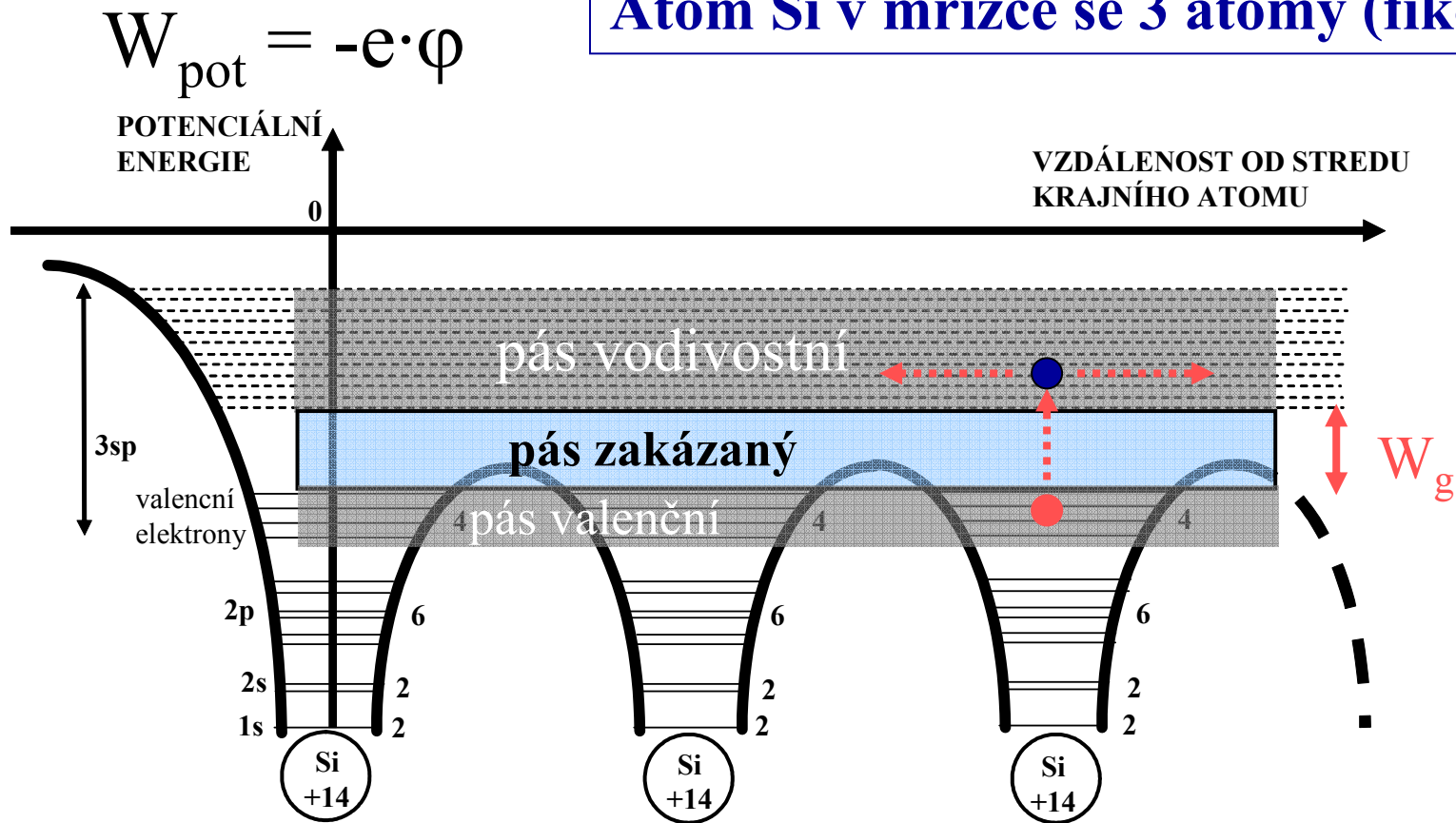


ELEKTRONIKA



2. přednáška 2005

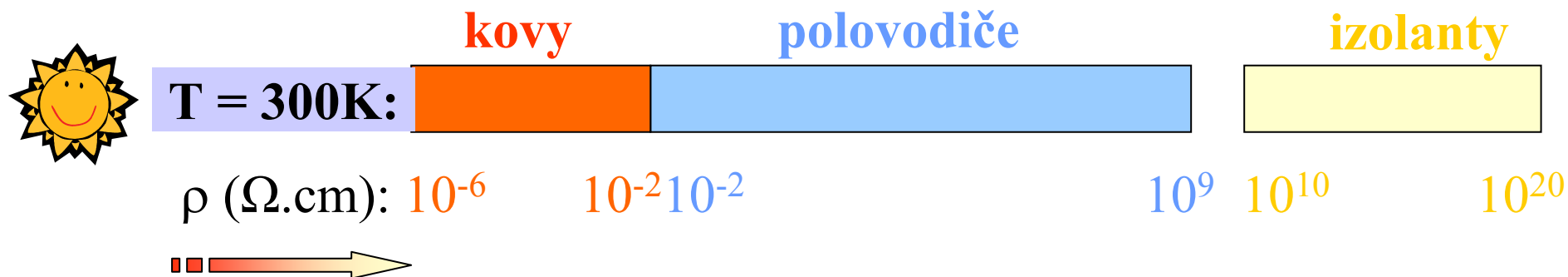
Atom Si v mřížce se 3 atomy (fikce)

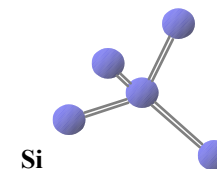


Pravděpodobnost obsazení vodivostního pásu exponenciálně klesá s rostoucí hodnotou šířky zakázaného pásu W_g .

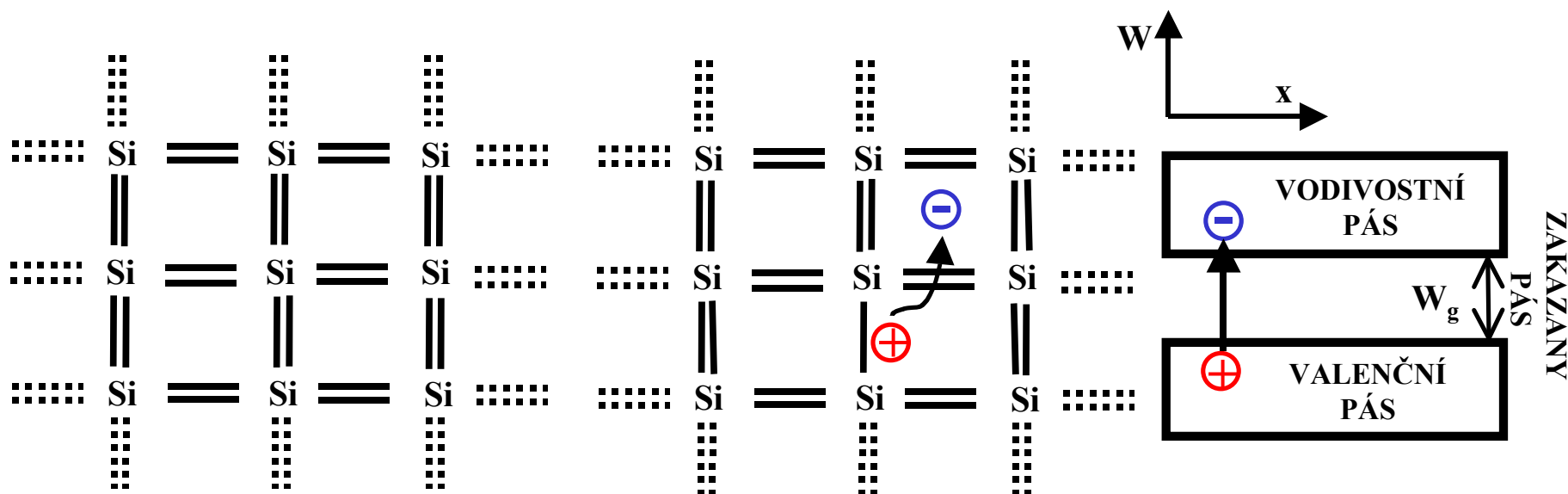
Polovodiče

jsou *elektronové vodiče* s měrnou elektr. vodivostí σ (odporem ρ)
silně závislou na teplotě a koncentraci příměsí,
a to v rozsahu více než 10 řádů
mezi izolanty a kovy.

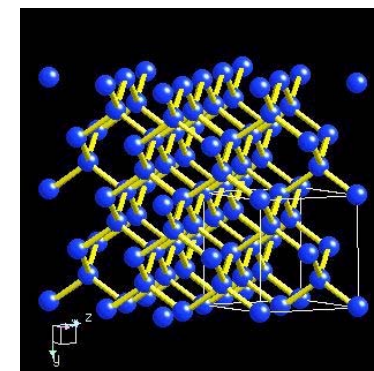




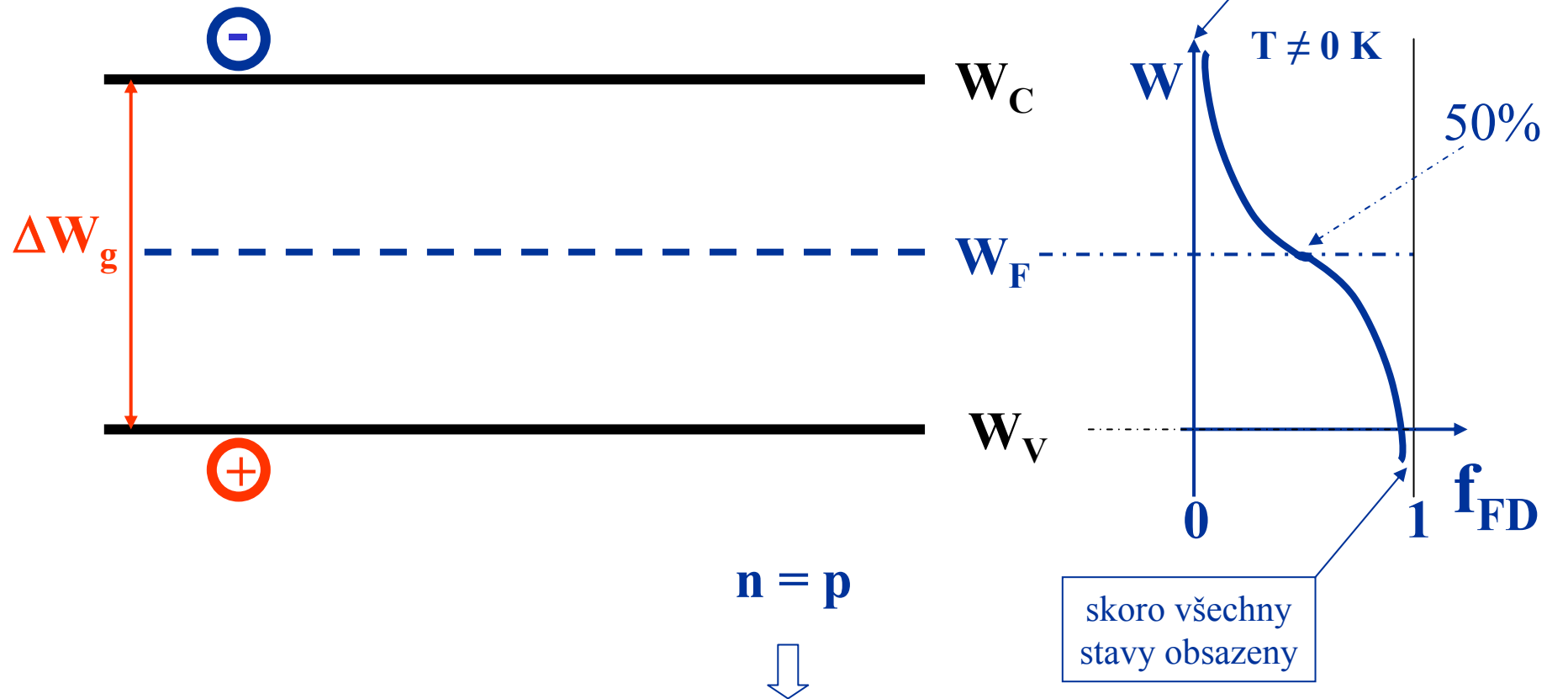
VLASTNÍ VODIVOST - VLASTNÍ POLOVODIČ



c)

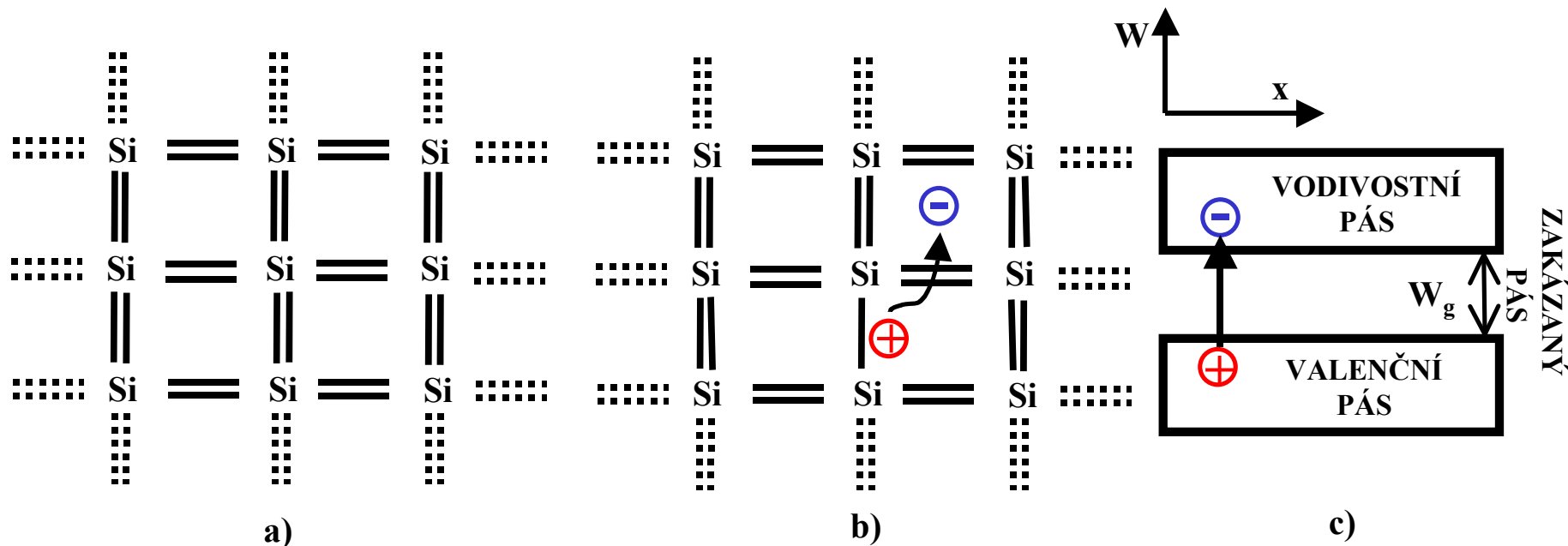


VLASTNÍ POLOVODIČ



Fermiho hladina vlastního polovodiče leží uprostřed zakázaného pásu.

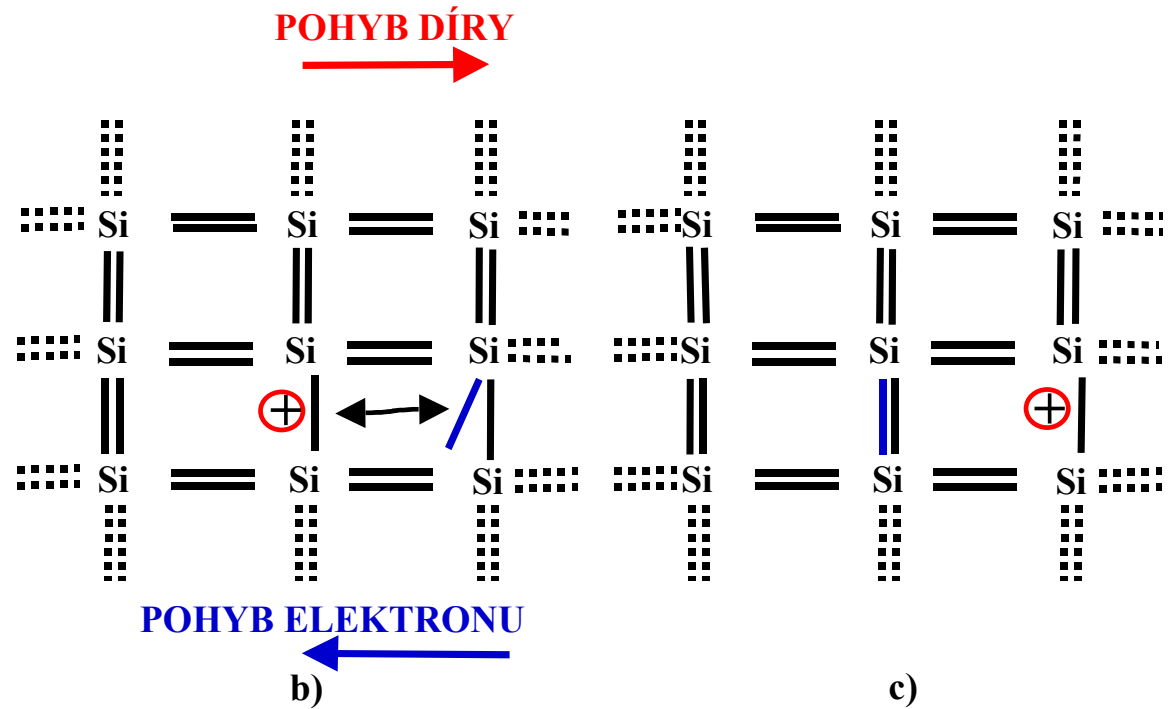
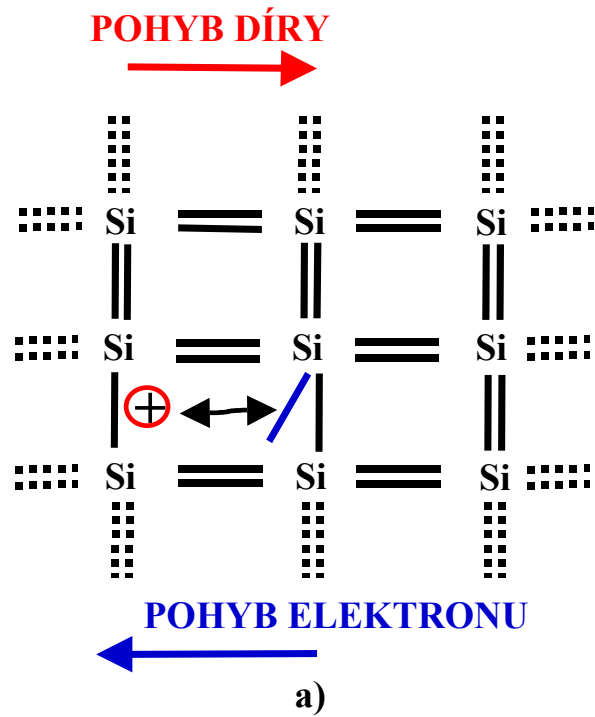
VLASTNÍ VODIVOST - VLASTNÍ POLOVODIČ



Energie na vytvoření páru elektron-díra je velká: $W_{gSi} \approx 1.12 \text{ eV}$ při $T = 300\text{K}$.

- malá vlastní vodivost do $T \approx 300^\circ\text{C}$. → **prakticky nevyužitelné**.
- velká vlastní vodivost nad $T \approx 300^\circ\text{C}$ (přetížení součástek) → **problém**.

ELEKTRONY A DÍRY V POLOVODIČI



c)



B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As

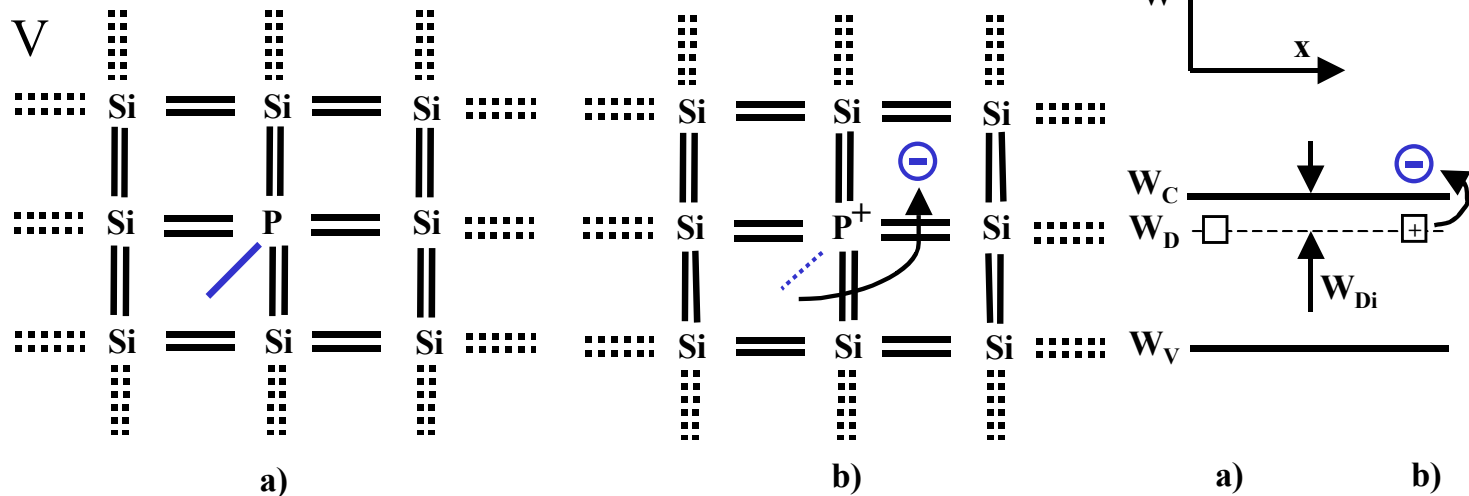
III

IV

V

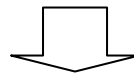
TYP N

NEVLASTNÍ POLOVODIČ



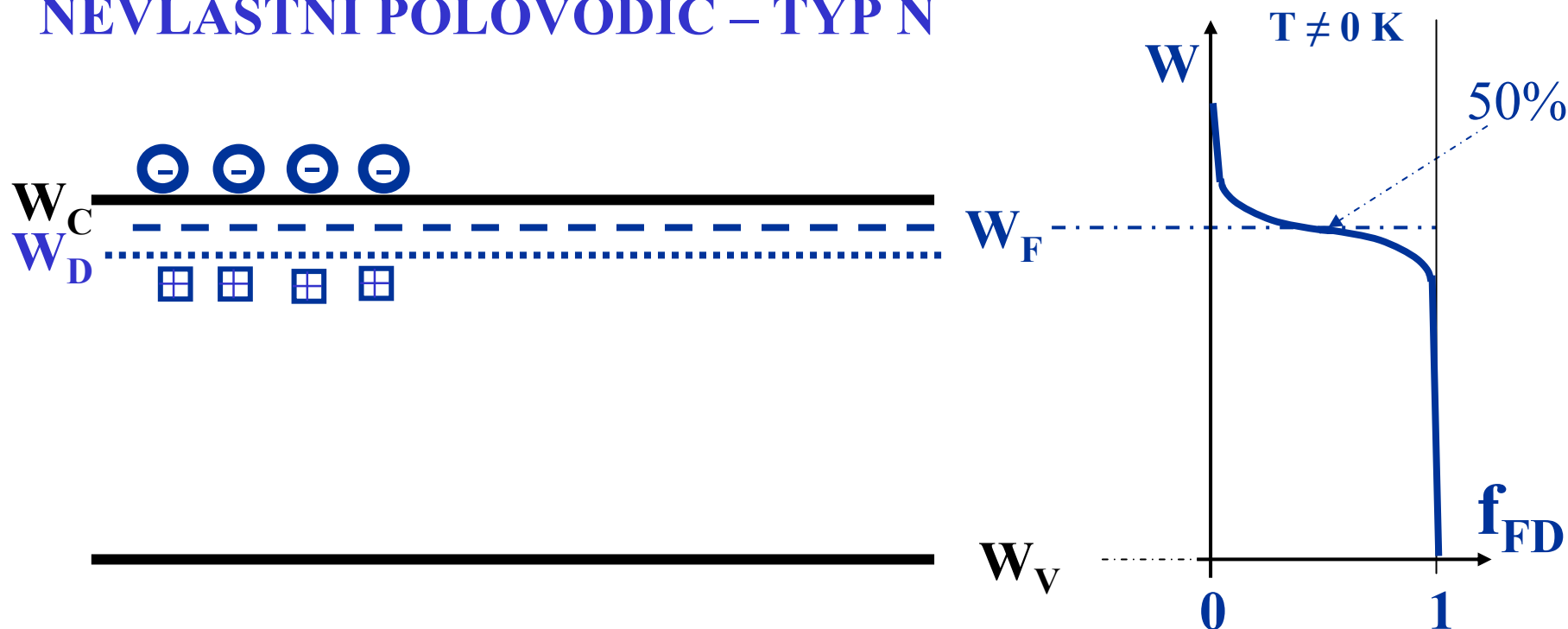
Donor = dárce volného elektronu

$W_{Di} \ll W_g$, $W_p \approx 45 \text{ meV} \rightarrow$ tepelná energie kmitů mřížky při pokojové teplotě stačí na ionizaci!



Při pokojové teplotě všechny příměsi ionizovány!
 Koncentrace volných elektronů = koncentrace volných donorů:
 $n = N_D \Rightarrow$ **Vodivost $\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n$ určena hodnotou N_D (=výrobce)!**

NEVLASTNÍ POLOVODIČ – TYP N

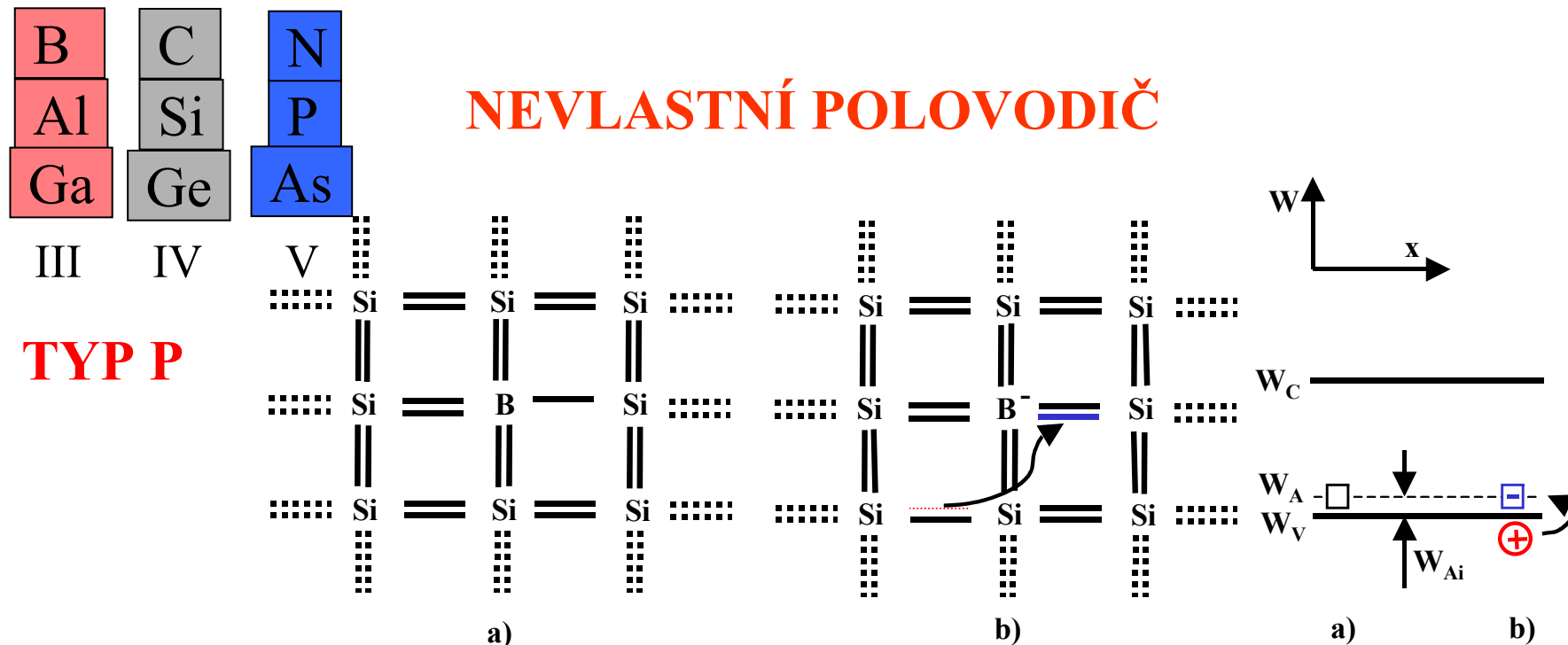


$$n = N_D$$

Fermiho hladina W_F polovodiče typu N leží nad hladinou donorů.

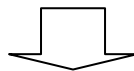
S rostoucí N_D se W_F posouvá k W_C .

Je-li $W_F \geq W_C$, je polovodič degenerovaný (N^+).



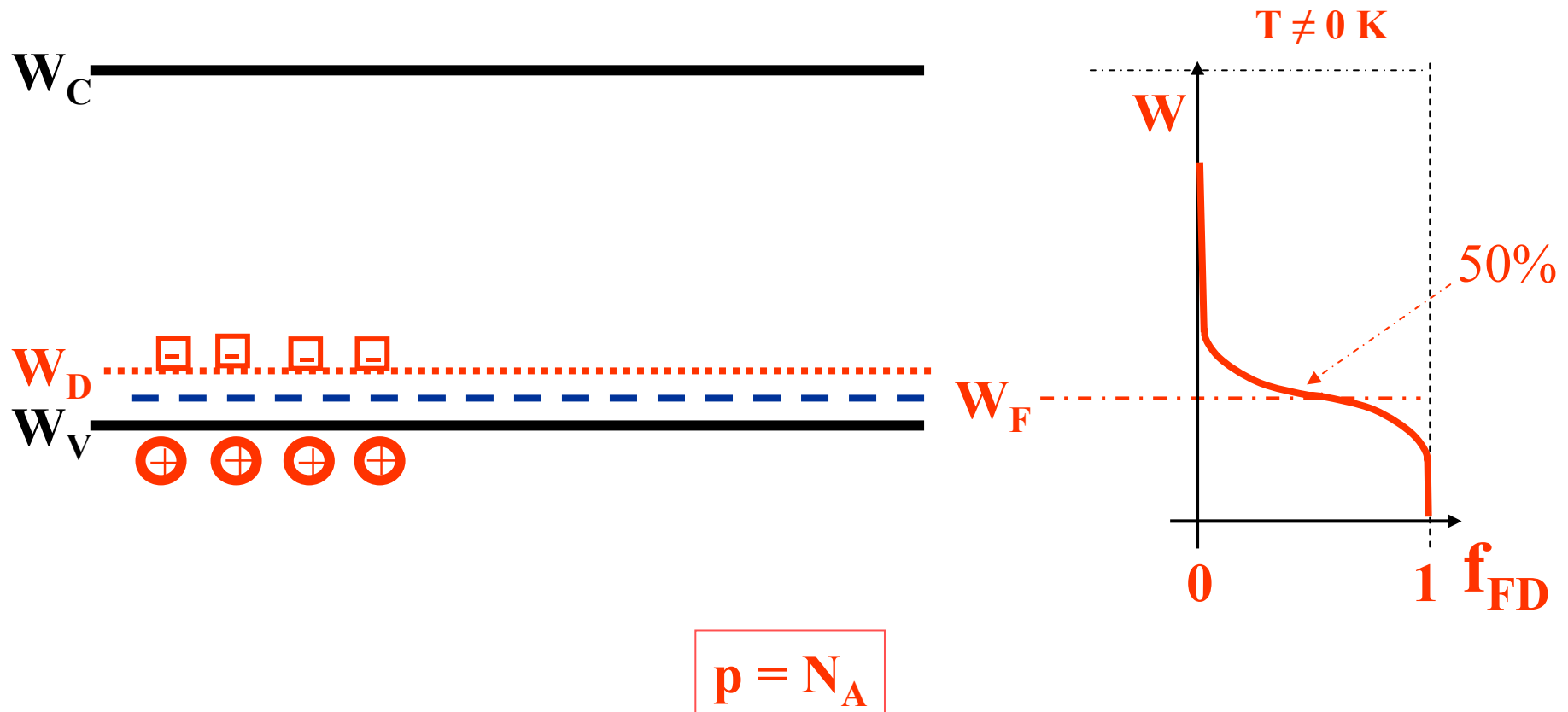
Akceptor = příjemce valenčního elektronu

$W_{Ai} \ll W_g$, $W_B \approx 45 \text{ meV} \rightarrow$ tepelná energie kmitů mřížky stačí
při pokojové teplotě na ionizaci!



Při pokojové teplotě všechny příměsi ionizovány!
 Koncentrace volných děr = koncentrace volných akceptorů:
 $p = N_A \Rightarrow$ Vodivost $\sigma = e \cdot n \cdot \mu_p$ určena hodnotou N_D (= výrobcem)!

NEVLASTNÍ POLOVODIČ – TYP P

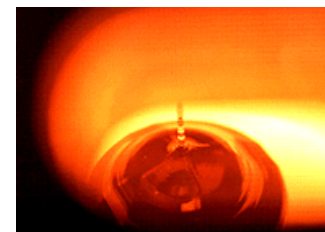
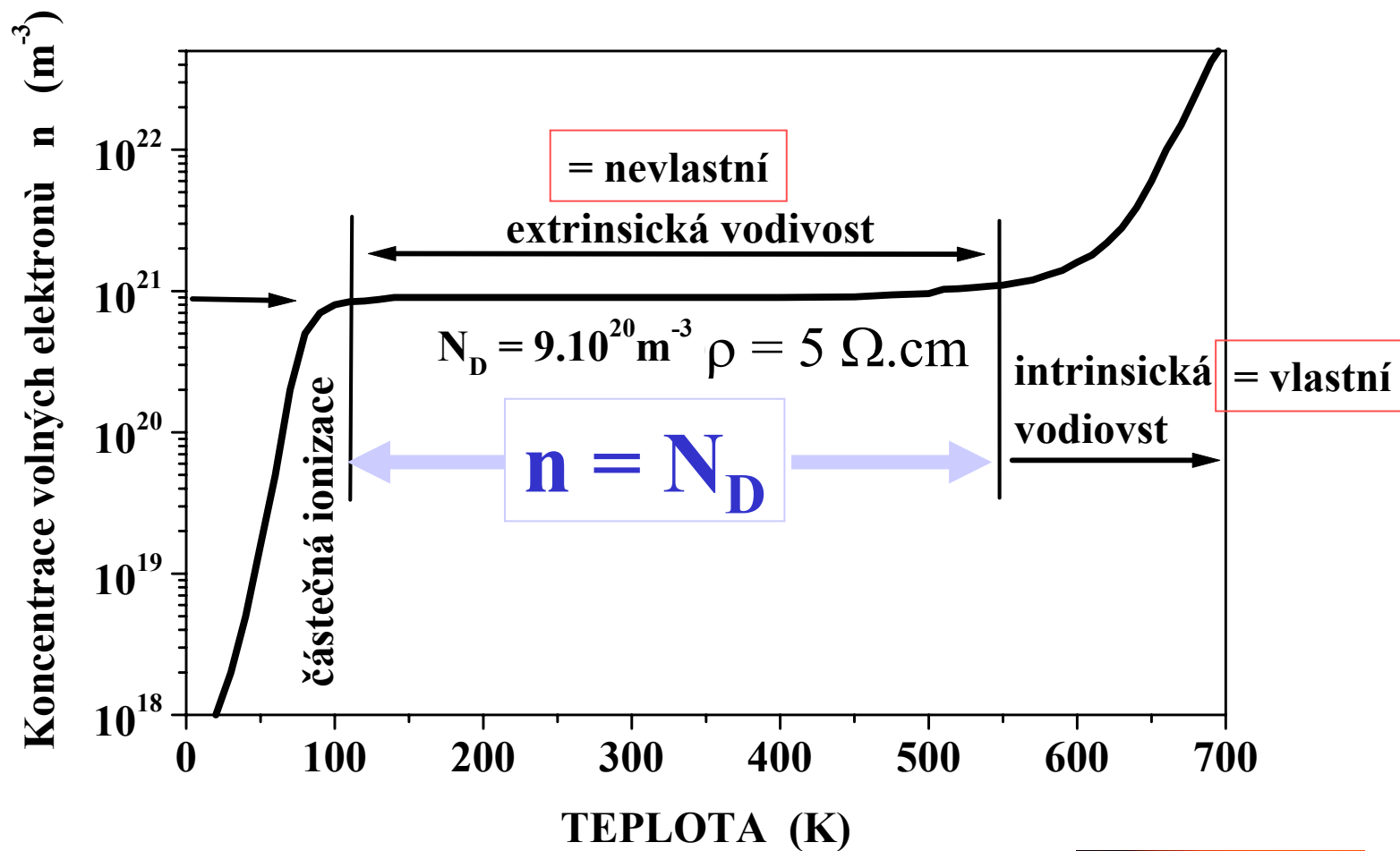


Fermiho hladina W_F polovodiče typu P leží pod hladinou akceptorů.

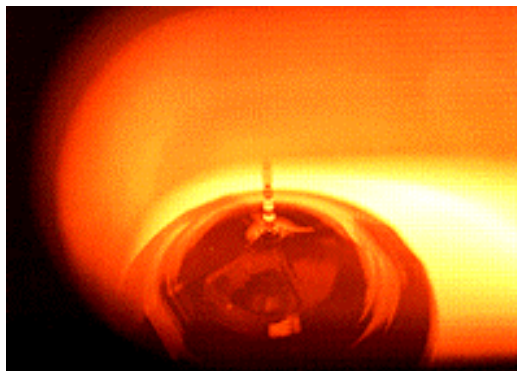
S rostoucí N_A se W_F posouvá k W_V .

Je-li $W_F \leq W_V$, je polovodič degenerovaný (P^+).

Koncentrace elektronů v polovodiči typu N – teplotní závislost



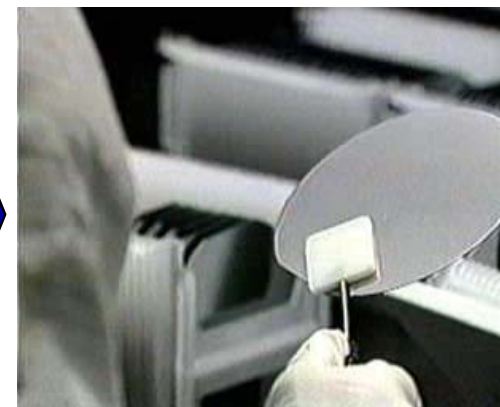
NEVLASTNÍ POLOVODIČ



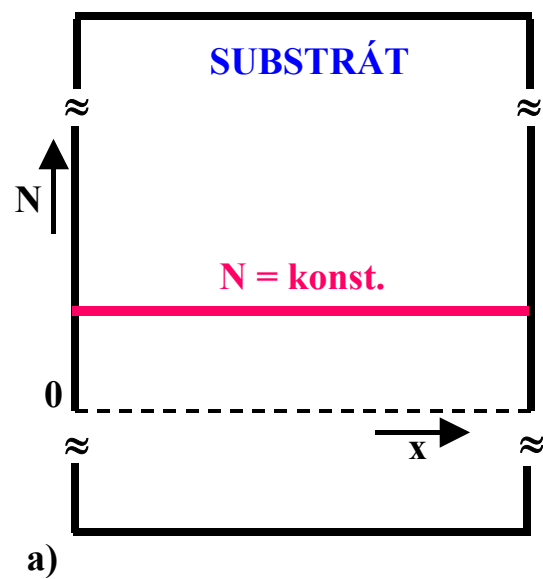
Tažení monokrystalu



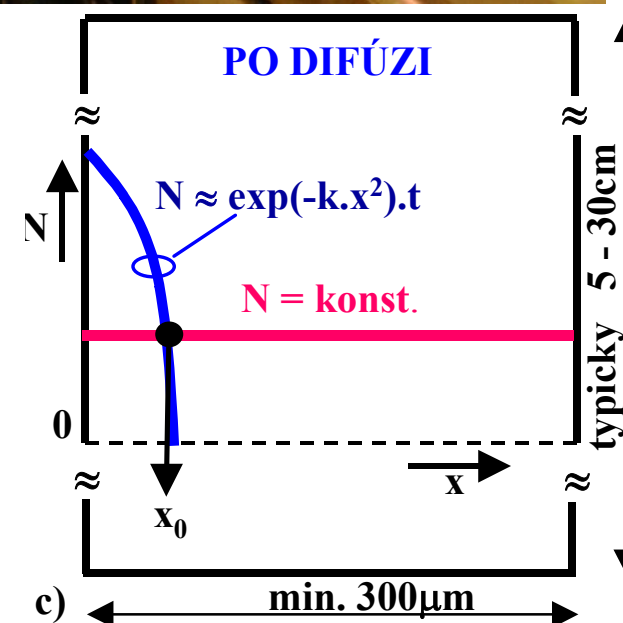
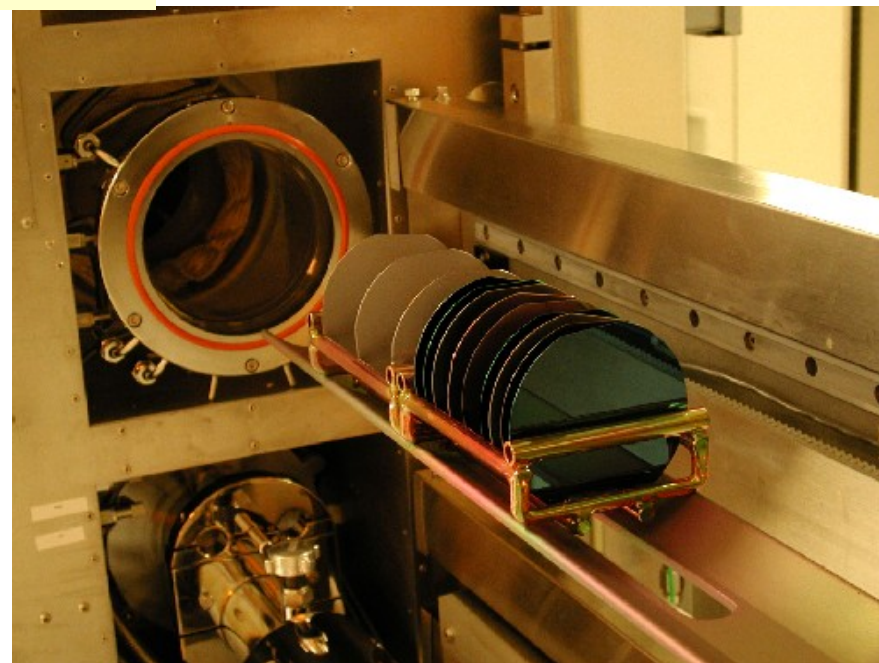
Řezání destiček



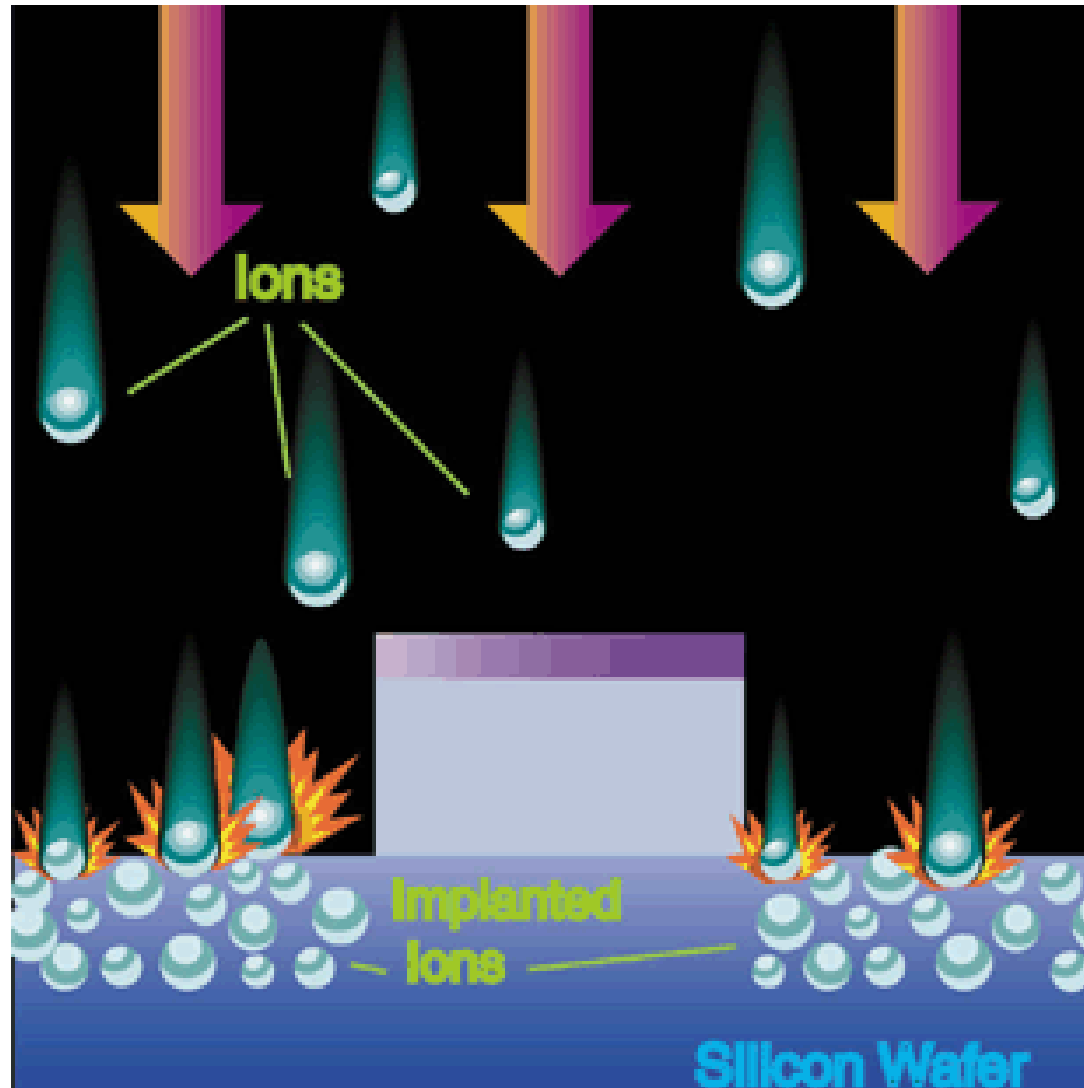
Destička s povrchovou úpravou
a definovanými parametry



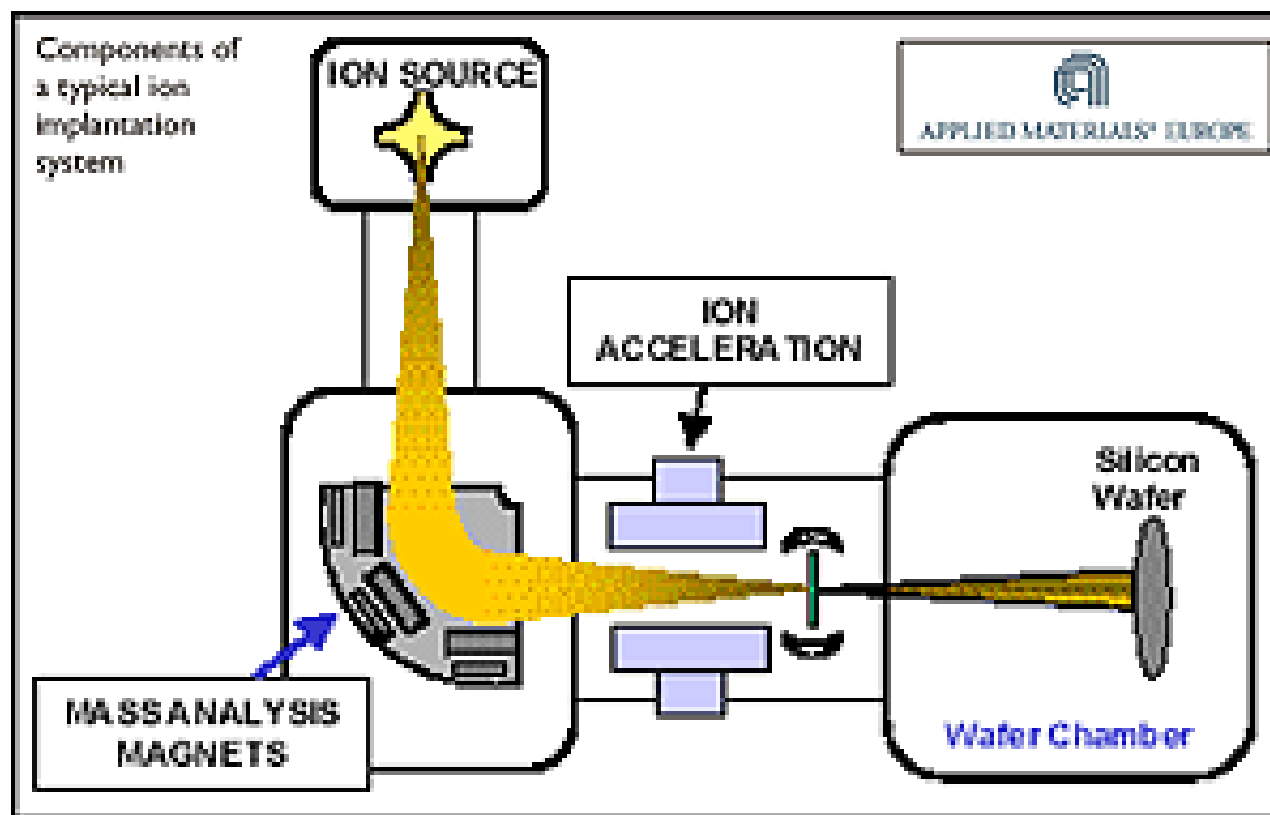
Difúze



Iontová implantace



Iontová implantace



Velmi přesná a reprodukovatelná metoda vytváření vrstev s příměsmi.

Bór (P), hliník (Al), arsen (N), fosfor (N).

Vysokoenergetický implantátor TANDETRON



RBS, PIXE, PIGE,...

Implantace

Ústav jaderné fyziky AV ČR – Řež u Prahy

HIGH VOLTAGE ENGINEERING

Particle Accelerator Systems for the scientific, educational and industrial research communities

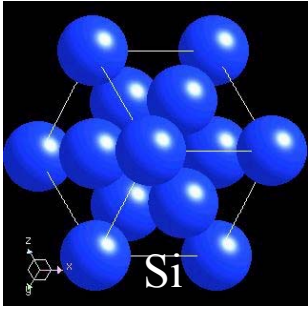


Transport nosičů náboje

(vedení proudu)

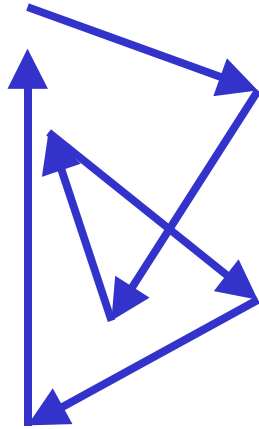
DRIFT

(= unášení v elektrickém poli)



DRIFT nosičů náboje

$$E = 0$$



Tepelná energie: $W_T = 3/2kT$

Potenciální energie: $W_K = 1/2m_n v^2$

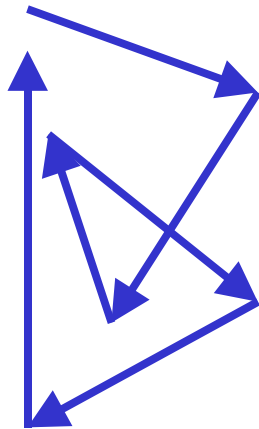
$$W_K = W_T$$

Tepelná rychlost: $v_T = \sqrt{3kT/m_n}$

(maximální rychlost elektronu $v_T \approx 10^5$ m/s)

DRIFT nosičů náboje

$E = 0$



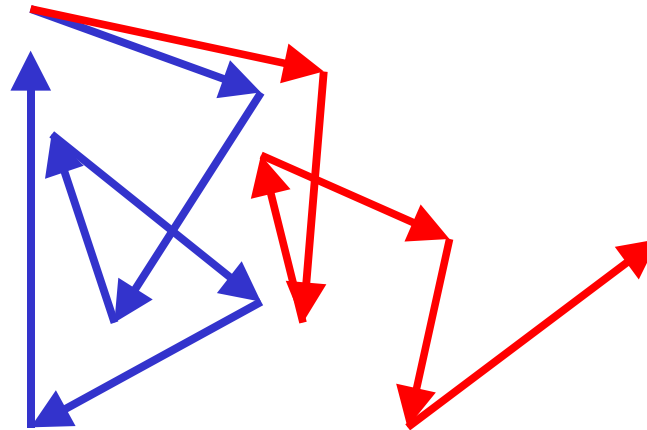
$$W_T = 3/2 kT, W_K = 1/2 m_n v^2$$

$$W_K = W_T$$

$$v_T = \sqrt{3kT/m_n}$$

$E \neq 0$

- ← +



$$v_n = -\mu_n \cdot E$$

$$\mu_n = e \cdot \tau_n / m_n$$

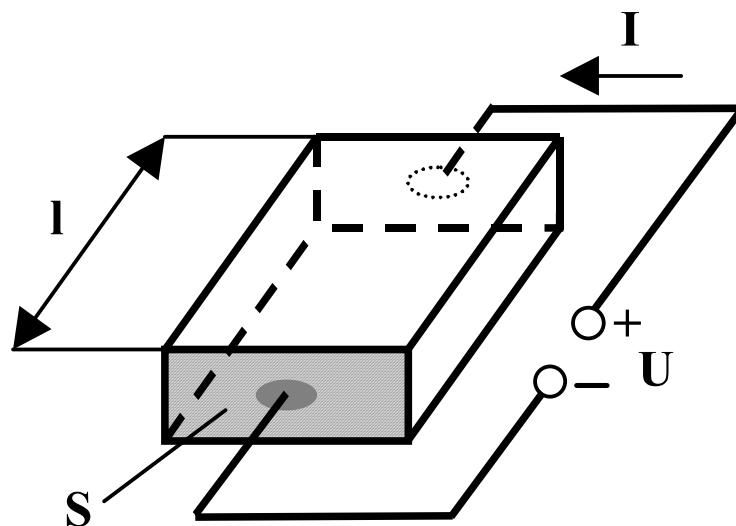
$$J = -e \cdot n \cdot v_n = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot E = \sigma_n \cdot E$$

Ohmův zákon

$$v_n = -\mu_n \cdot E$$

$$J = -e \cdot n \cdot v_n = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot E = \sigma_n \cdot E$$

$$\sigma_n = e \cdot n \cdot \mu_n$$

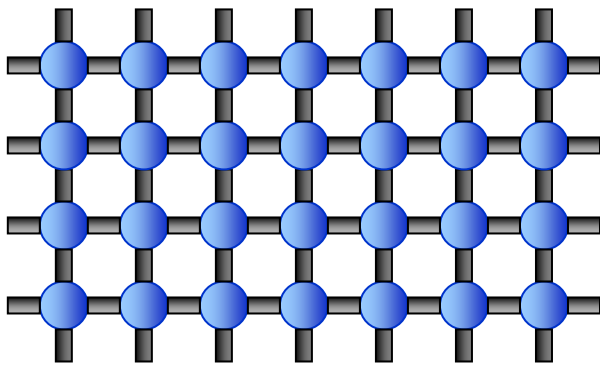


$$I = J \cdot S = \sigma_n \cdot E \cdot S = \frac{U \cdot S}{l \cdot \rho_n} = \frac{U}{R}$$

Pohyblivost nosičů náboje μ ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)

Poloměr atomu:
 $1.46 \text{ \AA} = 1.46 \cdot 10^{-10} \text{ nm}$

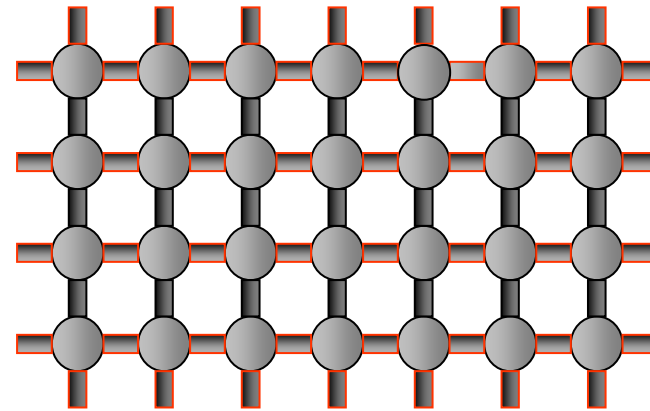
Si



$\Delta \approx 4\%$

Poloměr atomu:
 $1.52 \text{ \AA} = 1.52 \cdot 10^{-10} \text{ nm}$

Ge



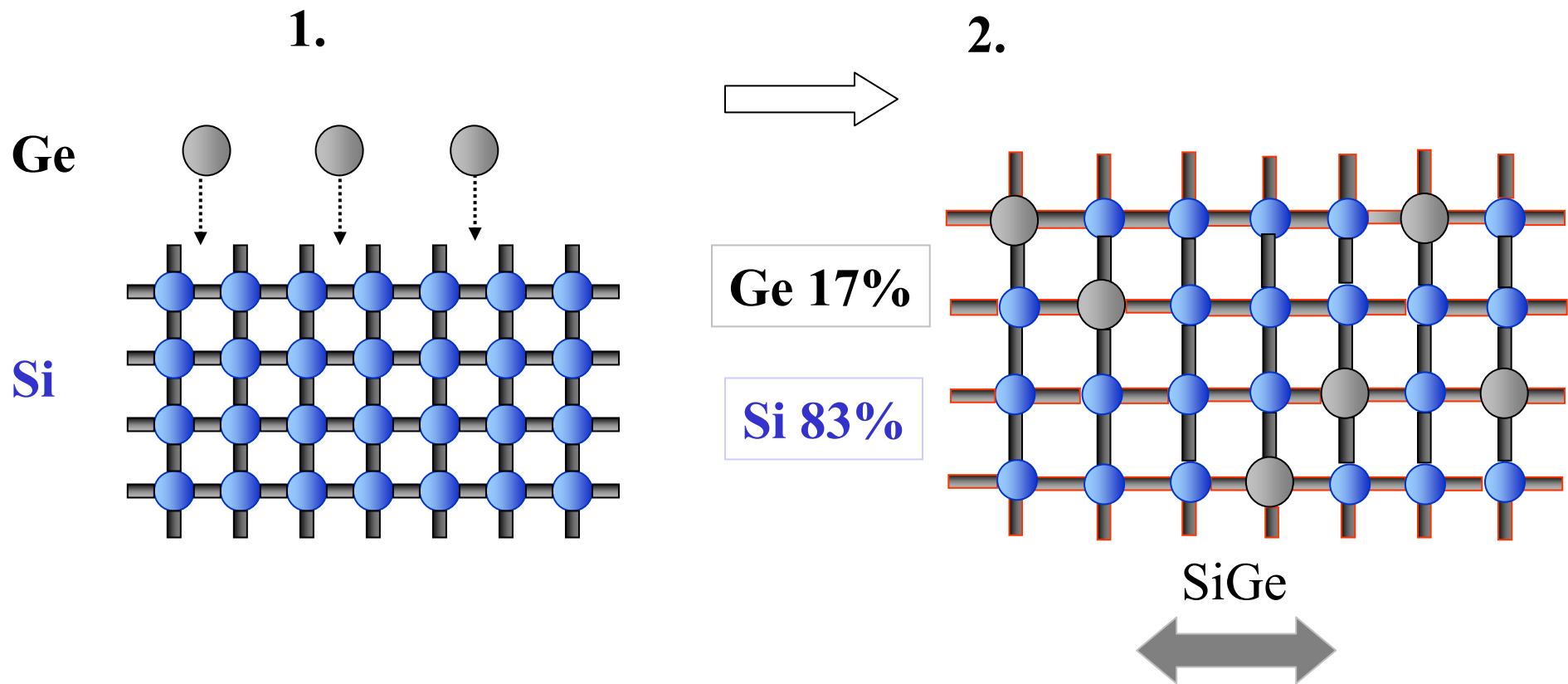
Si: $\mu_{n\max} \approx 1450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
 $\mu_{p\max} \approx 450 \text{ cm}^2/\text{V.s}$

$\sim 3\times$

Ge: $\mu_{n\max} \approx 3900 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
 $\mu_{p\max} \approx 1900 \text{ cm}^2/\text{V.s}$

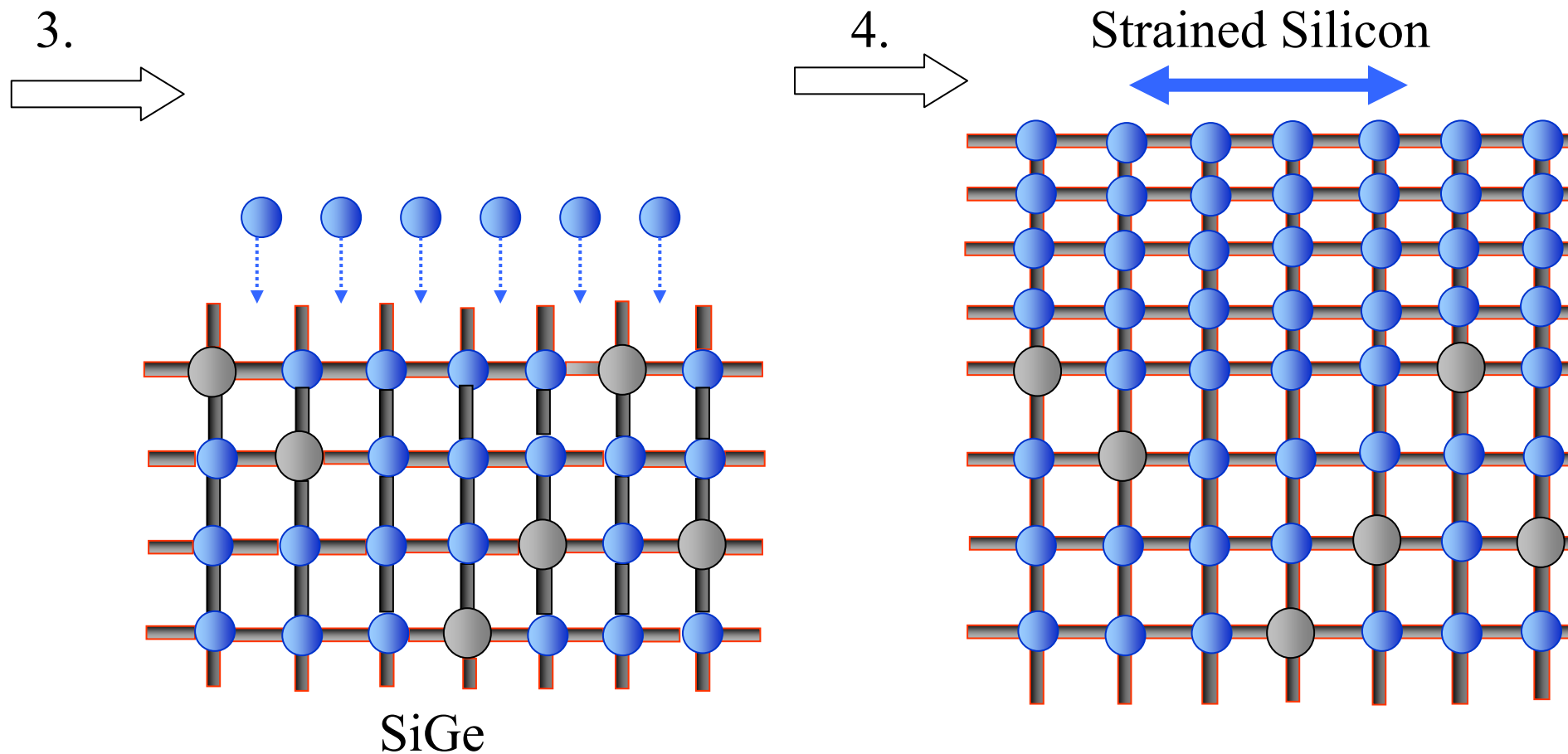
Atomy jsou v Ge „více od sebe“ \Rightarrow elektrony se pohybují rychleji.

Metoda zvýšení pohyblivosti μ ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)



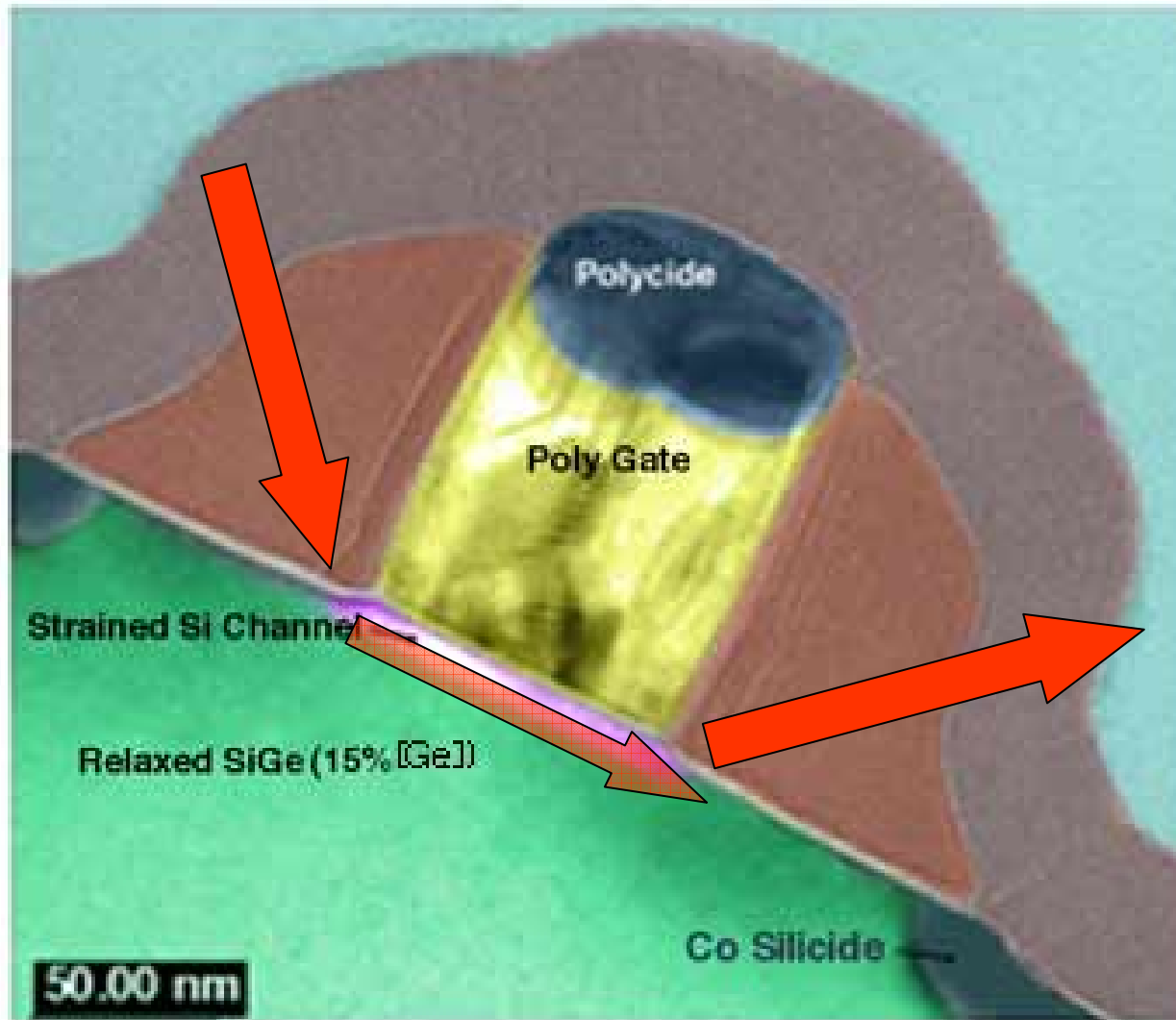
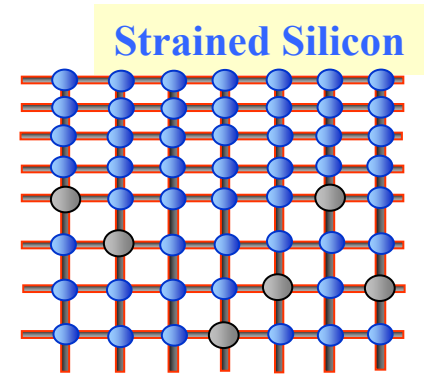
Atomy jsou v SiGe „více od sebe“ \Rightarrow elektrony se pohybují rychleji.
Aplikovatelné v technologiích Si integrovaných obvodů.

Metoda zvýšení pohyblivosti μ ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)



Atomy jsou v Si „více od sebe“ \Rightarrow elektrony se pohybují rychleji.
Ostatní vlastnosti Si zachovány!

Strained Silicon - aplikace

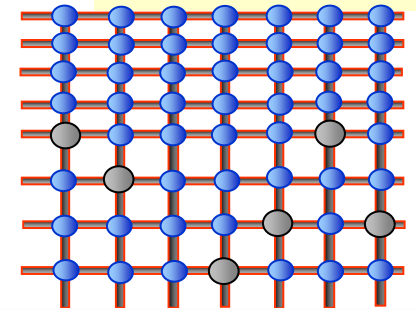


menší odpor
⇒ větší proud
⇒ o 25% rychlejší

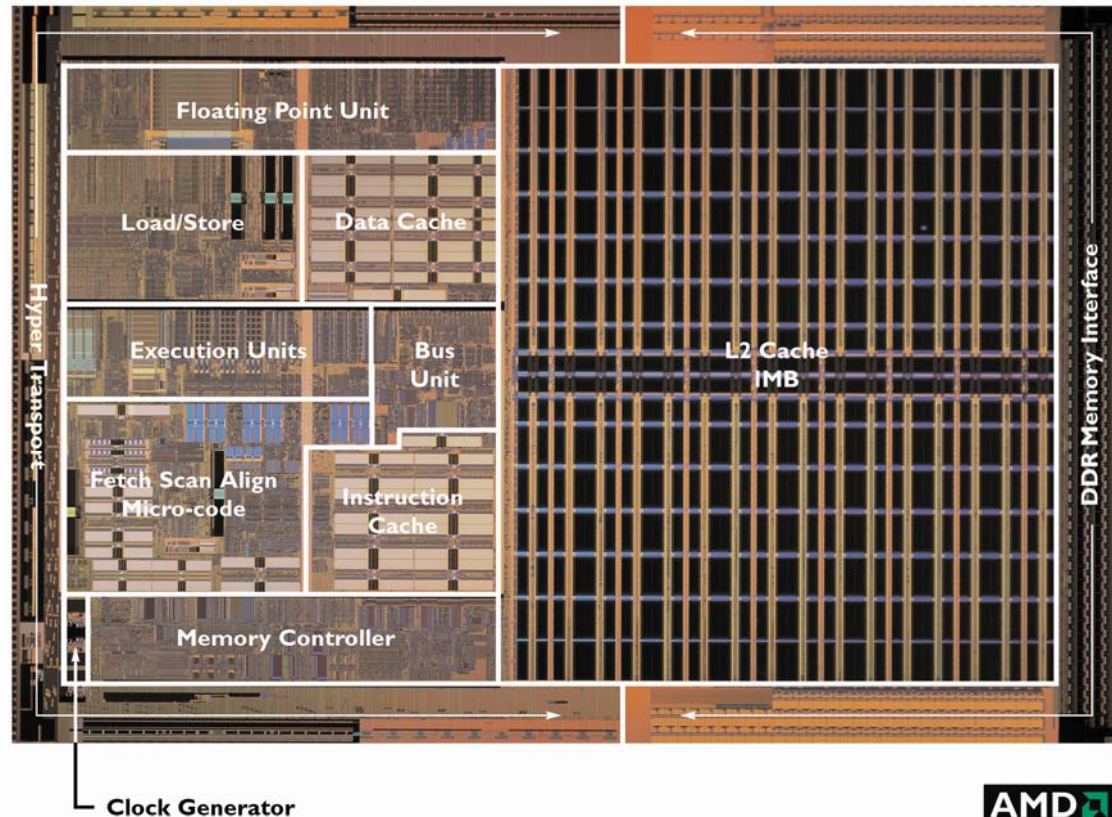
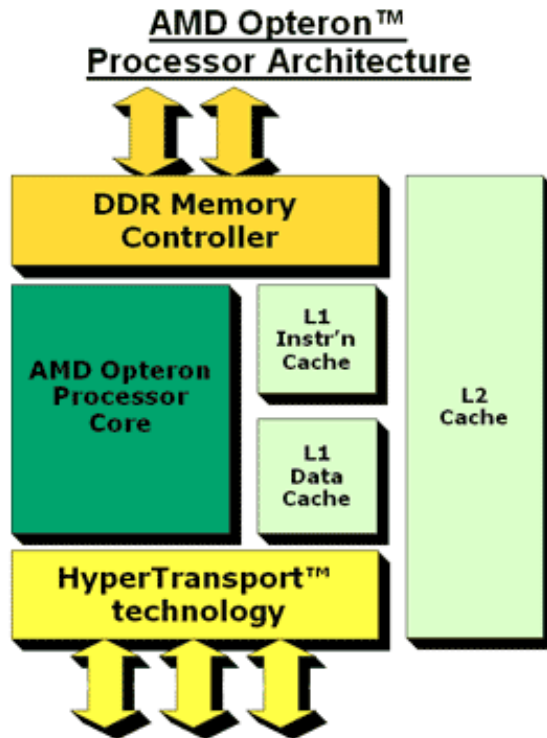
Transistor MOSFET: feature size 90 nm

Strained Silicon - aplikace

Strained Silicon



Q2/2005



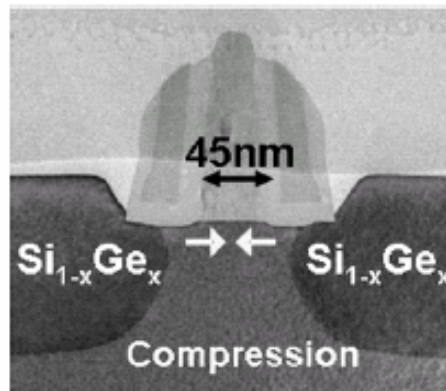
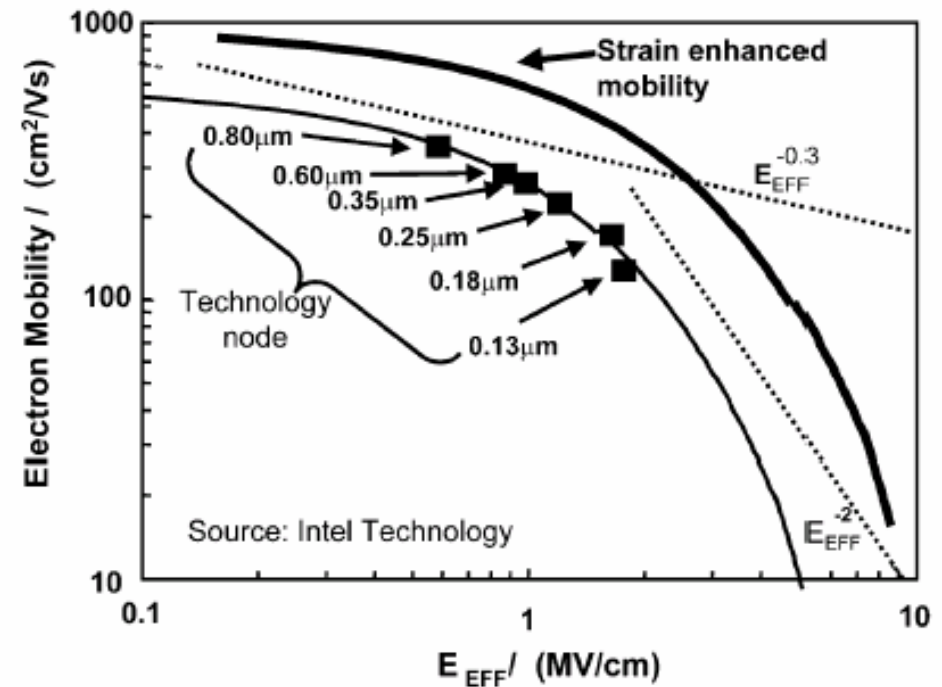
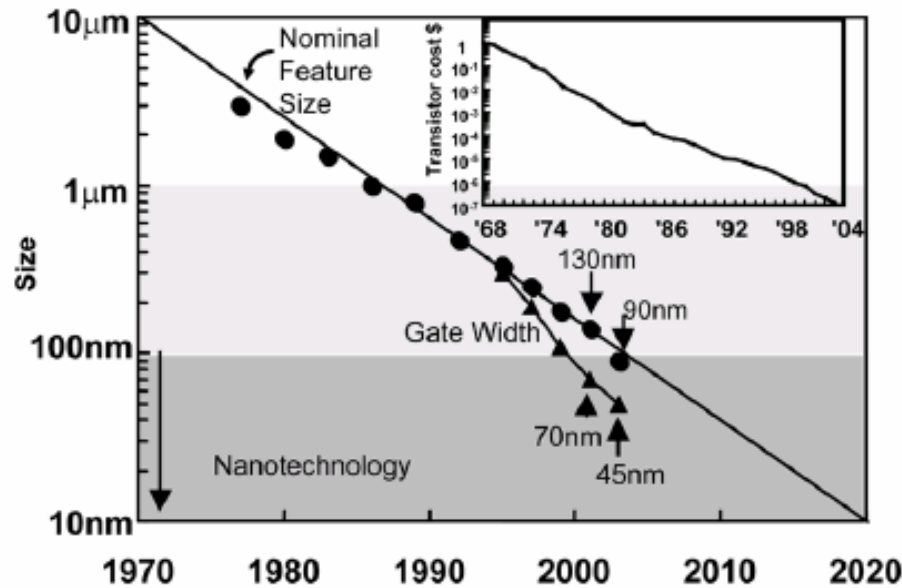
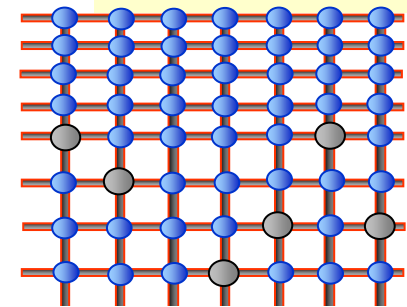
Nárůst výkonu 25%, nárůst ceny 2%.



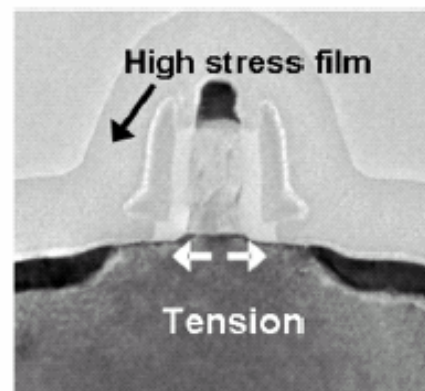
Strained Silicon - aplikace

intel.

Strained Silicon



pMOSFET



nMOSFET

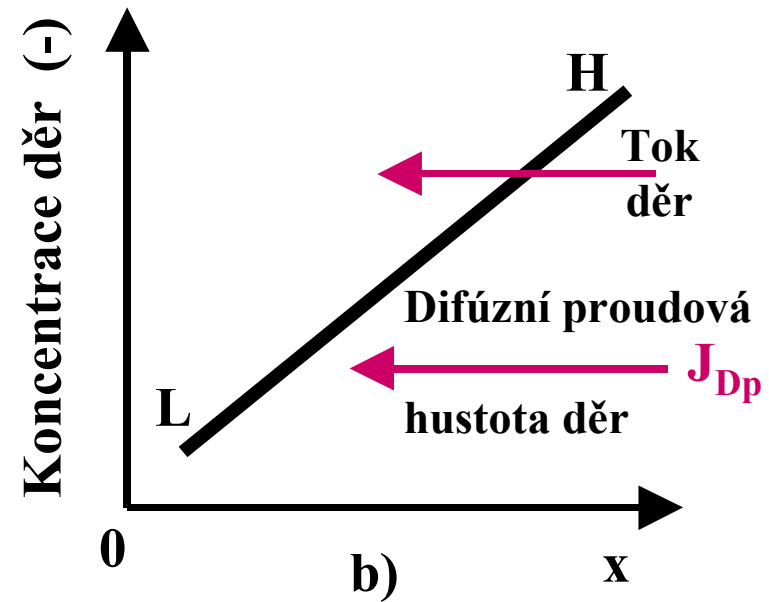
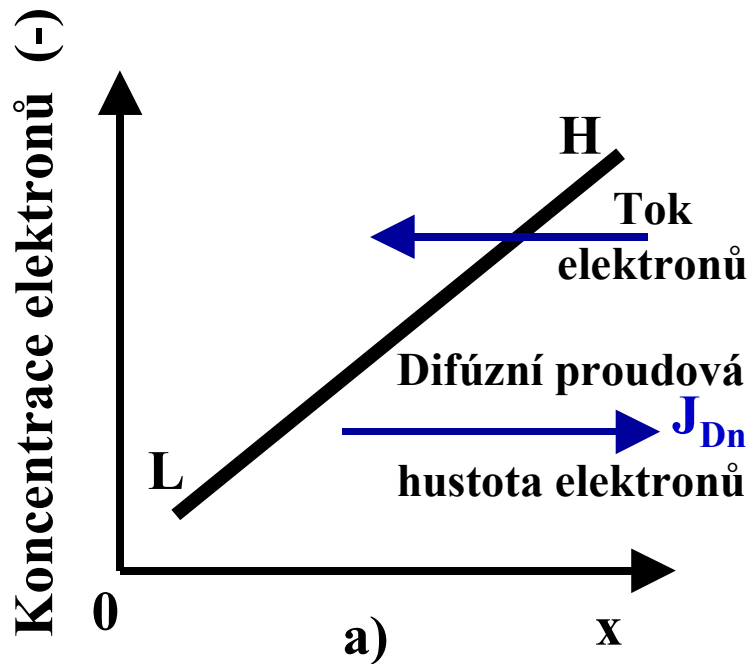
Fig. 8. Mobility versus technology scaling trend for Intel process technologies.

DIFÚZE

nosičů náboje

(= unášení „gradientem koncentrace“)

DIFÚZE NOSIČU NÁBOJE



$$J_{Dn} = e \cdot D_n \cdot \text{grad } n = e \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} \approx e \cdot D_n \cdot \frac{\Delta n}{\Delta x}$$

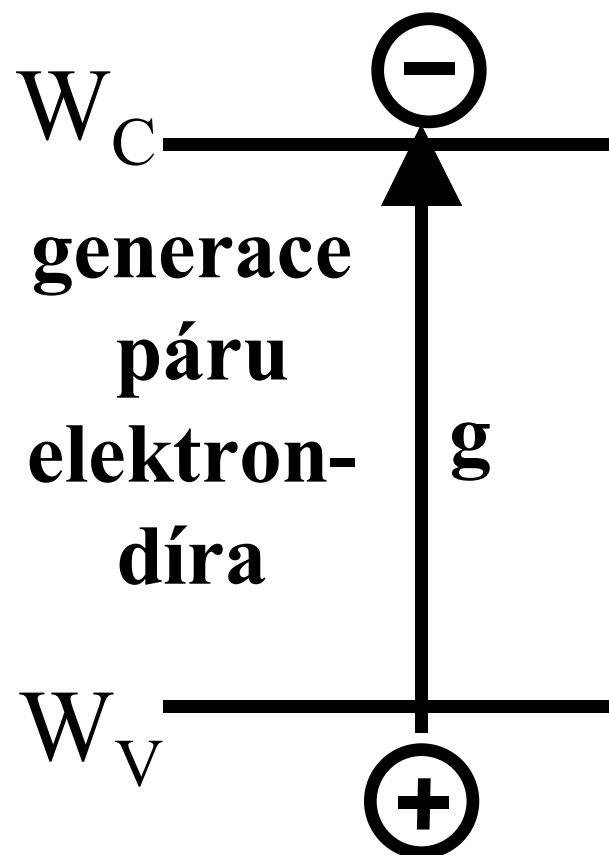
$$J_{Dp} = -e \cdot D_p \cdot \text{grad } p = -e \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} \approx -e \cdot D_p \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

DIFÚZE + DRIFT NOSIČU NÁBOJE

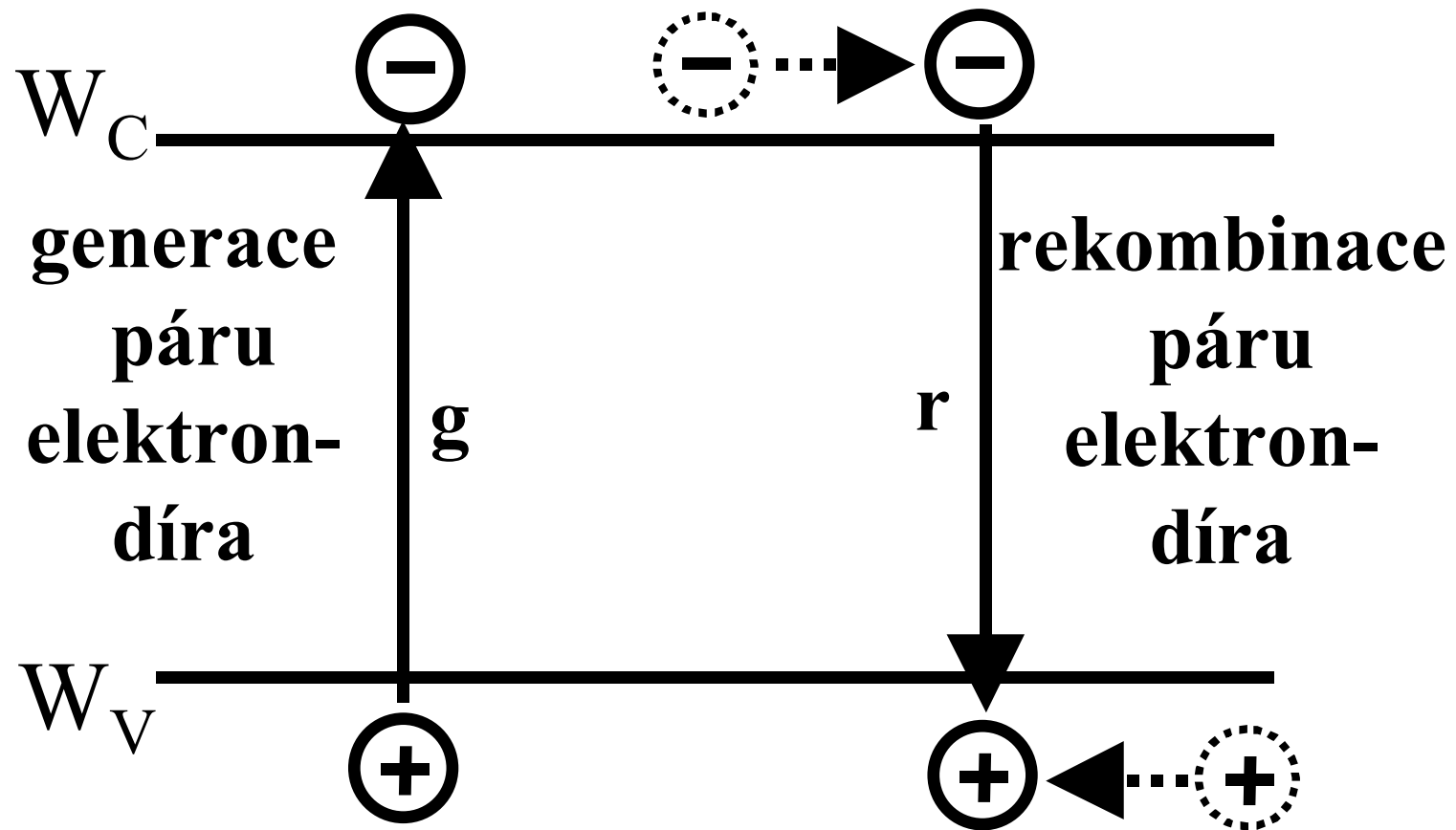
- současné působení

$$J = J_{\sigma} + J_D = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot E_x + e \cdot p \cdot \mu_p \cdot E_x + e \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} - e \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

GENERACE A REKOMBINACE



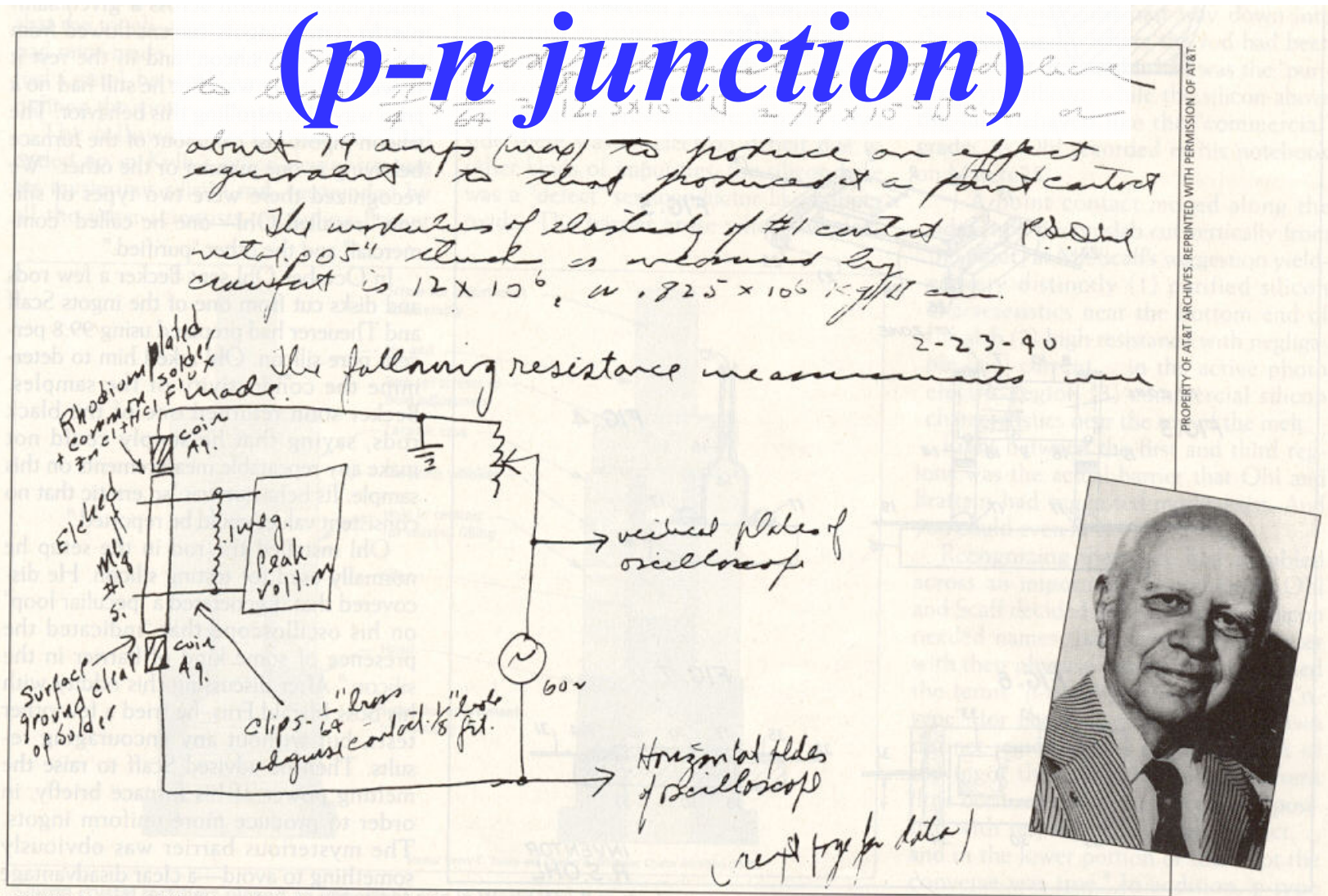
GENERACE A REKOMBINACE



Tepelná rovnováha: $g = r, \quad n = p = n_i$

p-n přechod

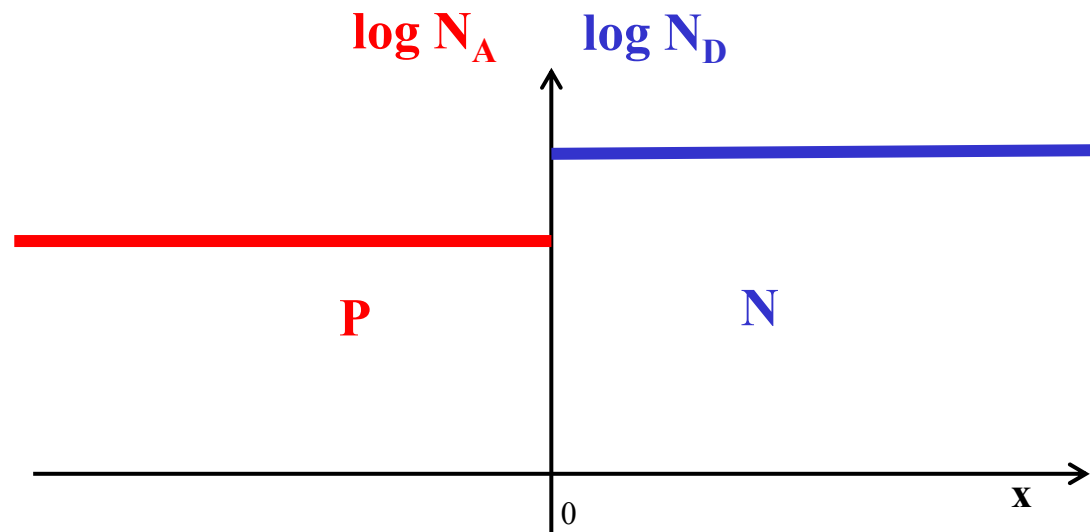
(p-n junction)



On 23 February 1940, Russell Ohl [photographed in later years] sketched in his laboratory notebook the circuit that he used to measure the resistance of a silicon rod. The odd behavior of the current passing through the rod led to his discovery of the pn junction.

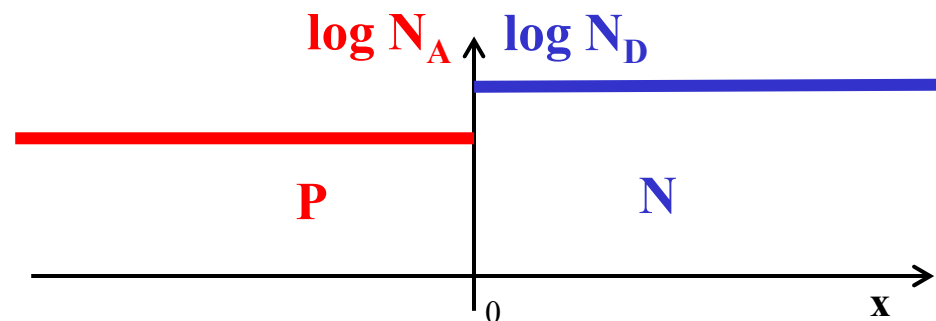
p-n přechod (*p-n junction*)

Příměsi (*Doping*)



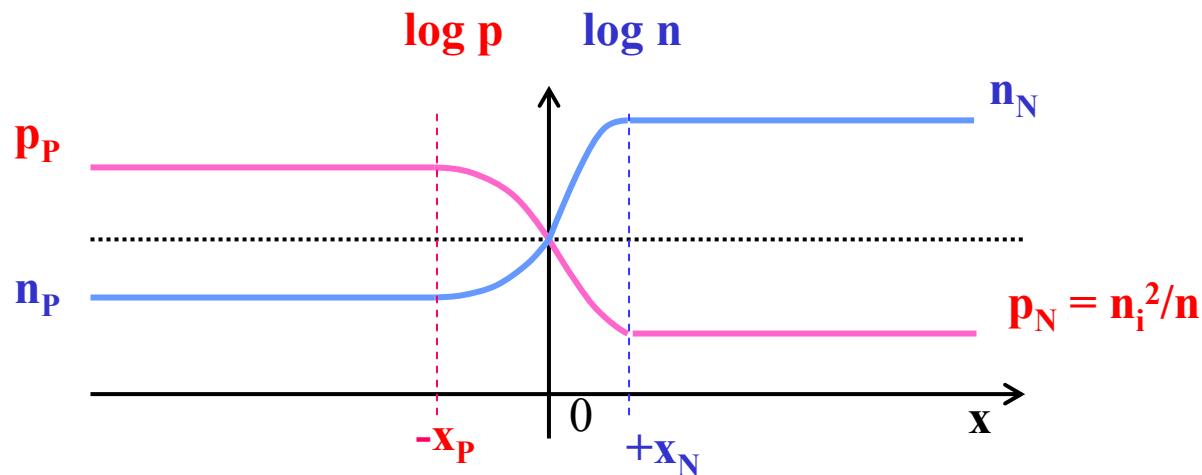
p-n přechod

Příměsi (Doping)



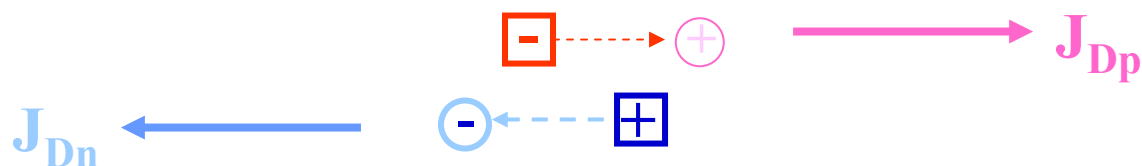
vázané v mřížce
(nepohyblivé)

Volné nosiče



pohyblivé
v mřížce

difúze

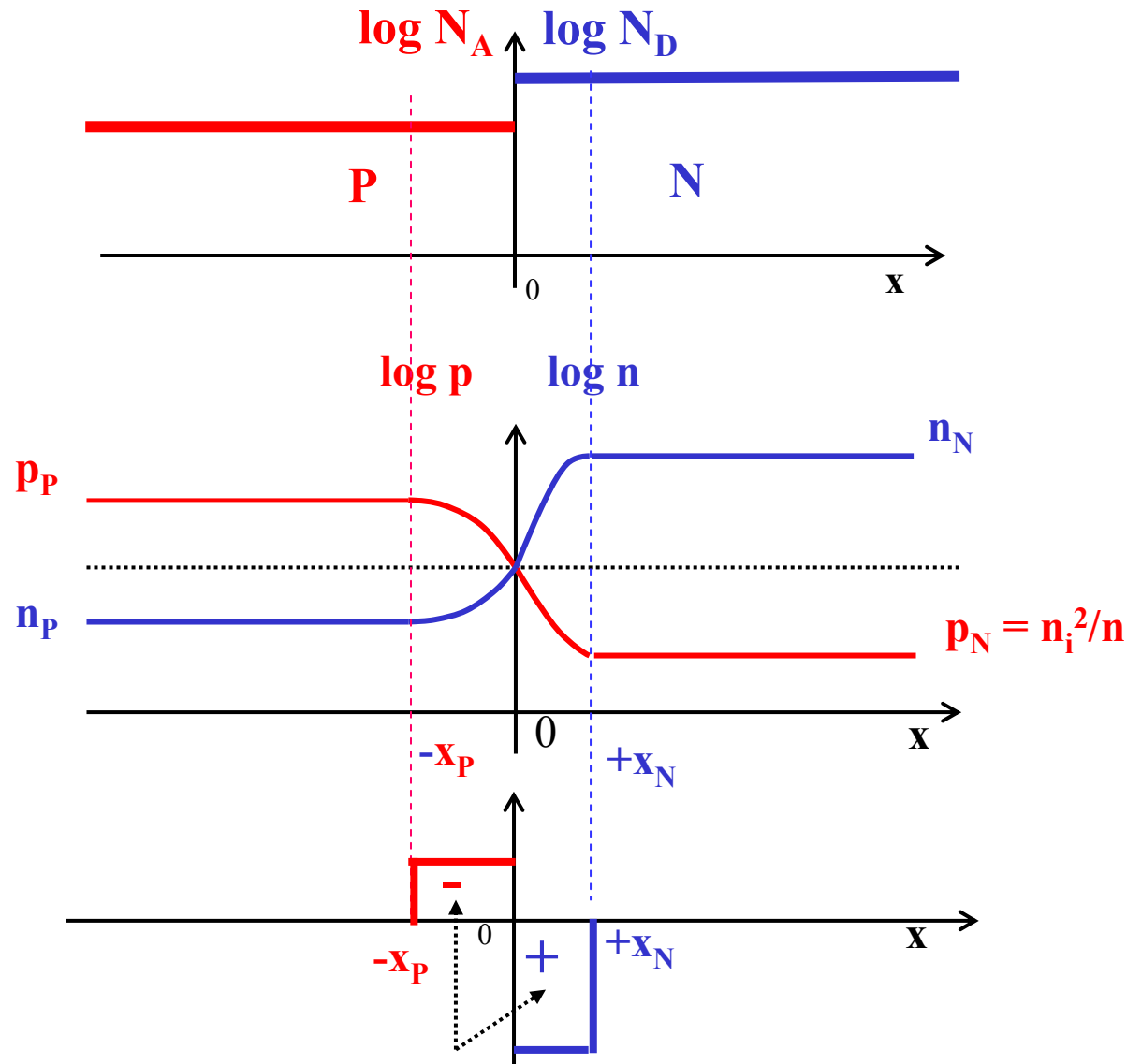


p-n přechod

Vázaný náboj

Volné nosiče
Free Carriers

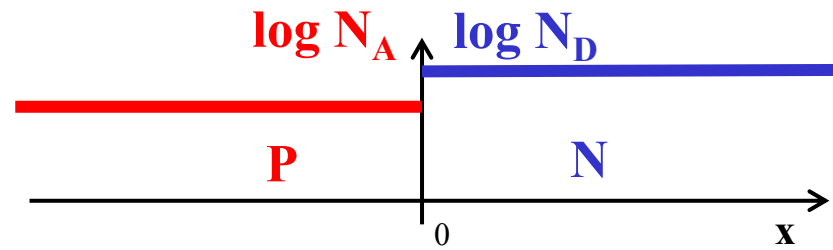
Příměsi (Doping)
nepohyblivý
nekompenzovaný



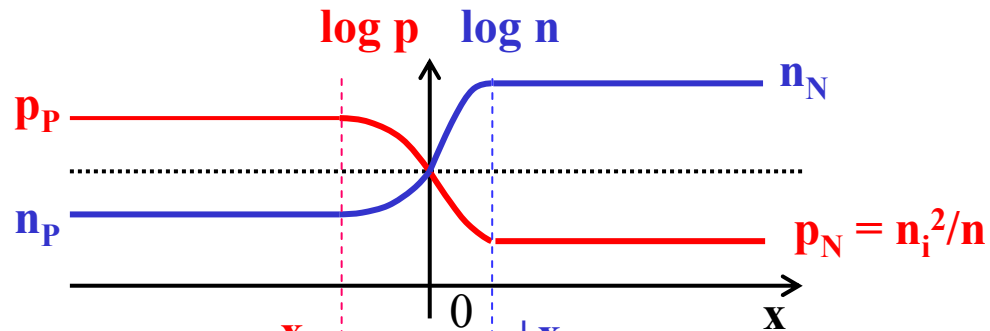
Oblast Prostorového Náboje - OPN

p-n přechod

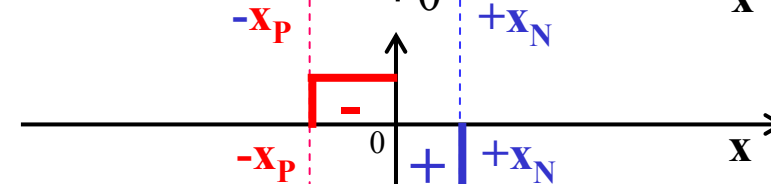
Příměsi (Doping)



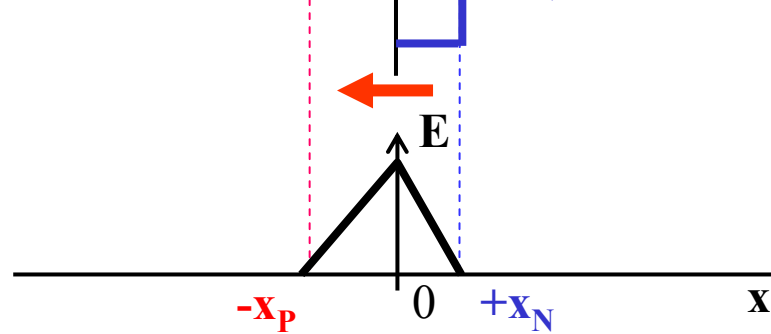
Volné nosiče



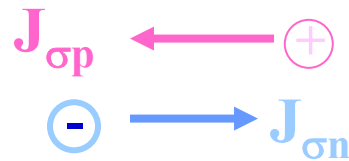
Vázaný náboj



Elektrické pole



drift

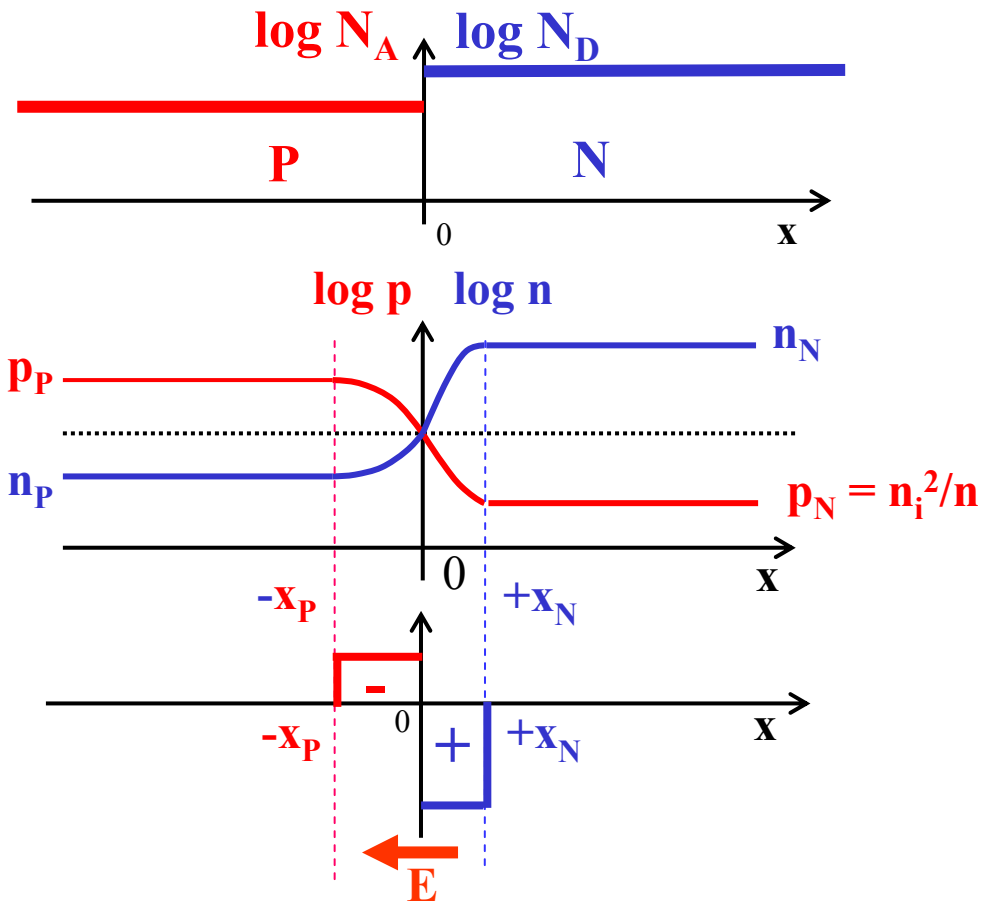


p-n přechod

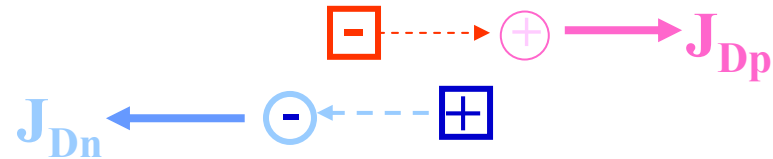
Příměsi (Doping)

Volné
nosiče

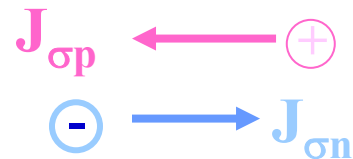
Vázaný
náboj



difúze

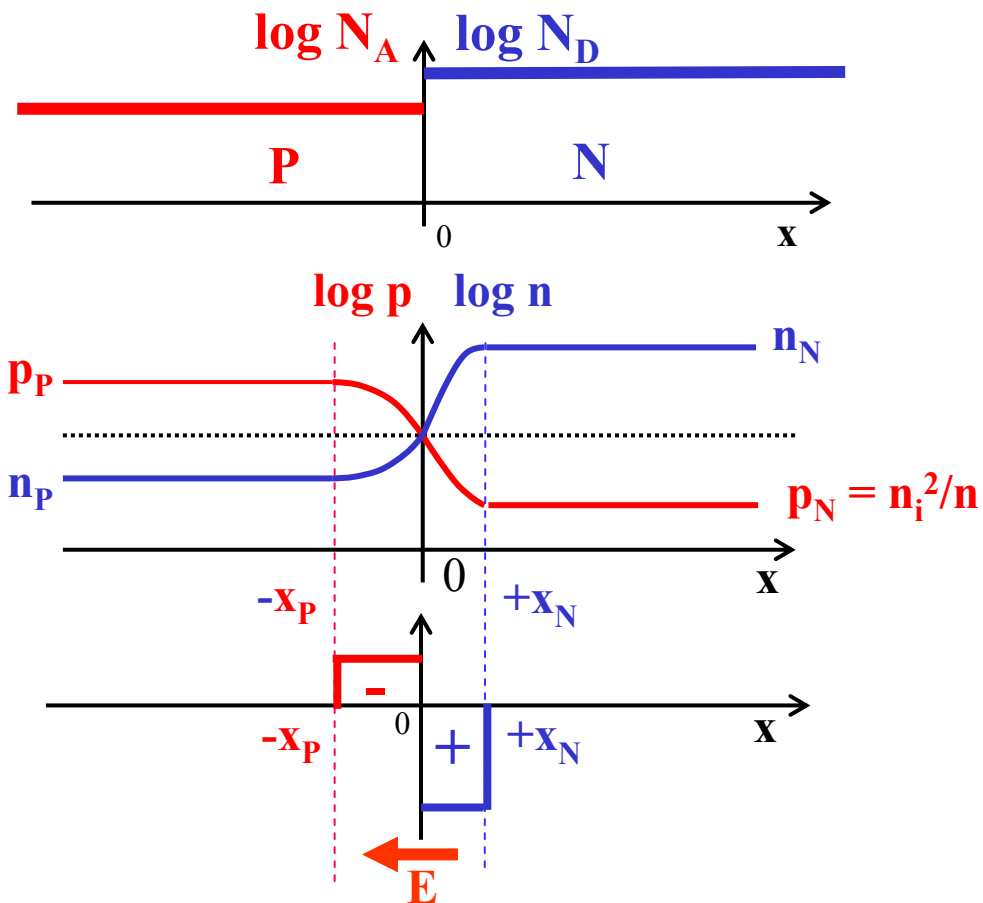


drift

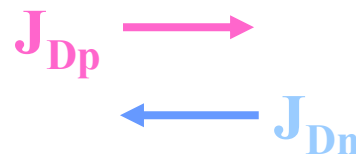


Rovnováha na p-n přechodu

Příměsi (Doping)
Volné nosiče
Vázaný náboj

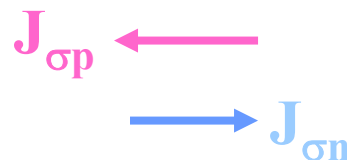


difúze



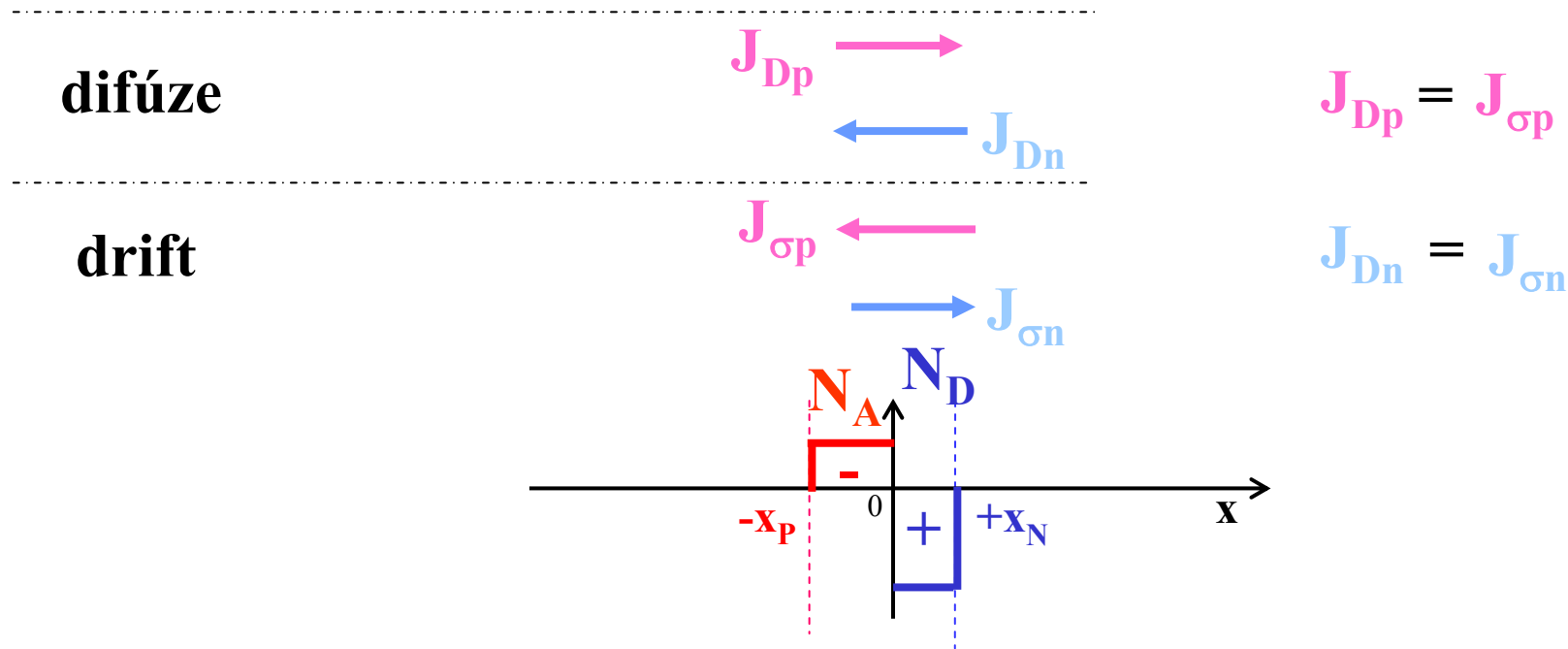
$$J_{Dp} = J_{\sigma p}$$

drift



$$J_{Dn} = J_{\sigma n}$$

Rovnováha na p-n přechodu



Plošná hustota náboje dvojvrstvy OPN

$$N_A \cdot x_p = N_D \cdot x_n$$

Nízká úroveň dotace \Rightarrow široká OPN

Vysoká úroveň dotace \Rightarrow úzká OPN

Příměsi (*Doping*)

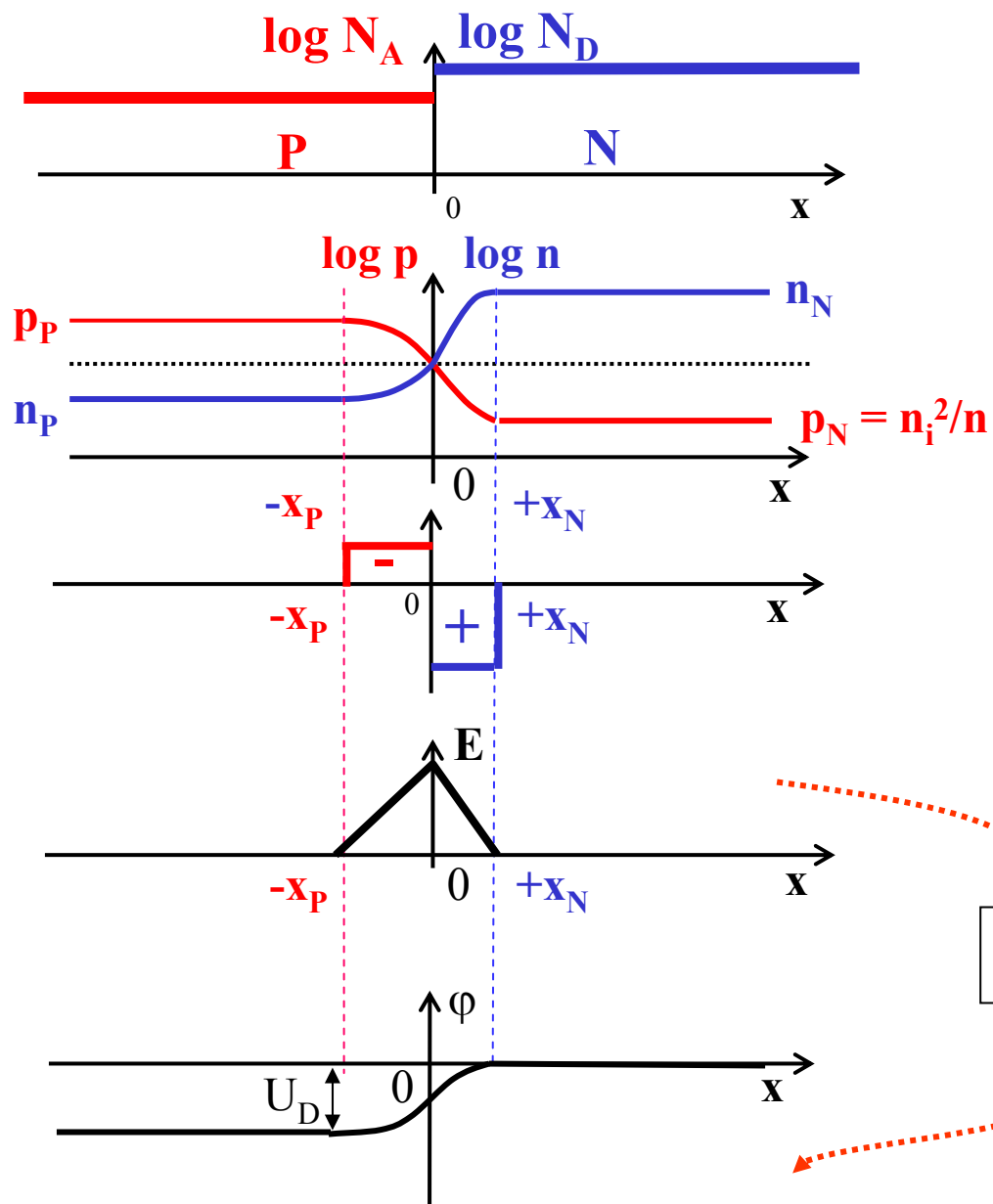
Volné
nosiče

Vázaný
náboj

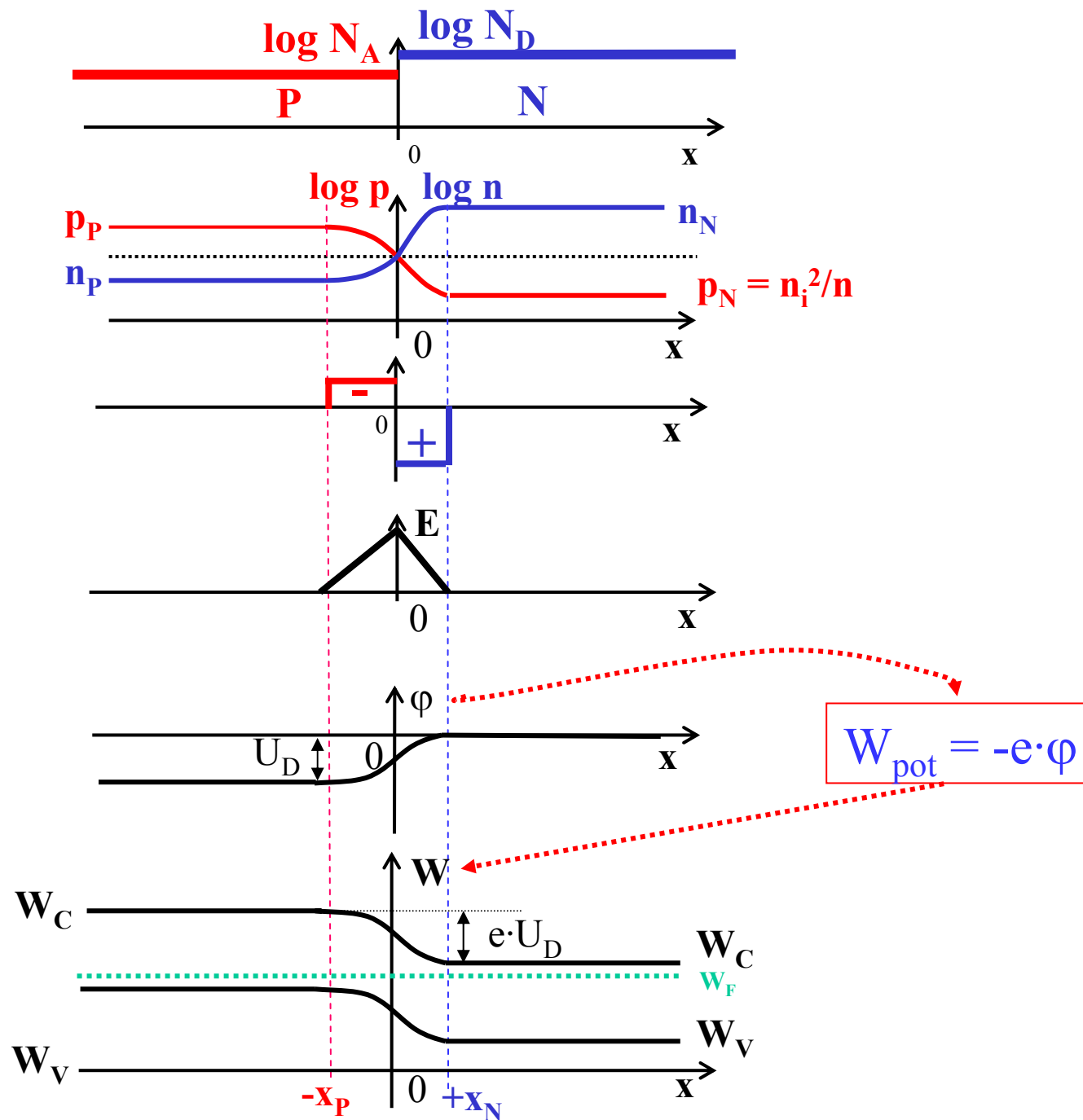
Elektrické
pole

Potenciál

p-n přechod



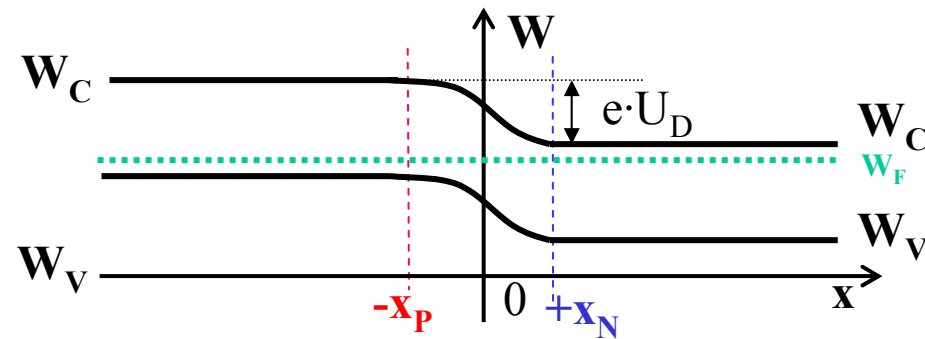
Vázaný náboj
 Příměsi (*Doping*)
 Volné nosiče
 Elektrické pole
 Potenciál
 Energetický pásový diagram



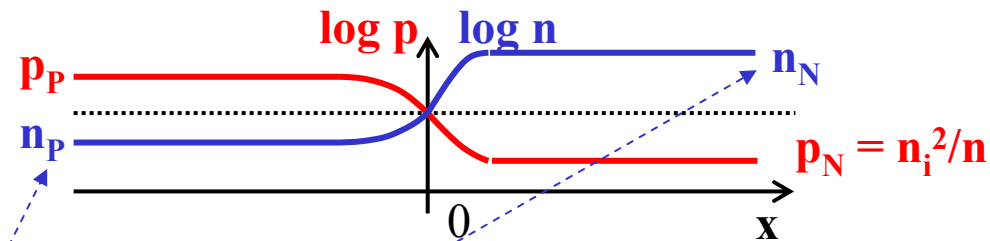
Energetická bariéra $e \cdot U_D$ na p-n přechodu

$$U_D = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2}\right) = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_{N0}}{n_{P0}}\right) = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{p_{P0}}{p_{N0}}\right)$$

Energetický
pásový
diagram



Volné
nosiče



$$n_P = n_N \cdot \exp\left(\frac{-e \cdot U_D}{kT}\right) \Rightarrow n_P \ll n_N$$

Boltzmann factor kT

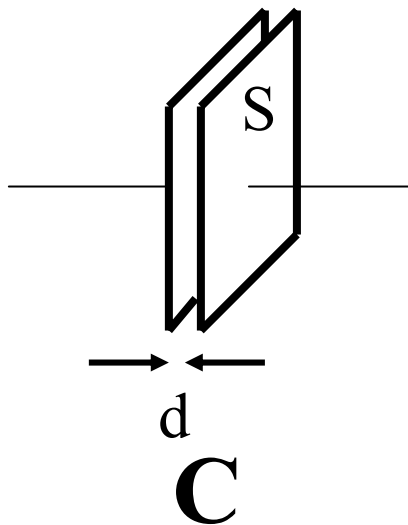
Bariéra udržuje velký koncentrační rozdíl mezi oblastmi P a N.

Praktické využití kapacity OPN v p-n přechodu

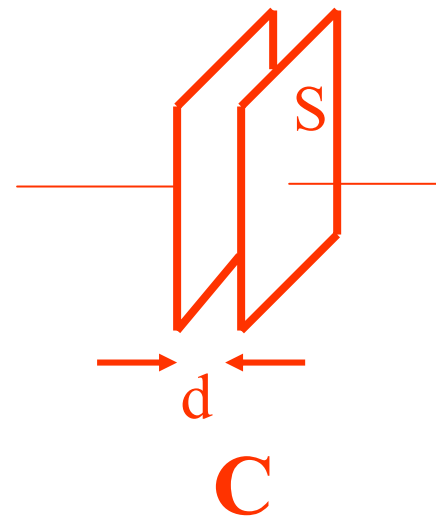
Varikap (*Variable capacitor*) kapacitní dioda

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot S / d_{\text{OPN}} \quad d_{\text{OPN}} = f(U_{\text{rev}}) \Rightarrow C = f(U_{\text{rev}})$$

nastaveno dotačním profilem

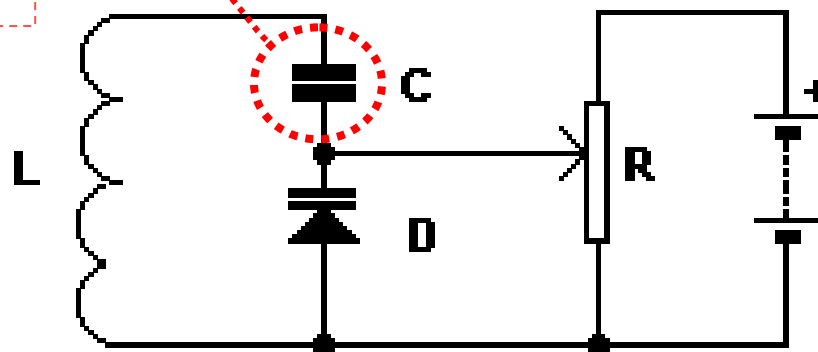


>



brání ~ zkratu L
zdrojem napětí

Varikap




Philips Semiconductors

Varicap diodes

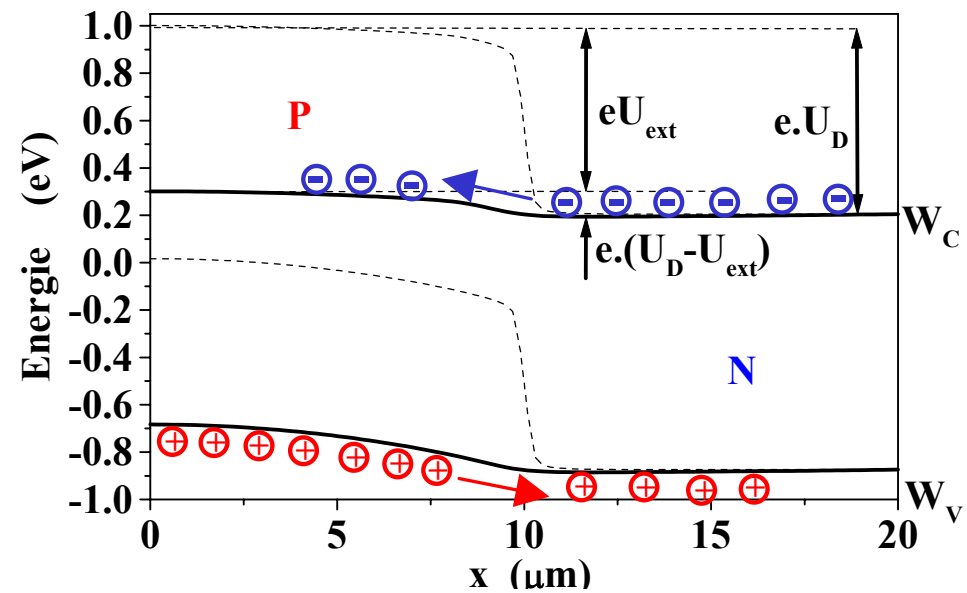
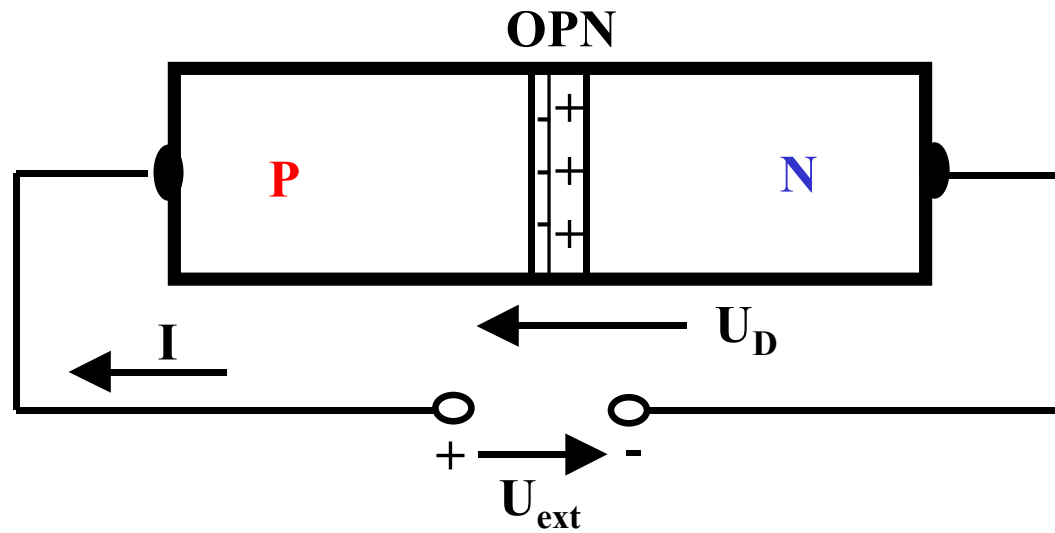
Selection guide

VARICAP DIODES (continued)

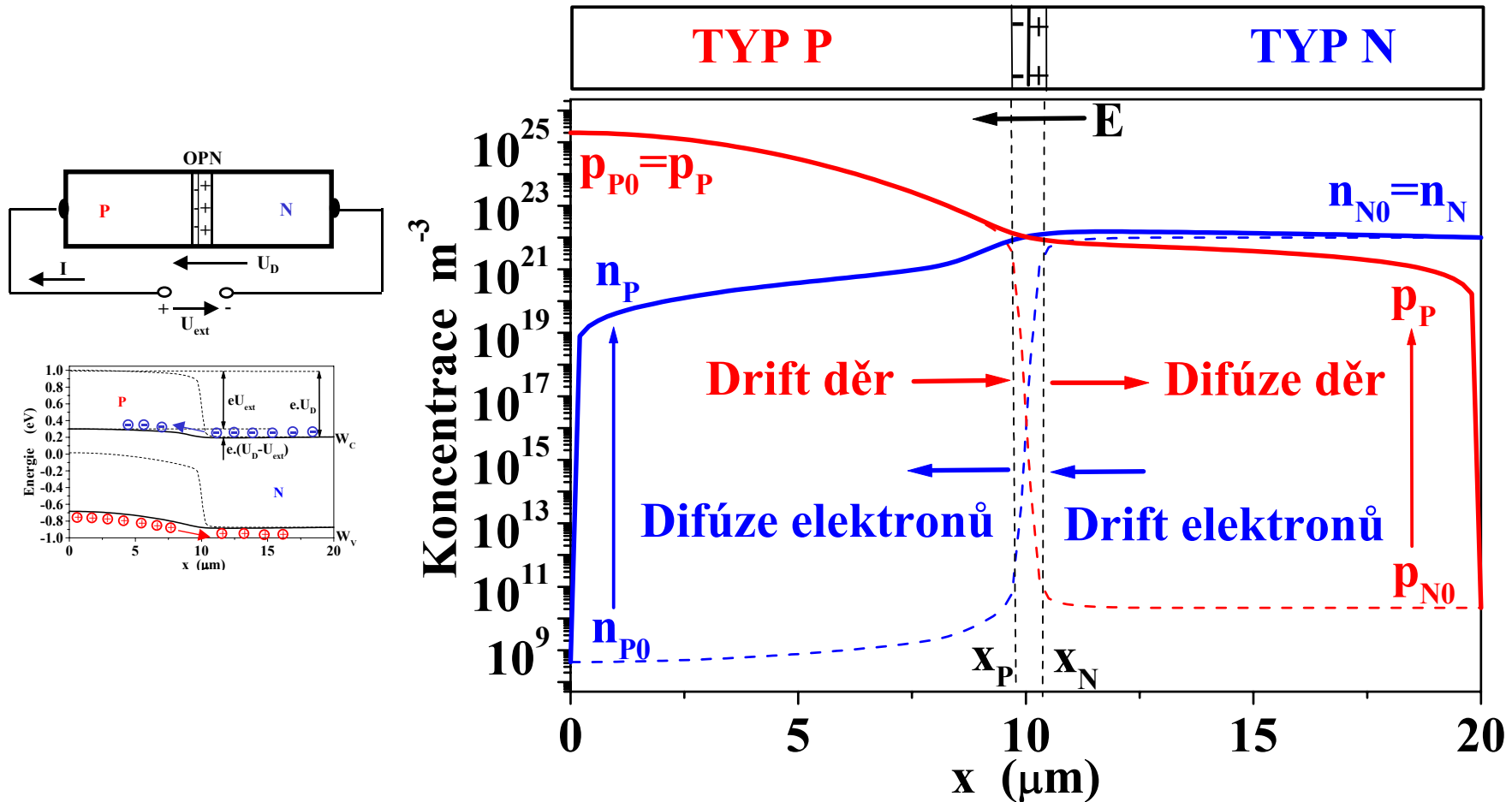
TV/SATELLITE VARICAP DIODES

TYPE NUMBER	C _d @ V _R		TUNING RANGE			r _s max.	MATCHED SETS	DOUBLE DIODE	PACKAGE (not to scale)
			C _d over voltage range						
	(pF)	(V)	ratio	V ₁ (V)	to V ₂ (V)	(Ω)	(%)		
VHF tuning									
BB809	4.7	28	9	1	28	0.6	3	no	 SOD68 (DO34)
BB909A	>2.6	28	13.5	1	28	0.9	2.5	no	
BB909B	>2.8	28	13.5	1	28	0.9	2.5	no	
BB910	2.5	28	16	0.5	28	1	2.5	no	
BB911/A	2.7	28	25	0.5	28	2	2.5	no	

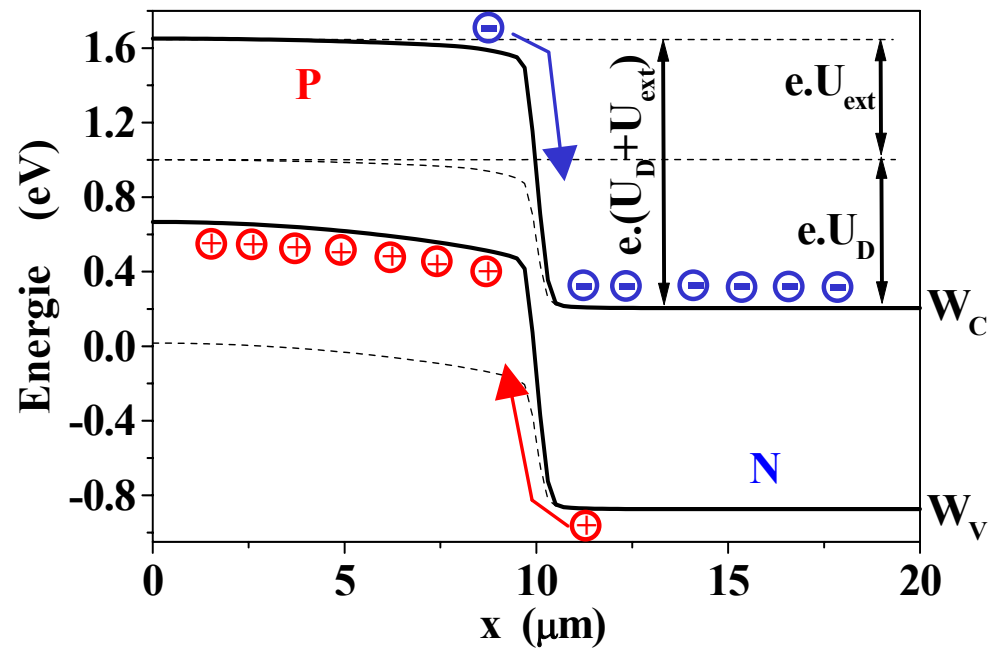
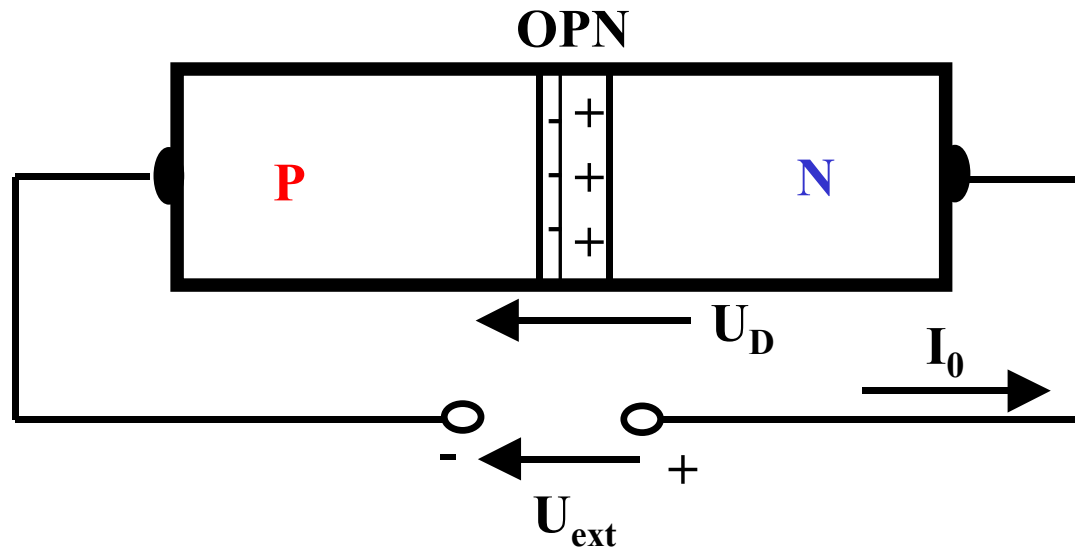
Propustný směr – *Forward Direction*



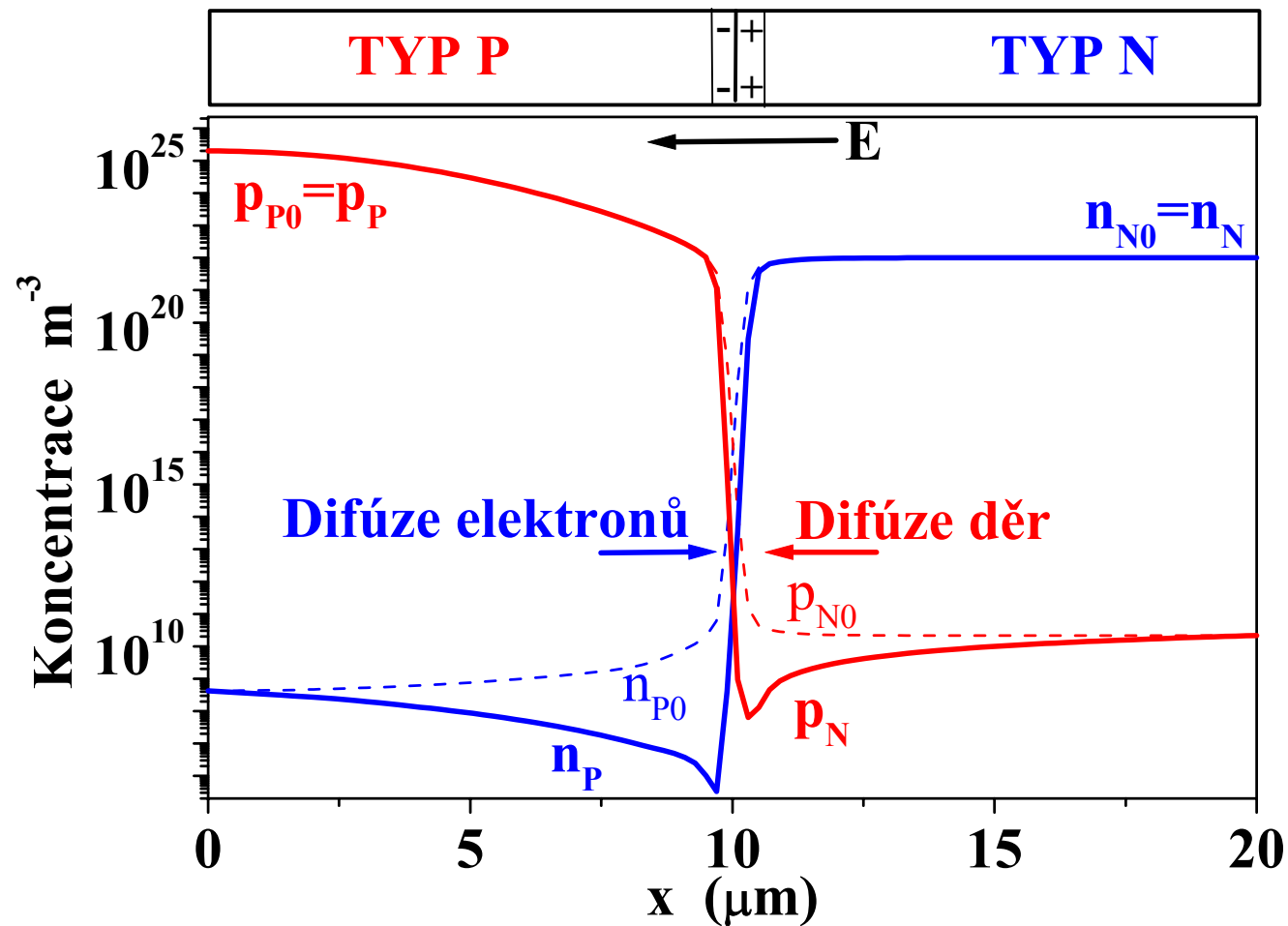
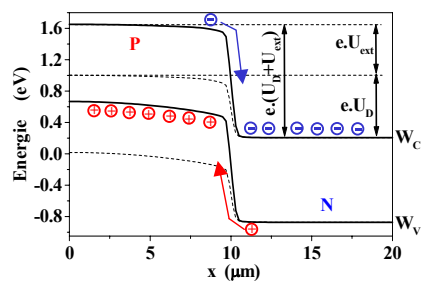
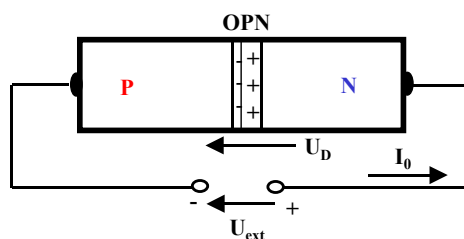
Propustný směr – *Forward Direction*



Závěrný směr – *Reverse Direction*



Závěrný směr – *Reverse Direction*



V-A charakteristika p-n přechodu

$$I = I_0 \cdot [\exp(eU/kT) - 1]$$

