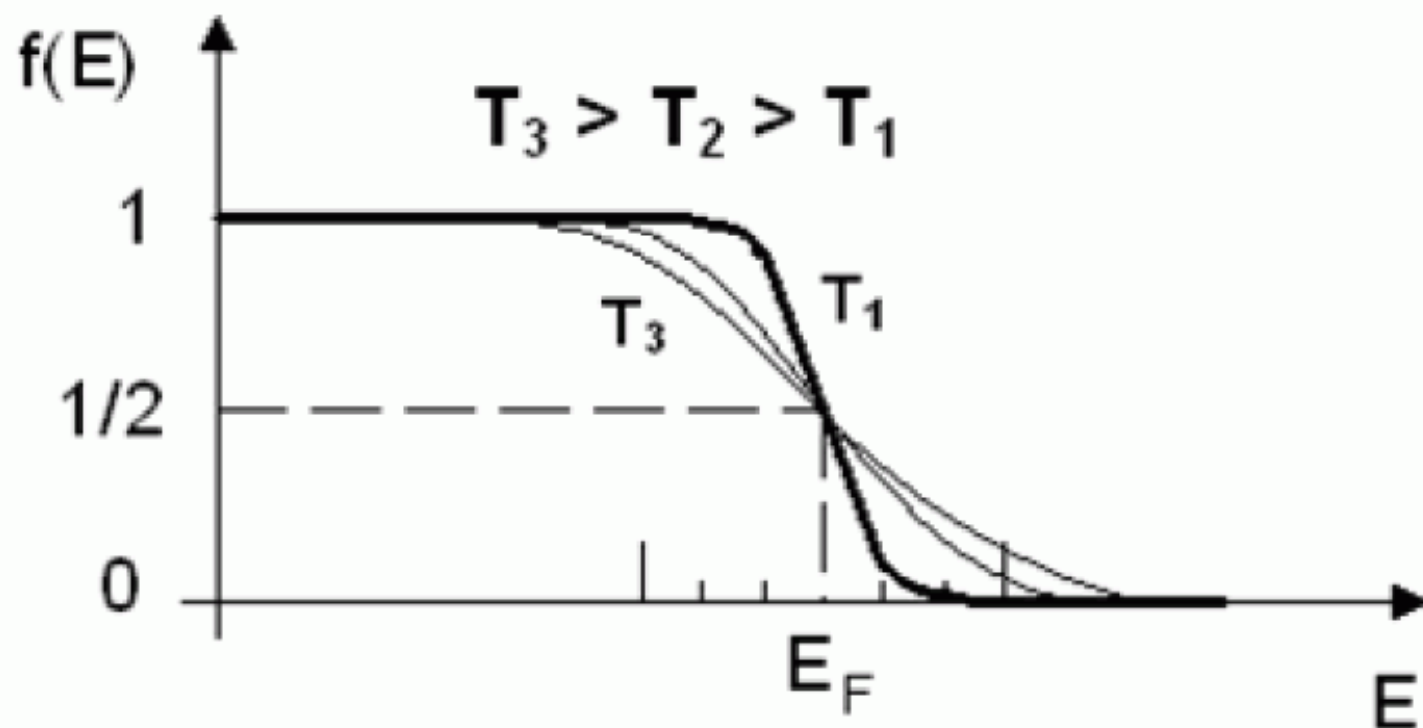
$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right]}$$



**T = 0K:** Pro  $E < E_F$  je výraz v exponentu ( $-\infty$ ) a hodnota funkce je  $f(E) = 1$   
Pro  $E > E_F$  je výraz v exponentu ( $+\infty$ ) a hodnota funkce je  $f(E) = 0$

**T > 0K:** Sejný průběh, pouze se zmenšuje sklon v okolí  $E_F$ .

## Teplotní závislost F-D rozdělovací funkce



Pravděpodobnost obsazení vyšších energetických stavů se s teplotou exponenciálně zvětšuje !



## Využití hustoty stavů a F-D rozdělovací funkce

Hustota stavů určuje počet stavů na příslušných energetických hladinách

F-D rozdělovací funkce pravděpodobnost jejich obsazení

Jejich vynásobením získáme obsazení energetických hladin v příslušných pásech

Poznámka:

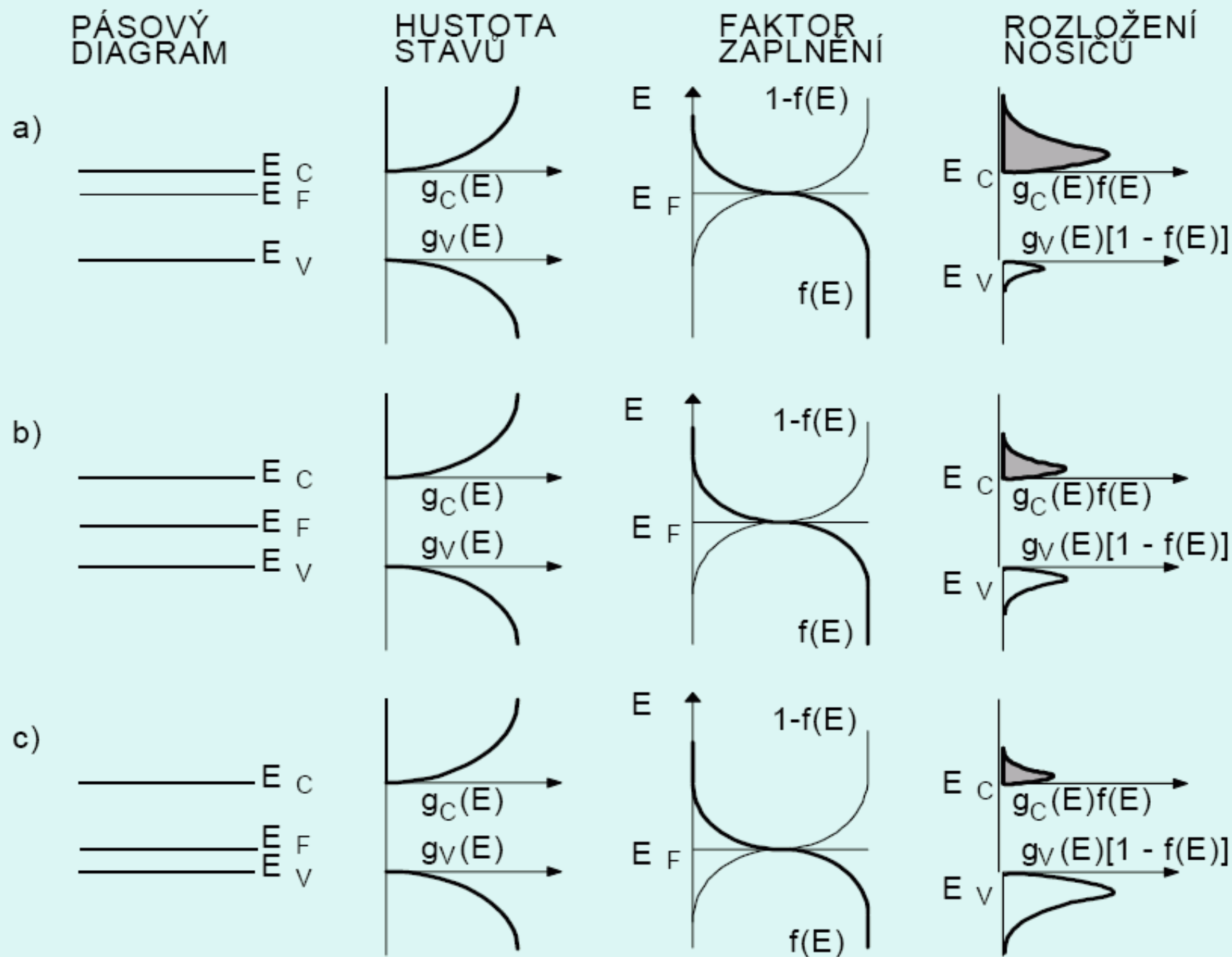
F-D rozdělovací funkce platí pro elektrony

Je-li stav obsazen elektronem, nemůže být obsazen dírou

Pravděpodobnost obsazení pro díry


$$1 - f(E)$$

# Obsazení energetických stavů v pásech



# Výpočet koncentrace elektronů a děr

Je třeba integrovat součin obou funkcí

$$n = \int_{E_C}^{E_{strop}} f(E) g_C(E) dE$$

$$p = \int_{E_{dno}}^{E_V} [1 - f(E)] g_V(E) dE$$

$$n = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^*}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{E_C}^{E_{strop}} \frac{\sqrt{E - E_C} dE}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]}$$

Konstanta před integrálem  
je z hustoty stavů

$$p = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^*}}{\pi^2 \hbar^3} \int_{E_{dno}}^{E_V} \frac{\exp[(E - E_F) / kT] \sqrt{E_V - E} dE}{1 + \exp[(E - E_F) / kT]}$$

## Výpočet koncentrace elektronů a děr

Po integraci a dalších úpravách:

$$n = N_C \exp [-(E_C - E_F)/kT] \longrightarrow \text{Podle polohy}$$
$$p = N_V \exp [-(E_F - E_C)/kT] \longrightarrow \text{Fermiho energie}$$

**$N_V, N_C$  - efektivní hustota stavů**

$$N_C = 2 \left[ \frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right]^{3/2} = \text{konst} \cdot T^{3/2}$$

$$N_V = 2 \left[ \frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right]^{3/2} = \text{konst} \cdot T^{3/2}$$

**Konstanta závislá na teplotě**

## Výpočet koncentrace elektronů a děr

Vlastní polovodič:  $E_F = E_i$  ;  $n = p = n_i$

$$n_i = N_C \exp [-(E_C - E_i)/kT] \quad ; \quad n_i = N_V \exp [-(E_i - E_V)/kT]$$

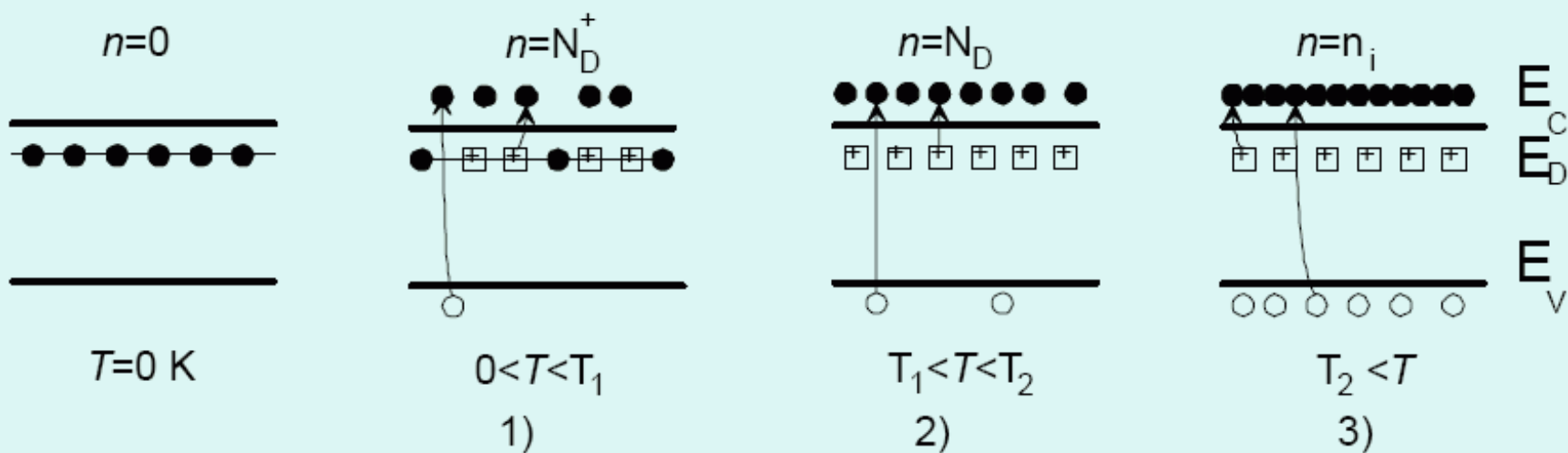
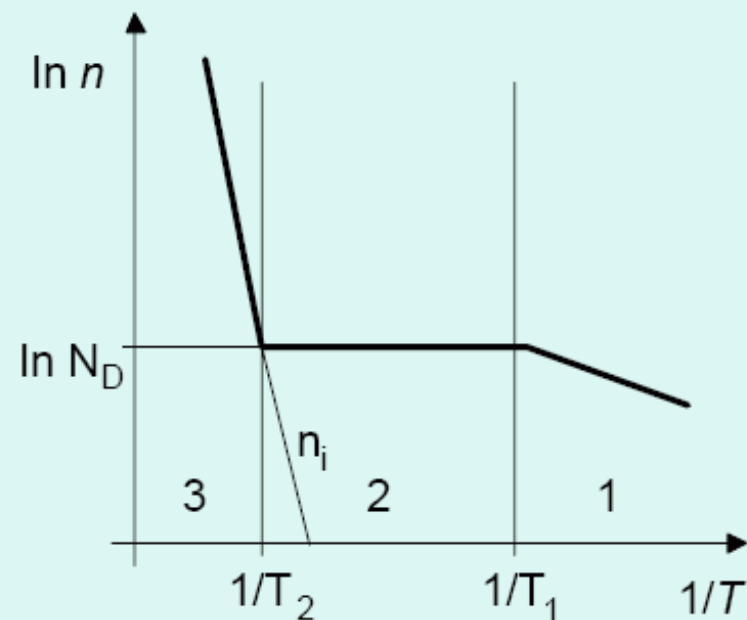
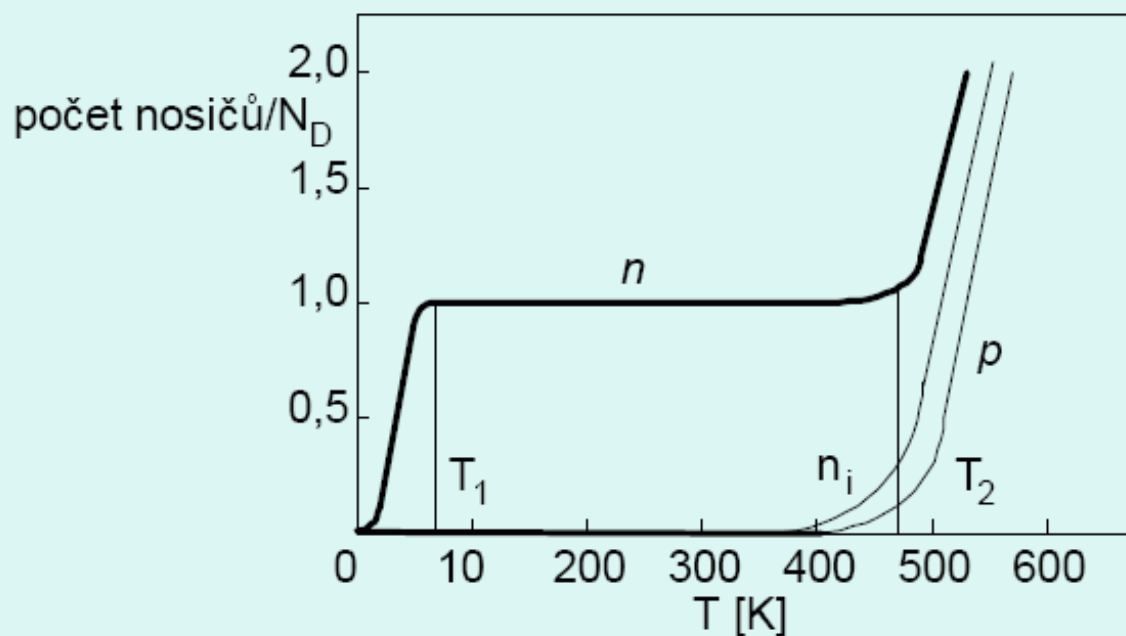
$$N_C \exp(-E_C/kT) = n_i \exp(-E_i/kT) \quad ; \quad N_V \exp(E_V/kT) = n_i \exp(E_i/kT)$$

$$n = n_i \exp [(E_F - E_i)/kT] \quad ; \quad p = n_i \exp [(E_i - E_F)/kT]$$

$$n_i^2 = N_C N_V \exp [-(E_C - E_V)/kT] = N_C N_V \exp(-E_G/kT)$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp(-E_G / 2kT) = \text{konst} \cdot T^{3/2} \cdot \exp(-E_G / 2kT)$$

# Teplotní závislost koncentrace nosičů



## Výpočet koncentrace elektronů a děr

Vlastní polovodič:  $E_F = E_i$  ;  $n = p = n_i$

$$n_i = N_C \exp [-(E_C - E_i)/kT] \quad ; \quad n_i = N_V \exp [-(E_i - E_V)/kT]$$

$$N_C \exp(-E_C/kT) = n_i \exp(-E_i/kT) \quad ; \quad N_V \exp(E_V/kT) = n_i \exp(E_i/kT)$$

$$n = N_C \exp [-(E_C - E_F)/kT] \quad p = N_V \exp [-(E_F - E_V)/kT]$$

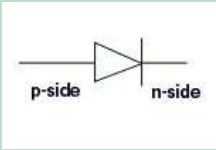
$$n = n_i \exp [(E_F - E_i)/kT] \quad ; \quad p = n_i \exp [(E_i - E_F)/kT]$$

Koncentraci nosičů lze určit také z intrinzické koncentrace a posunu Fermiho hladiny oproti středu pásu

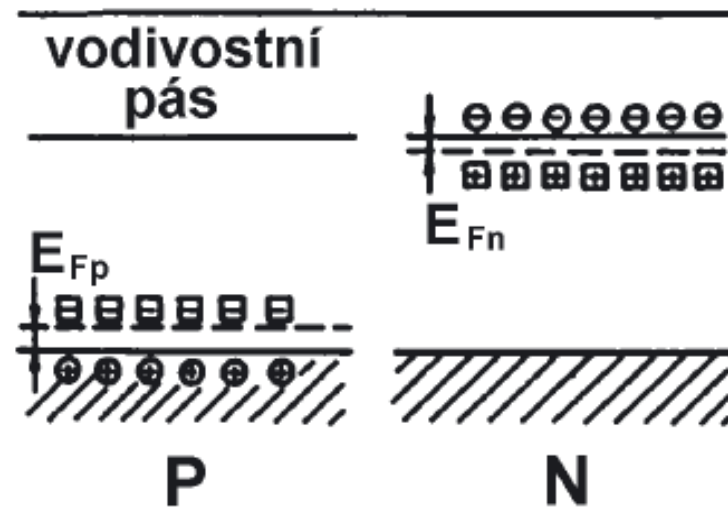
**Pozor: posun Fermiho hladiny je dán koncentrací příměsí !!!!!**

	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	
	<b>B</b> 5 10.81 Boron [B]	<b>C</b> 6 12.011 Carbon [C]	<b>N</b> 7 14.007 Nitrogen [N]	<b>O</b> 8 15.999 Oxygen [O]	<b>F</b> 9 18.998 Fluorine [F]	<b>Ne</b> 10 20.179 Neon [Ne]	
	<b>Al</b> 13 26.9815 Aluminum [Al]	<b>Si</b> 14 28.0855 Silicon [Si]	<b>P</b> 15 30.9738 Phosphorus [P]	<b>S</b> 16 32.06 Sulfur [S]	<b>Cl</b> 17 35.453 Chlorine [Cl]	<b>Ar</b> 18 39.948 Argon [Ar]	
II B	<b>Zn</b> 30 65.4 Zinc [Zn]	<b>Ga</b> 31 69.7 Gallium [Ga]	<b>Ge</b> 32 72.59 Germanium [Ge]	<b>As</b> 33 74.9216 Arsenic [As]	<b>Se</b> 34 78.96 Selenium [Se]	<b>Br</b> 35 79.904 Bromine [Br]	<b>Kr</b> 36 83.80 Krypton [Kr]
	<b>Cd</b> 48 112.41 Cadmium [Cd]	<b>In</b> 49 114.82 Indium [In]	<b>Sn</b> 50 118.69 Tin [Sn]	<b>Sb</b> 51 121.75 Antimony [Sb]	<b>Te</b> 52 127.60 Tellurium [Te]	<b>I</b> 53 126.905 Iodine [I]	<b>Xe</b> 54 131.29 Xenon [Xe]
	<b>Hg</b> 80 200.59 Mercury [Hg]	<b>Tl</b> 81 204.4 Thallium [Tl]	<b>Pb</b> 82 207.21 Lead [Pb]	<b>Bi</b> 83 208.9804 Bismuth [Bi]	<b>Po</b> 84 209 Polonium [Po]	<b>At</b> 85 210 Astatine [At]	<b>Rn</b> 86 222 Radon [Rn]

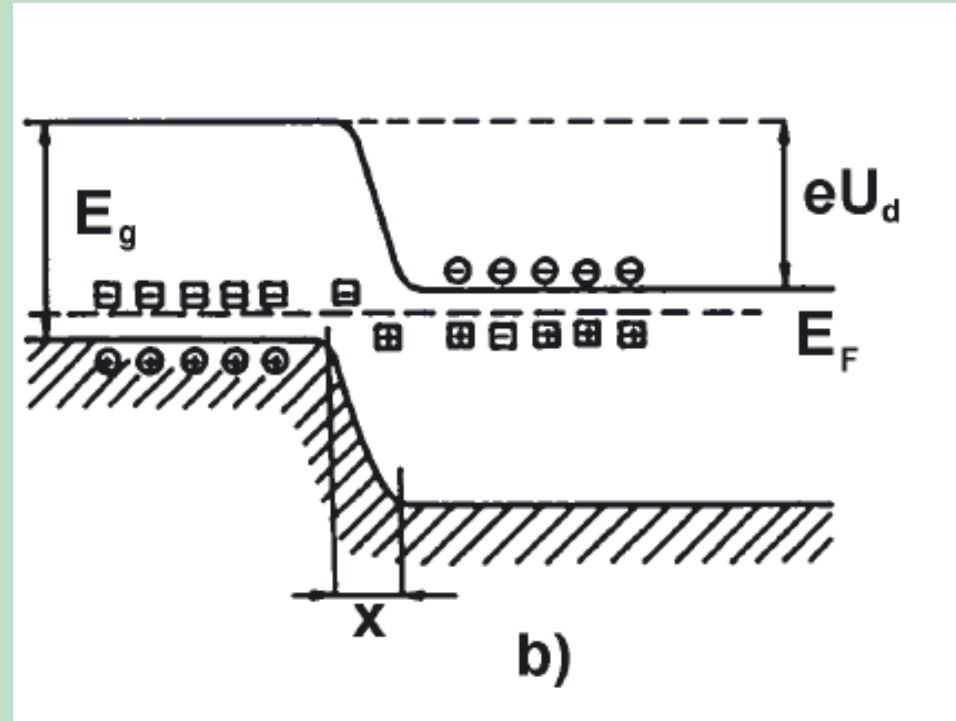




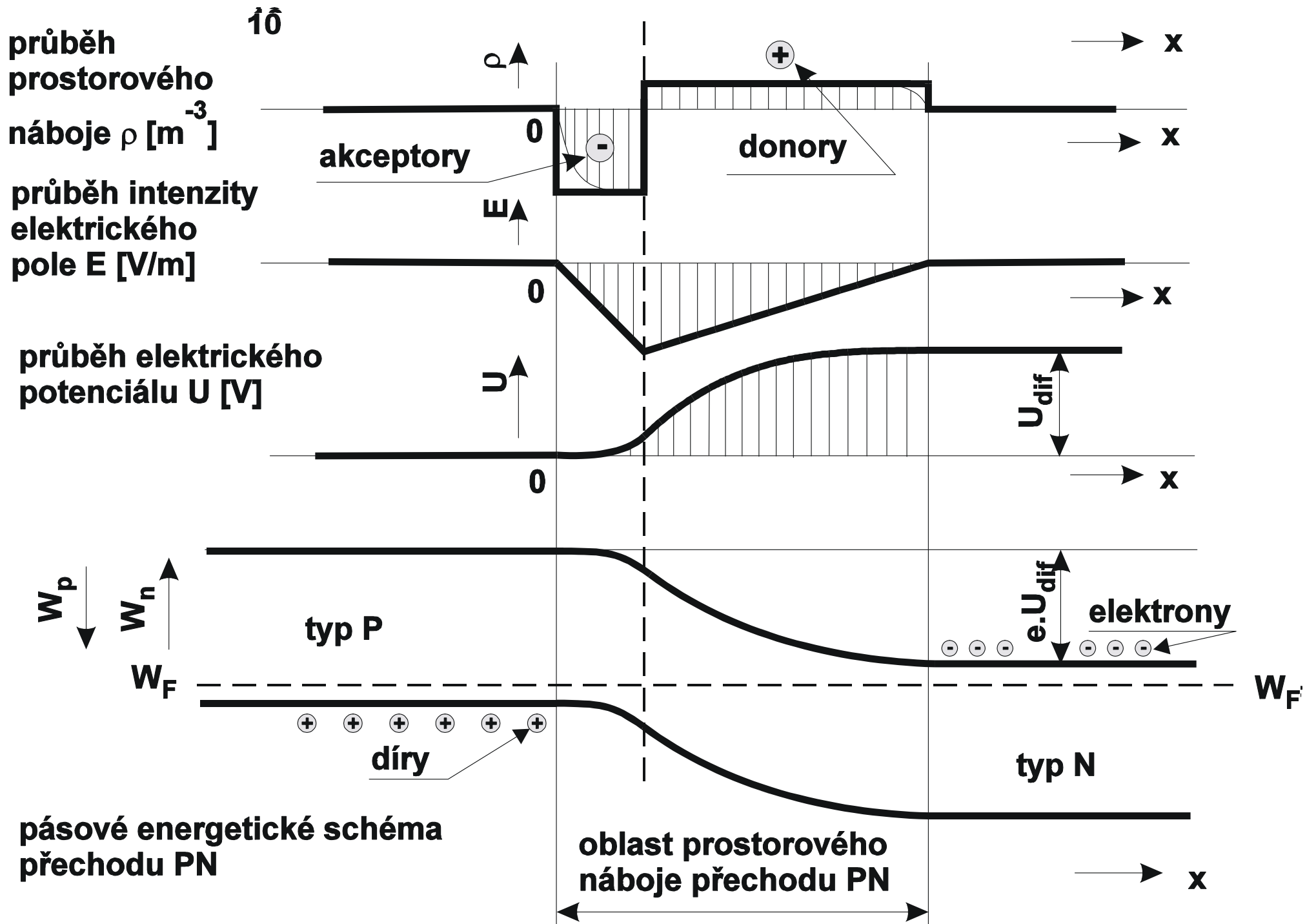
# PN přechod

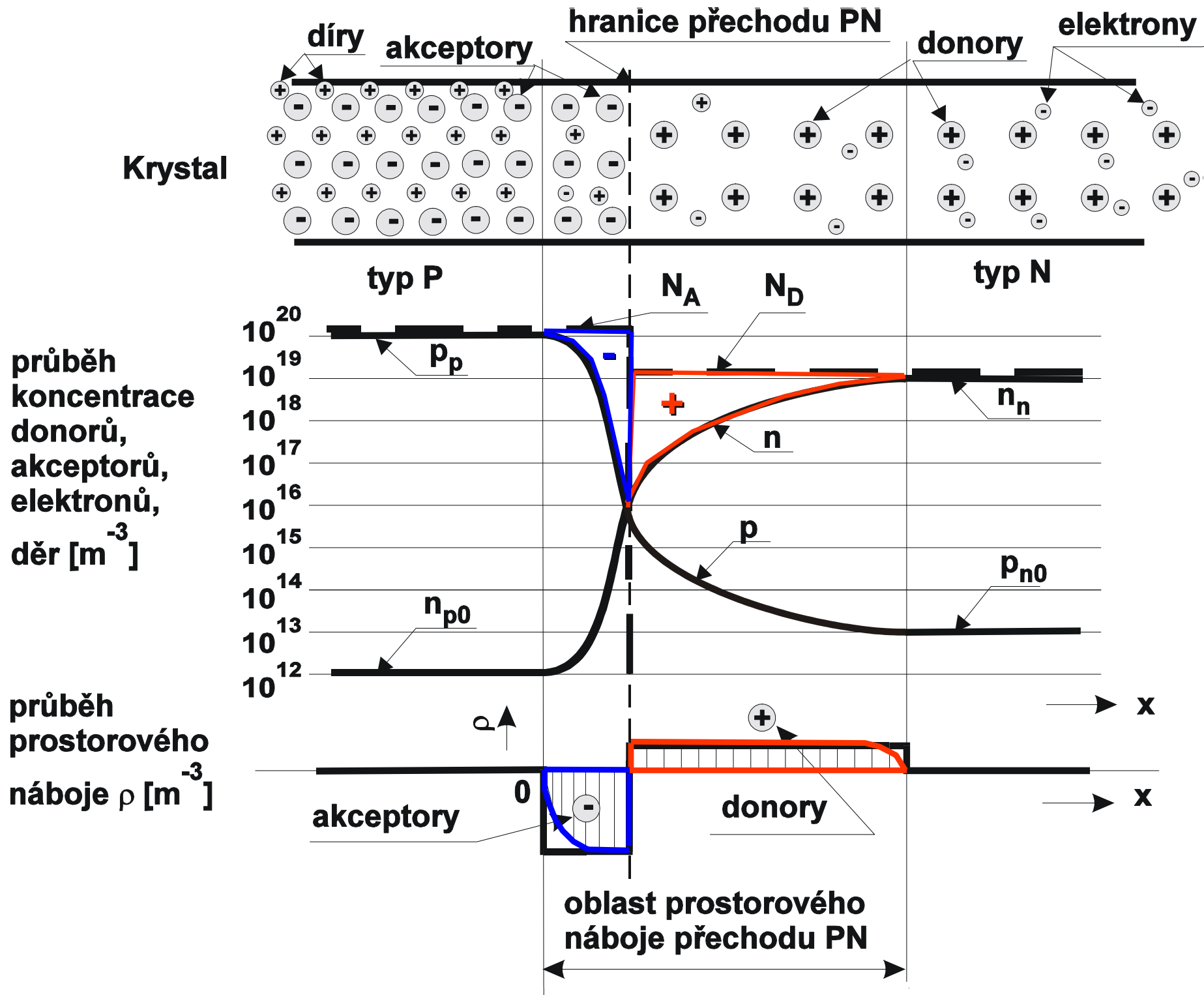


a)



b)





<http://www.zesilovace.cz/view.php?cisloclanku=2003052314>