

Cvičení 4: Transport nositelů náboje, přechod PN

C4.1 Transport náboje v polovodiči

Difúzní a driftový proud elektronů a děr (Příklad CP4.1a2)

Generace a rekombinace elektronů a děr (Příklad CP4.3a4)

C4.2 Přechod PN

Difúzní potenciál přechodu PN, oblast prostorového náboje (Příklad CP4.5)

Přechod PN s přiloženým napětím

Průraz přechodu PN a určení průrazného napětí (Příklad CP4.6)

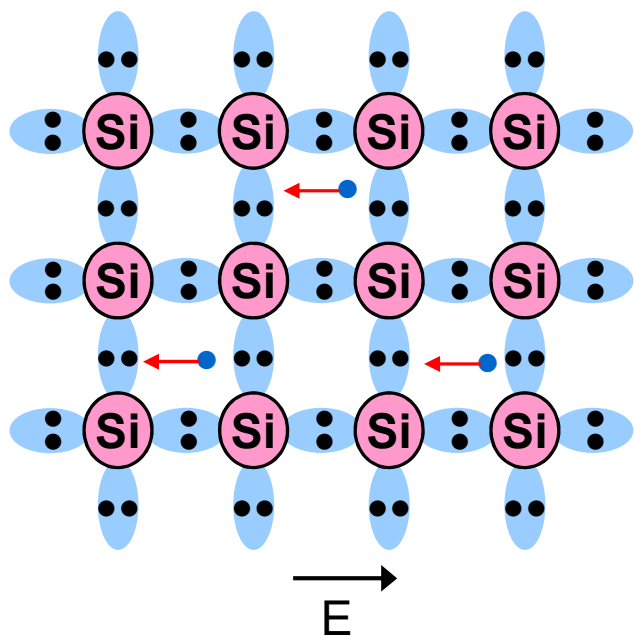
C4.1 Transport náboje v polovodiči

Transport nositelů náboje (vedení proudu) v polovodičích probíhá prostřednictvím dvou volných nositelů náboje – elektronů a děr. Rozlišujeme dva mechanismy:

Drift

unášením v elektrickém poli

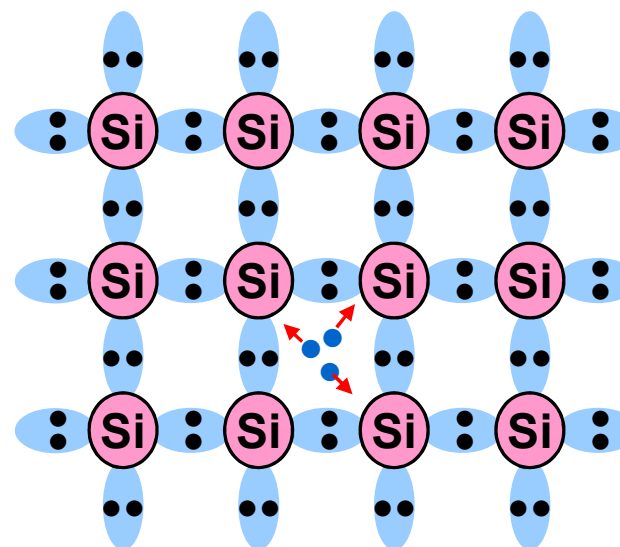
musí být přítomny volné nabité částice a
elektrické pole



Difúzi

unášením gradientem koncentrace

v důsledku nerovnoměrné koncentrace částic
(bez elektrického pole)



C4.1 Transport náboje v polovodiči

Driftový proud je výsledkem složitého pohybu elektronu (díry) v unášivém elektrickém poli, který sestává z chaotického tepelného Brownova pohybu elektronů, na který se superponuje unášení (akcelerace) elektronů (děr) elektrickým polem.

Výsledný pohyb elektronu je charakterizován tzv. unášivou (driftovou) rychlostí v_u , která je pro nízké hodnoty elektrického pole E lineárně závislá na elektrickém poli

$$v_u = -\mu_n \cdot E$$

Parametrem úměrnosti je pohyblivost μ_n , která skrývá složitý pohyb elektronu a závisí na řadě parametrů (teplota, koncentrace poruch, krystalová orientace, pásová struktura, apod).

$$\mu_n = \frac{e\tau}{m_n^*}$$

elementární náboj $\rightarrow e$

relaxační doba odpovídající době, kdy je elektron akcelerován polem mezi srážkami s atomy mřížky a defekty $\rightarrow \tau$

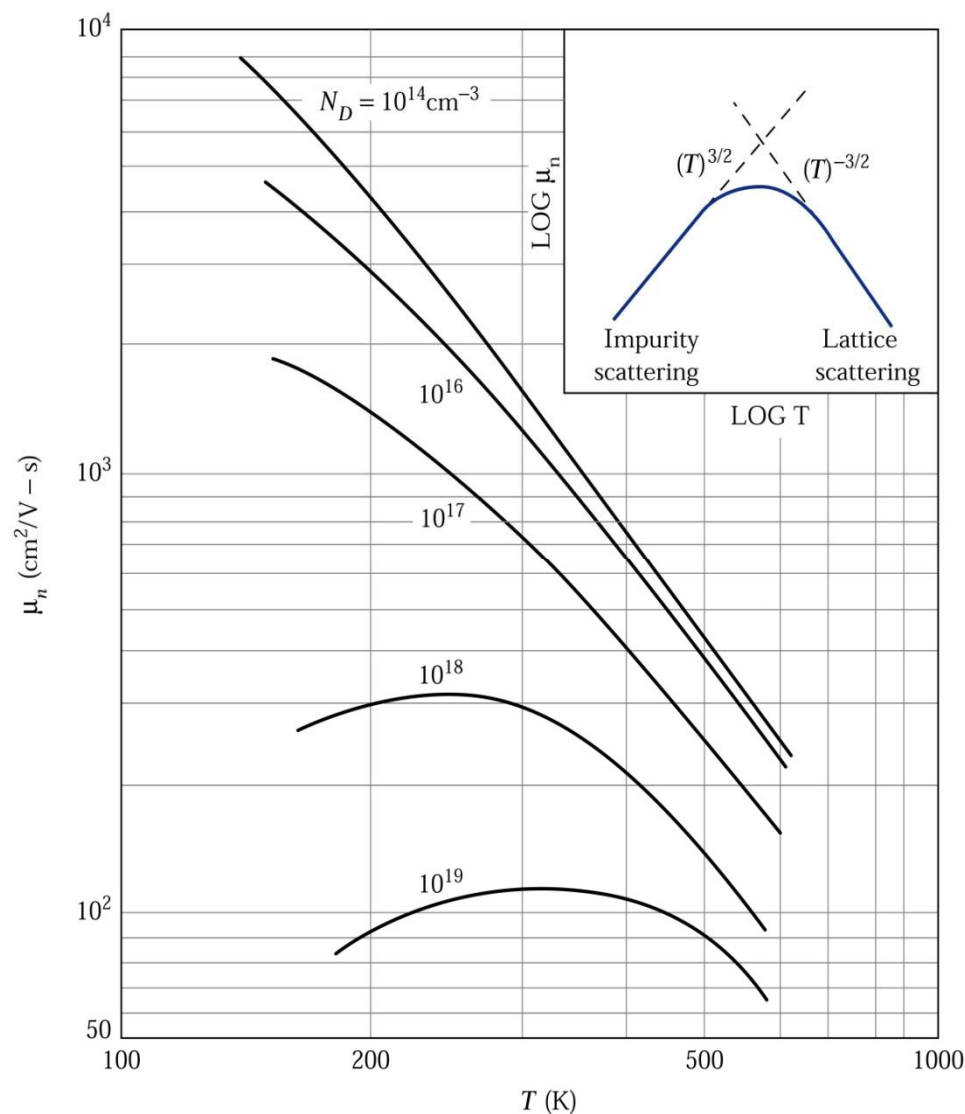
efektivní hmotnost elektronu (daná pásovou strukturou) $\rightarrow m_n^*$

Výsledná proudová hustota je rovna celkovému náboji prošlému jednotkovou plochou za 1s. Rovná se součinu hodnot elementárního náboje x koncentrace x rychlost elektronů.

$$j_n = -en v_u = en\mu_n E = \sigma_n E$$

C4.1 Transport náboje v polovodiči

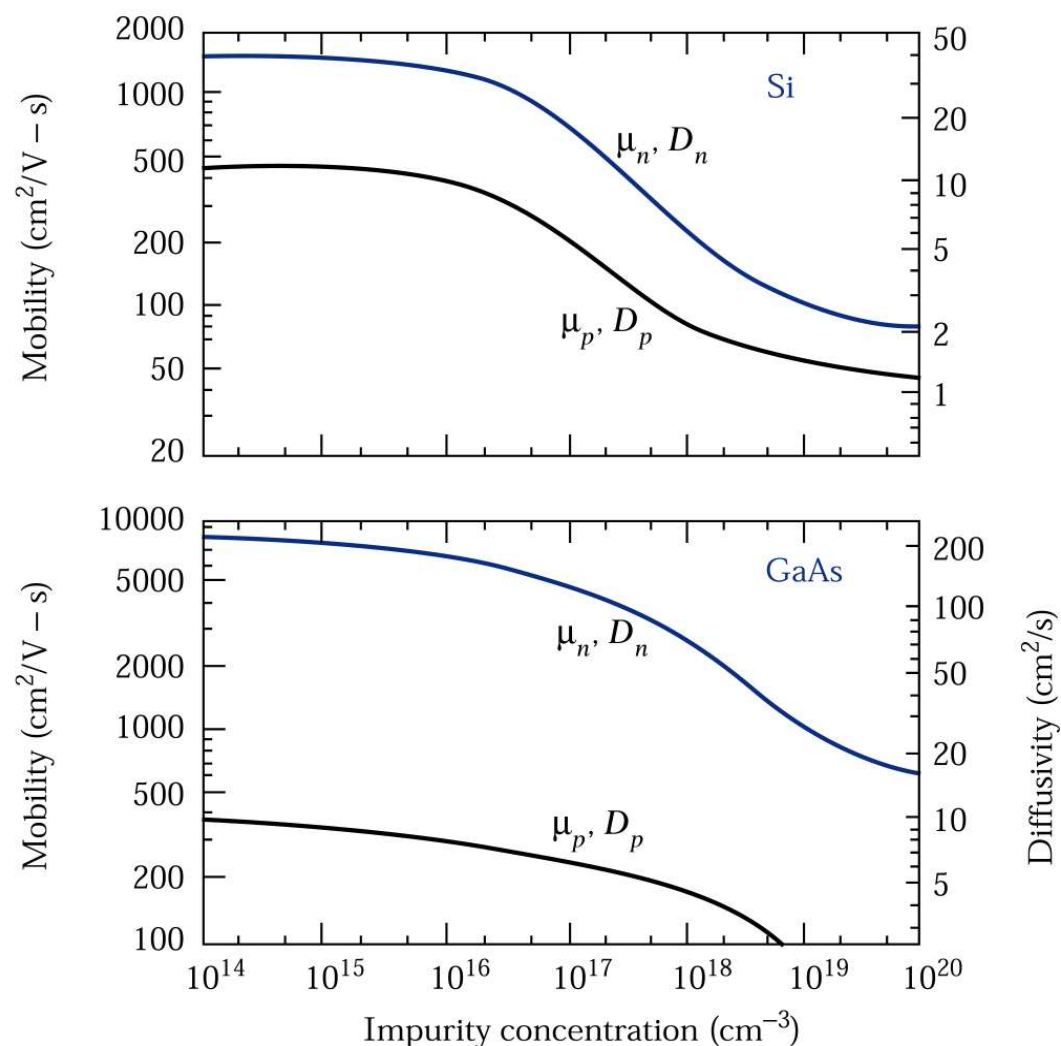
Závislost pohyblivosti elektronů v křemíku na teplotě



- vlivem rostoucího rozptylu nositelů náboje na atomech krystalové mříže jejich pohyblivost s teplotou klesá
- pohyblivost také klesá s rostoucí koncentrací nečistot (dopantů), která zvyšuje pravděpodobnost rozptylu na poruchách

C4.1 Transport náboje v polovodiči

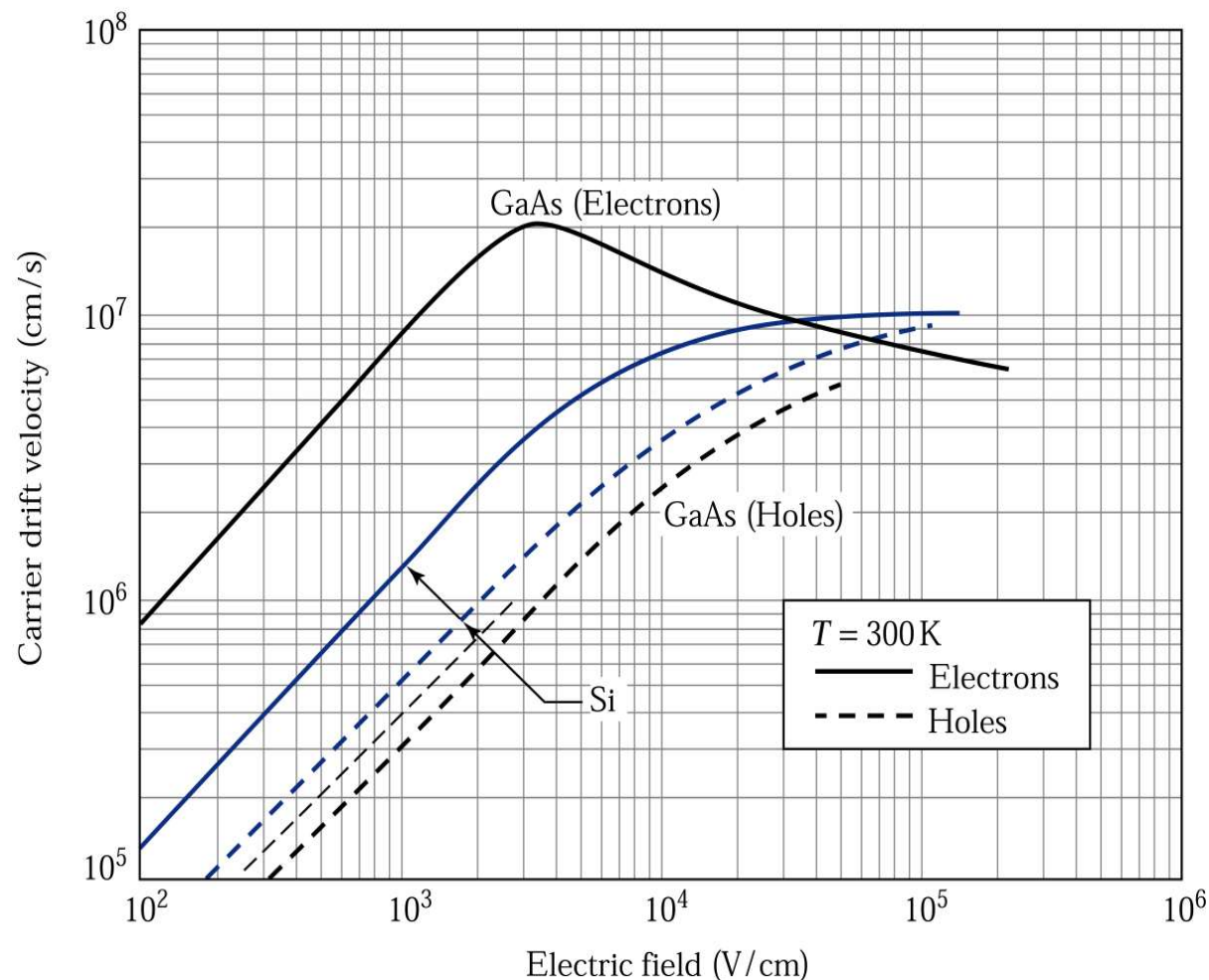
Závislost pohyblivosti elektronů a děr v křemíku na dotaci
(koncentraci nečistot) $T = 300\text{K}$



C4.1 Transport náboje v polovodiči

Saturace rychlosti nositelů náboje v polovodiči

Lineární vztah mezi rychlostí nositelů a intenzitou elektrického pole podmiňující platnost Ohmova zákona platí jen pro nízké intenzity elektrického pole (do 10-100 kV/cm), poté se rychlost saturuje.



C4.1 Transport náboje v polovodiči

Ohmův zákon v polovodiči uvažuje tok elektronů a děr, jejichž celkový proud se sčítá (elektrony se pohybují opačným směrem, ale nesou záporný náboj). Zákon je platný pouze v oblasti nízkých elektrických polí, kdy je vztah mezi \mathbf{v}_u a \mathbf{E} lineární. Při vysokých intenzitách \mathbf{E} , se rychlost nositelů náboje saturuje a Ohmův zákon přestává platit.

Diferenciální tvar:

$$J = J_n + J_p = \underline{en\mu_n E} + \underline{ep\mu_p E} = \sigma E$$

dominantními parametry ovlivňujícími transport
nositelů je koncentrace nositelů a jejich pohyblivost

σ .. vodivost
 ρ .. měrný odpor
 R .. odpor
 I .. proud
 U .. napětí
 S .. plocha
 L .. délka vodivé dráhy

Integrální tvar:

$$\int_0^L I dx = \underline{IL} = \int_0^L S J dx = \int_0^L S \sigma E dx = S \sigma U = \underline{\frac{S}{\rho} U}$$

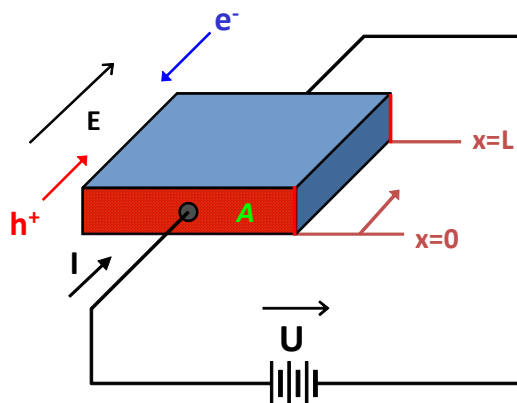


$$U = \rho \frac{L}{S} I = RI$$

C4.1 Transport náboje v polovodiči

Příklad CP4.1:

Určete proud protékající integrovaným odporem v křemíkovém IO o délce 1 mm a průřezu $100 \mu\text{m}^2$. Vodivá dráha je dotována bórem o koncentraci 10^{17} cm^{-3} , intrinzická koncentrace nositelů náboje v křemíku $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. Proud určete pro teplotu 300 K a úbytek napětí na odporu 10V.



Řešení:

Elektrický proud v polovodiči je dán součtem příspěvku toku elektronů a děr. Driftový proud je úměrný součinu koncentrace nositelů náboje (n, p), jejich rychlosti (v_n, v_p), hodnoty elementárního náboje (e) a plochy (A). Rychlost nositelů je pro nízké hodnoty intenzity elektrického pole dána součinem jejich pohyblivosti (μ_n, μ_p) a intenzity elektrického pole (E).

$$I = I_n + I_p = A e (n \mu_n + p \mu_p) E = A \sigma E$$

Součin elementárního náboje e , koncentrace nositelů (n, p) a pohyblivosti (μ_n, μ_p) udává měrnou vodivost polovodiče σ .

C4.1 Transport náboje v polovodiči

Pro stanovení vodivosti polovodiče je nejprve nutné určit typ vodivosti a odpovídající koncentrace elektronů a děr.

Bór (B) je prvek 3. skupiny, kterému oproti Si mu chybí jeden valenční elektron. Může tedy elektron přijmout – akceptor. Vodivost je typu P, $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, majoritními nositeli díry.

III IV V
s²p¹ s²p² s²p³

3	IIIA	14	IVA	15	VA
5	10.811	6	12.011	7	14.007
B	BORON	C	CARBON	N	NITROGEN
13	26.982	14	28.086	15	30.974
Al	ALUMINIUM	Si	SILICON	P	PHOSPHORUS
31	69.723	32	72.64	33	74.922
Ga	GALLIUM	Ge	GERMANIUM	As	ARSENIC
49	114.82	50	118.71	51	121.76
In	INDIUM	Sn	TIN	Sb	ANTIMONY
81	204.38	82	207.2	83	208.98
Tl	THALLIUM	Pb	LEAD	Bi	BISMUTH
		114 (289)			
		Uuq			
		UNUNQUADIUM			

Rovnice nábojové neutrality
pro polovodič typu P:

$$n_0 + N_A = p_0 \quad (1)$$

Současně platí vzájemná rovnováha
koncentrací elektronů a děr:

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2 \quad (2)$$

Je-li $N_A \gg n_i$, lze v (1) koncentraci
minoritních elektronů n_0 zanedbat

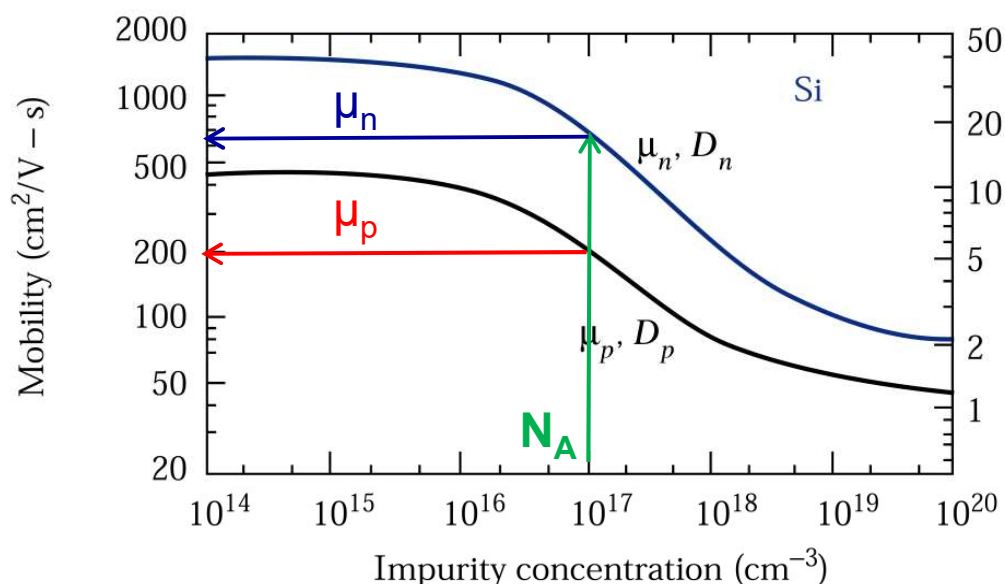
$$p_0 = N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad (3)$$

Dosazením $p_0 = N_A$ do (2) získáme koncentraci
minoritních elektronů

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{2.25 \cdot 10^{20}}{10^{17}} = 2.25 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

C4.1 Transport náboje v polovodiči

Dále je třeba nutné odečíst pohyblivosti elektronů a děr μ_n a μ_p z grafu pro aktuální koncentraci dopantu (nečistot): $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \rightarrow \mu_n = 600$, $\mu_p = 200$ [$\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$].



Po zanedbání proudu elektronů ($n_0 \ll p_0$) je vodivost polovodiče :

$$\sigma = q \mu_p p_0 = 1.6 \times 10^{-19} \cdot 200 \cdot 10^{17} = 3.2 (\Omega\text{cm})^{-1}$$

Proud odporem

$$I = A \sigma E = A \sigma \frac{U}{L} = 100 \times 10^{-8} \cdot 3.2 \frac{10}{0.1} = 320 \mu\text{A}$$

C4.1 Transport náboje v polovodiči

Příklad CP4.2:

Určete hodnotu integrovaného odporu z příkladu CP4.1.

$$L = 1 \text{ mm} = 0.1 \text{ cm} \quad A = 100 \mu\text{m}^2 = 100 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2$$

Velikost odporu vodivé dráhy R je rovna:

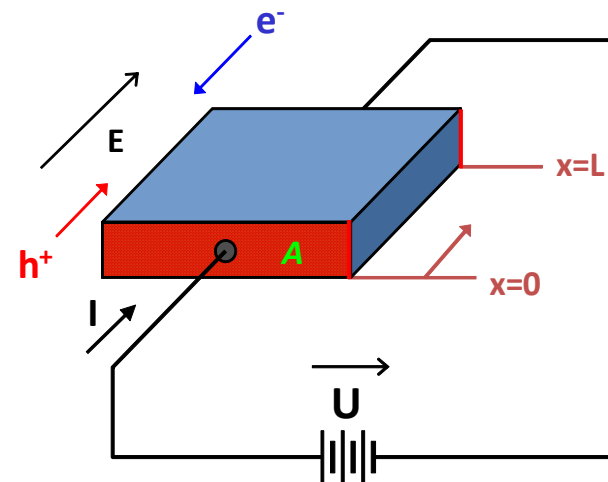
$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Měrný odpor ρ je reciprokou hodnotou vodivosti σ

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{3.2} \Omega\text{cm} = 0.313 \Omega\text{cm}$$

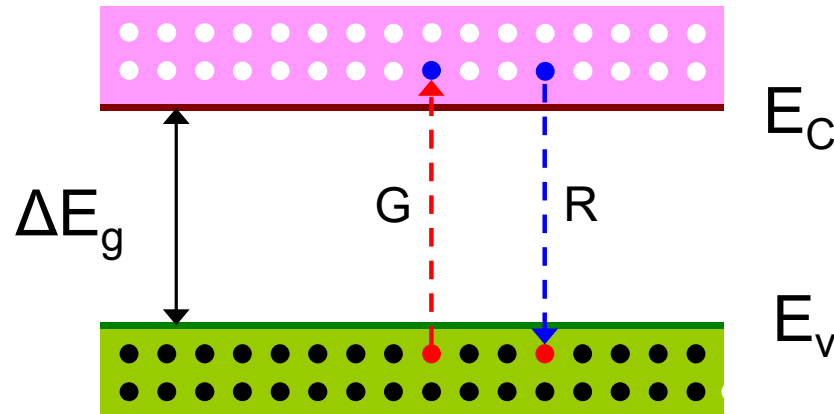
Celkový odpor

$$R = \rho \frac{L}{A} = 0.313 \frac{0.1}{100 \cdot 10^{-8}} = 31.3 \text{ k}\Omega$$



C4.1 Transport náboje v polovodiči

Generace a rekombinace nositelů náboje, doba života



Nábojová rovnováha v polovodiči se ustanovuje **generací** a **rekombinací** elektron-děrových párů

G – rychlost generace: počet párů elektron-díra vytvořených v 1 cm^3 za 1 sekundu

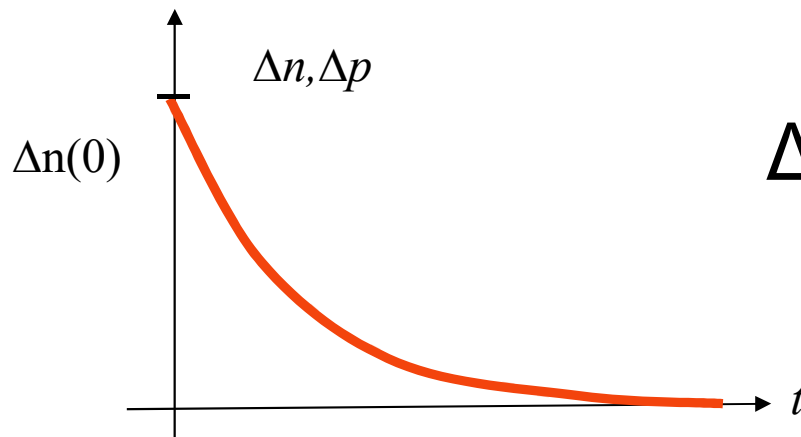
R – rychlost rekombinace: počet párů elektron-díra anihilovaných v 1 cm^3 za 1 sekundu

V tepelné rovnováze:

$$G = R, \quad n_0 = p_0 = n_i, \quad dn/dt = 0$$

V nerovnovážném stavu:

$$\frac{dn}{dt} = G - R = G - \frac{\Delta n}{\tau_n}, \quad \Delta n = n - n_0$$

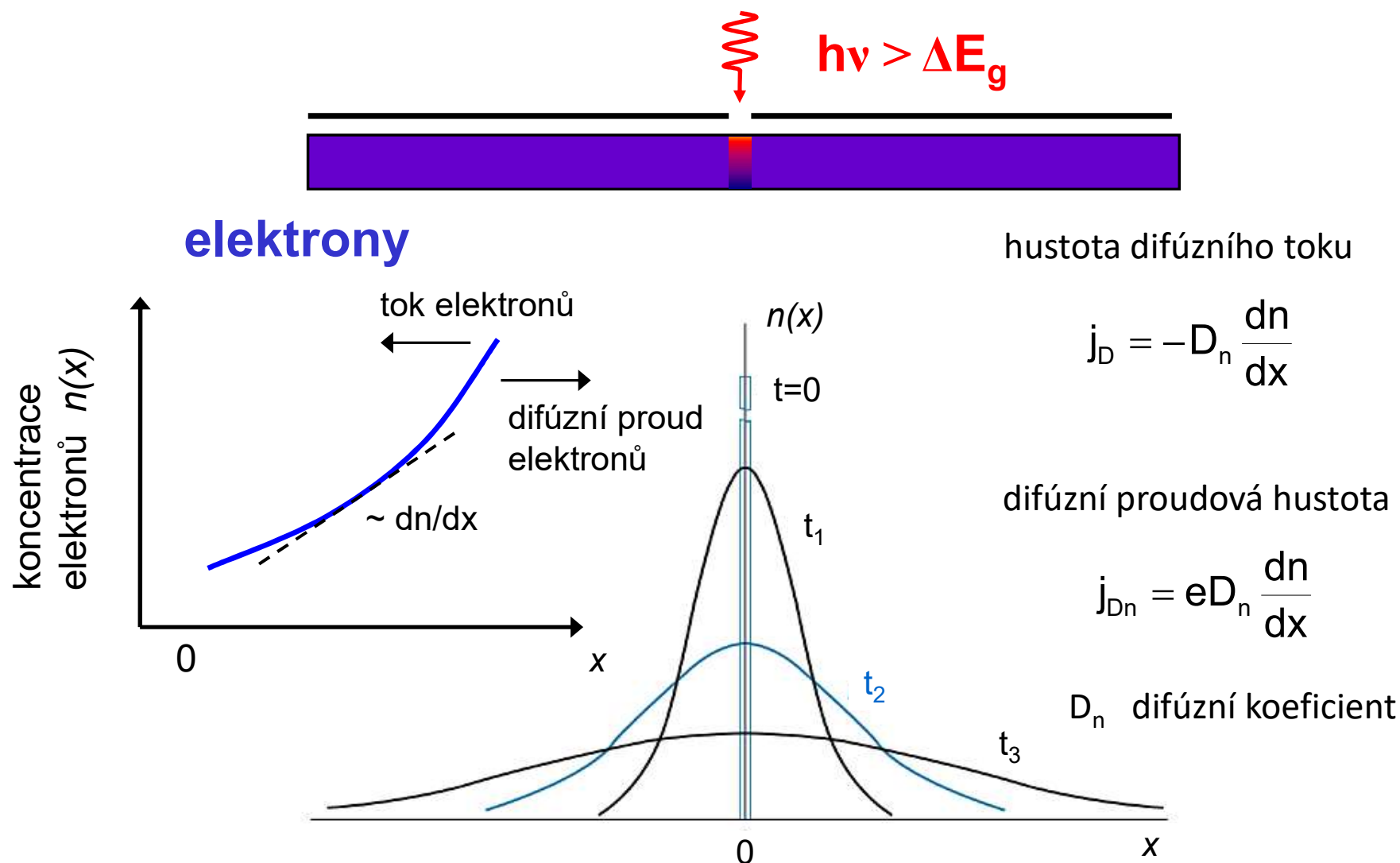


$$\Delta n = \Delta n(0) e^{-t/\tau_n}$$

τ_n .. doba života minoritních nositelů náboje, důležitý parametr udávající rychlost změny koncentrace minoritních nositelů náboje

C4.1 Transport náboje v polovodiči

Difúze nositelů náboje nastává v důsledku nenulového gradientu koncentrace nositelů náboje dn/dx , který může vzniknout např. při lokálním ozáření polovodiče.



C4.1 Transport náboje v polovodiči

Příklad CP4.3:

Tenká destička křemíku typu N ($N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) je homogenně osvětlena zářením, jehož energie fotonů je vyšší než je šířka zakázaného pásu. Světlo je rovnoměrně absorbováno v celém objemu, kde generuje elektronděrové páry s rychlostí $G = 10^{12} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$.

Zjistěte, kolikrát se osvětlením zvýší koncentrace majoritních, resp. minoritních nositelů náboje. Teplota $T = 300\text{K}$, intrinzická koncentrace $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, doba života elektronů $\tau_n = 1 \text{ ms}$.

Řešení: Nejprve určíme rovnovážné koncentrace elektronů a děr. Majoritními nositeli náboje jsou elektrony, dotace N_D je podstatně vyšší než je intrinzická koncentrace křemíku.

$$N_D \gg n_i \Rightarrow n_0 = N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3} \quad p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{2.25 \cdot 10^{20}}{10^{18}} = 2.25 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-3}$$

Pro další řešení využijeme rovnici kontinuity upravenou pro daný případ: homogenní osvětlení – nulový driftový a difúzní proud, v rovnovážném stavu $dn/dt = 0$.

$$\frac{dn}{dt} = G - R = G - \frac{\Delta n}{\tau_n} = 0$$

$$\Delta n = \Delta p = G \cdot \tau_n = 10^{12} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1} \cdot 1 \text{ ms} = 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

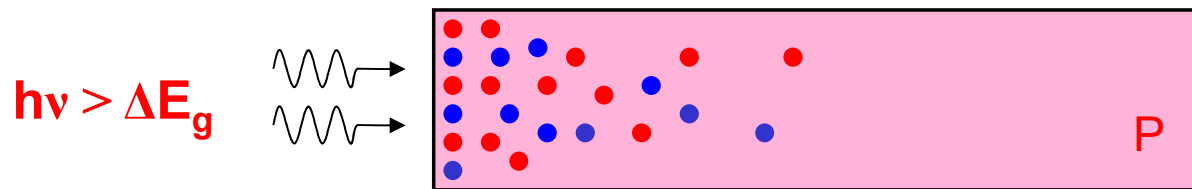
$$n = \Delta n + n_0 = 10^{18} \text{ cm}^{-3} \quad p = \Delta p + p_0 = 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

Koncentrace majoritních elektronů se téměř nezmění, ale koncentrace minoritních děr vzroste o 7 řádů !

C4.1 Transport náboje v polovodiči

Příklad CP4.4:

Dlouhý hranol křemíku typu P ($N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) je osvětlen zleva zářením s energií fotonů vyšší než je šířka zakázaného pásu křemíku. Světlo je absorbováno při povrchu ($x=0$), kde zvýší koncentraci generovaných elektronděrových párů o 10^{13} cm^{-3} . Určete hodnotu proudové hustoty elektronů v hloubce $10 \text{ } \mu\text{m}$. Uvažte pokojovou teplotu $T=300\text{K}$, intrinzickou koncentraci nositelů náboje $n_i=1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, tepelné napětí $u_T=0.026 \text{ mV}$, dobu života elektronů $\tau_n = 1 \mu\text{s}$.



Řešení: uvažujeme nadbytečné nositele ($n = \Delta n + n_0$), oblast je kvazi-neutrální ($E=0$), tj. bez elektrického pole – celkový náboj generovaných párů elektron-díra je nulový:

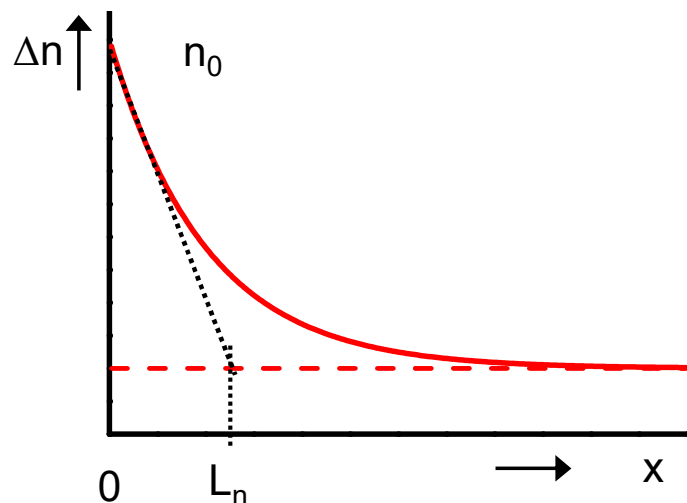
rychlost rekombinace úměrná „době života“ τ_n
$$R_n = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (1)$$

uvažujeme pouze difúzní proud (není el. pole)
$$J_n = e D_n \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \quad (2)$$

system je v ustáleném stavu (dynamické rovnováze)
$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

C4.1 Transport náboje v polovodiči

Řešení rovnice kontinuity (viz přednáška) je ve tvaru



$$\Delta n(x) = \Delta n(0)e^{-x/L_n} \quad (4)$$

kde L_n je tzv. difúzní délka elektronů

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (5)$$

a difúzní koeficient D_n je dán Einsteinovým vztahem

$$D_n = \mu_n u_T \quad (6)$$

Rovnice (2) pro proudovou hustotu elektronů je v jednorozměrném případě

$$J_n = eD_n \frac{dn}{dx} = eD_n \frac{d(n_0 + \Delta n)}{dx} = eD_n \frac{d\Delta n}{dx} \quad (7)$$

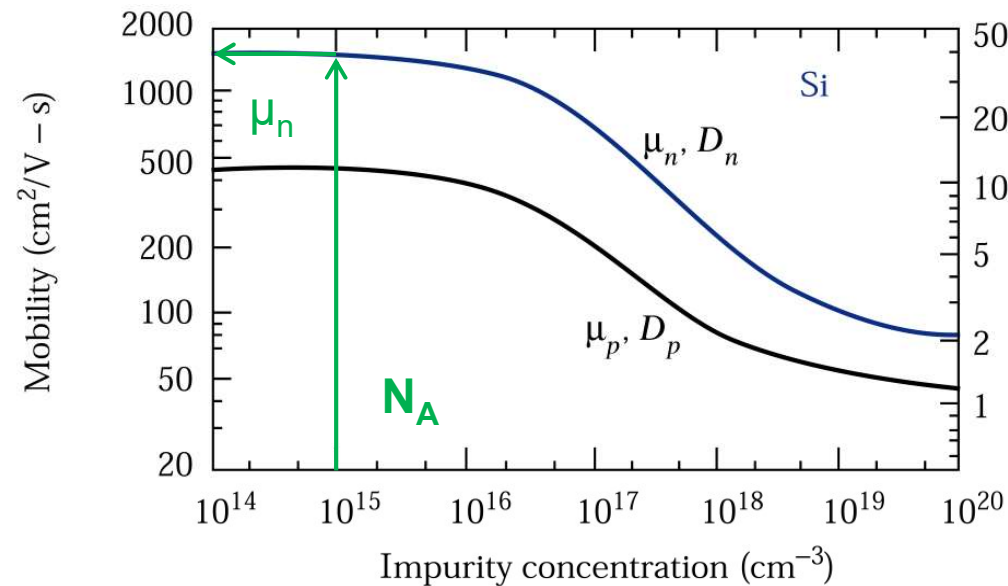
Po dosazení vztahů (4), (5) a (6) a provedení derivace

$$J_n = -\frac{1}{L_n} eD_n \Delta n(0) e^{-x/L_n} \quad (8)$$

C4.1 Transport náboje v polovodiči

Nyní musíme určit hodnoty D_n a L_n a dosadit je do vztahu (8): $J_n = -\frac{1}{L_n} e D_n \Delta n(0) e^{-x/L_n}$

$$\mu_n = 1400 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$$



$$D_n = \mu_n u_T = 1400 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \cdot 0.026 \text{ V} = 36 \text{ cm}^2 \text{s}^{-1}$$

$$L_n = \sqrt{36 \text{ cm}^2 \text{s}^{-1} \cdot 1 \mu \text{s}} = 6 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

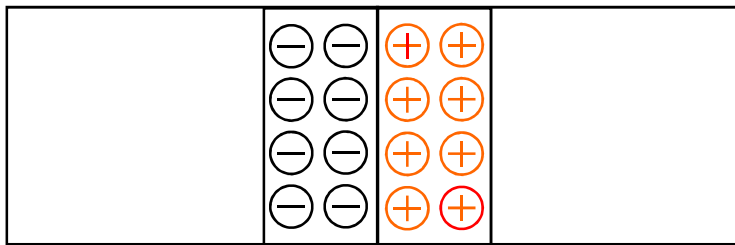
$$J_n = -\frac{1}{6 \times 10^{-3}} 1.6 \times 10^{-19} \cdot 36 \cdot 10^{13} e^{-0.01/6 \times 10^{-3}} = -1.8 \text{ mA/cm}^2$$

C4.2 Přejchod PN

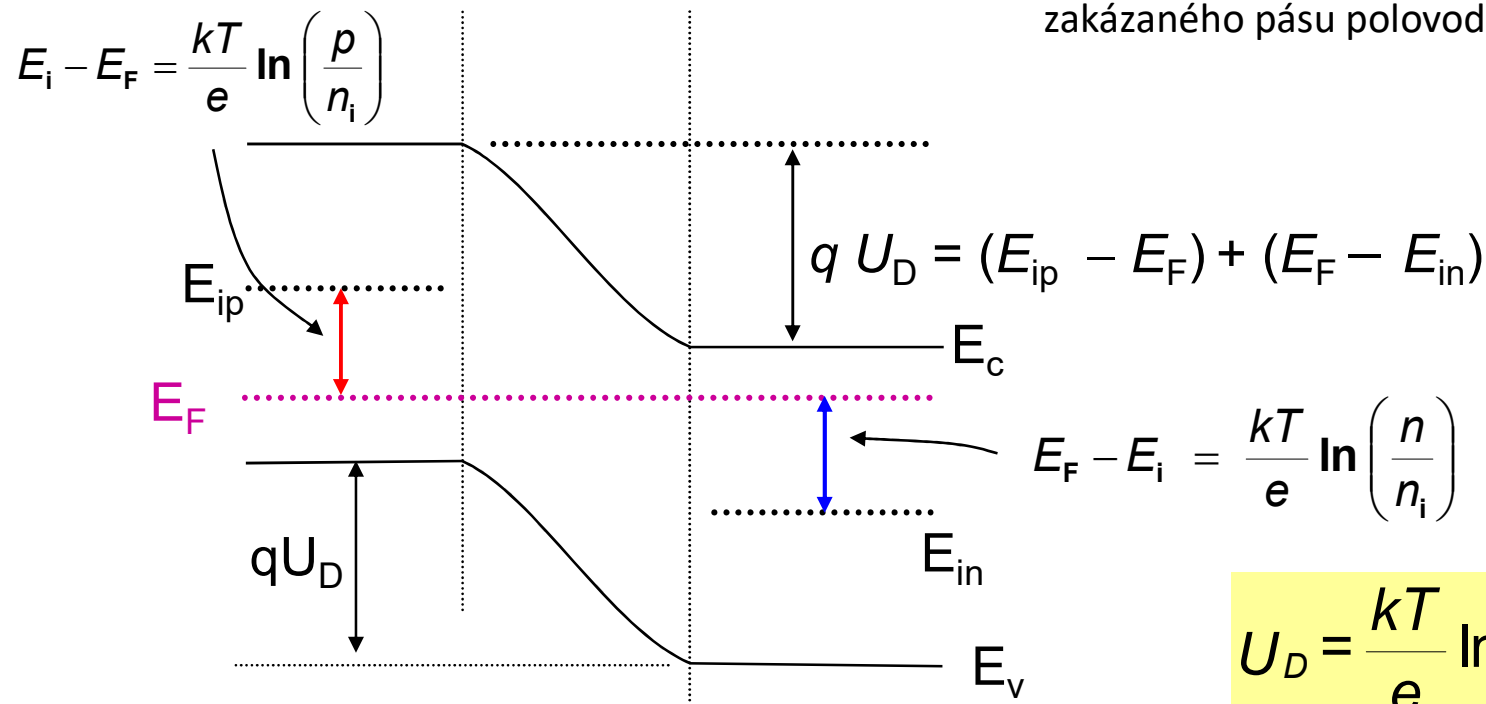
Difúzní napětí přechodu PN , pásový diagram

P-typ

N-typ

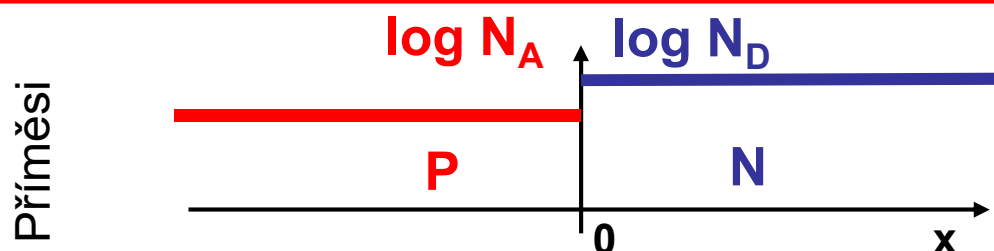


Difúzní napětí je dáno rozdílem výstupních prací (poloh Fermiho hladin v polovodiči N a P). Je závislé na teplotě (dominantní je teplotní závislost n_i) a maximálně může dosáhnout hodnoty odpovídající šířce zakázaného pásu polovodiče $E_g = E_c - E_v$.

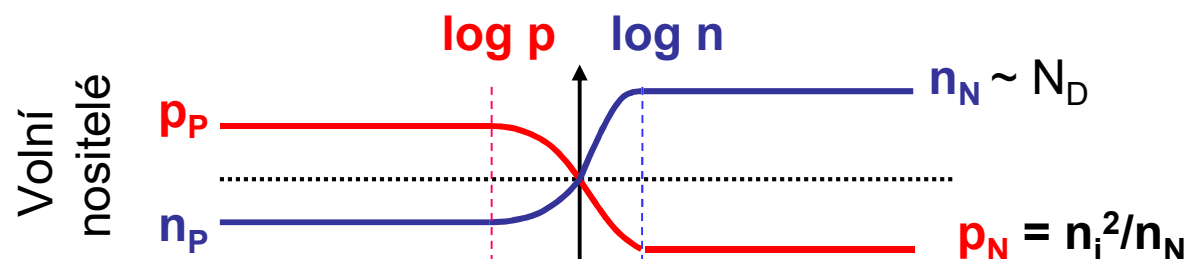


$$U_D = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

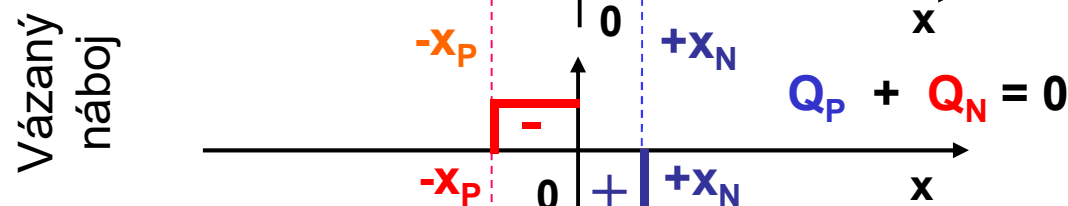
C4.2 Přejchod PN



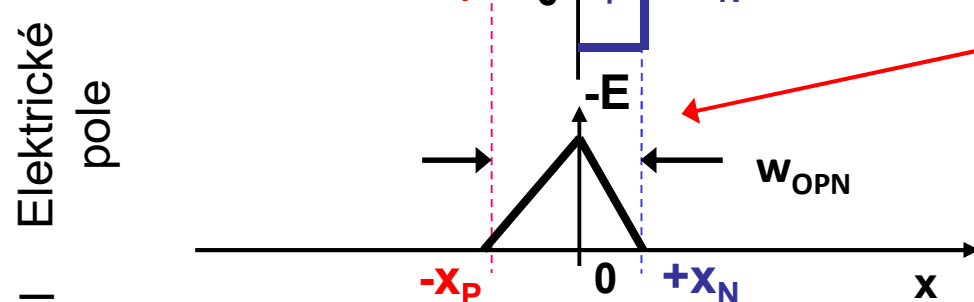
Na přechodu vzniká nábojová dvojvrstva (oblast prostorového náboje - OPN) bez volných nositelů. Její rozšíření směrem do oblasti P (x_p) a N (x_n) je dáno poměry dotací.



$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

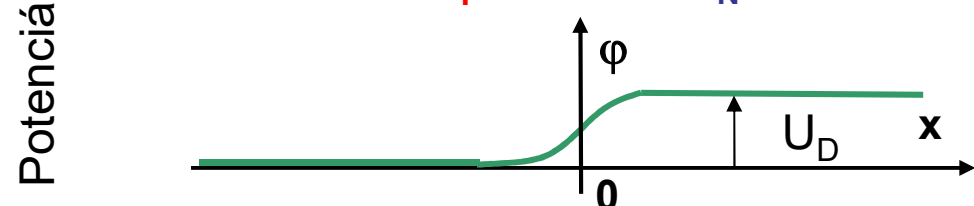


S nekompenzovaným nábojem je spojeno elektrické pole, jehož intenzita E je maximální uprostřed přechodu.



$$E_{\max} = -e N_A x_p / \epsilon = -e N_D x_n / \epsilon$$

Šířka OPN w_{OPN} závisí na dotaci a zabudovaném (přiloženém) napětí.



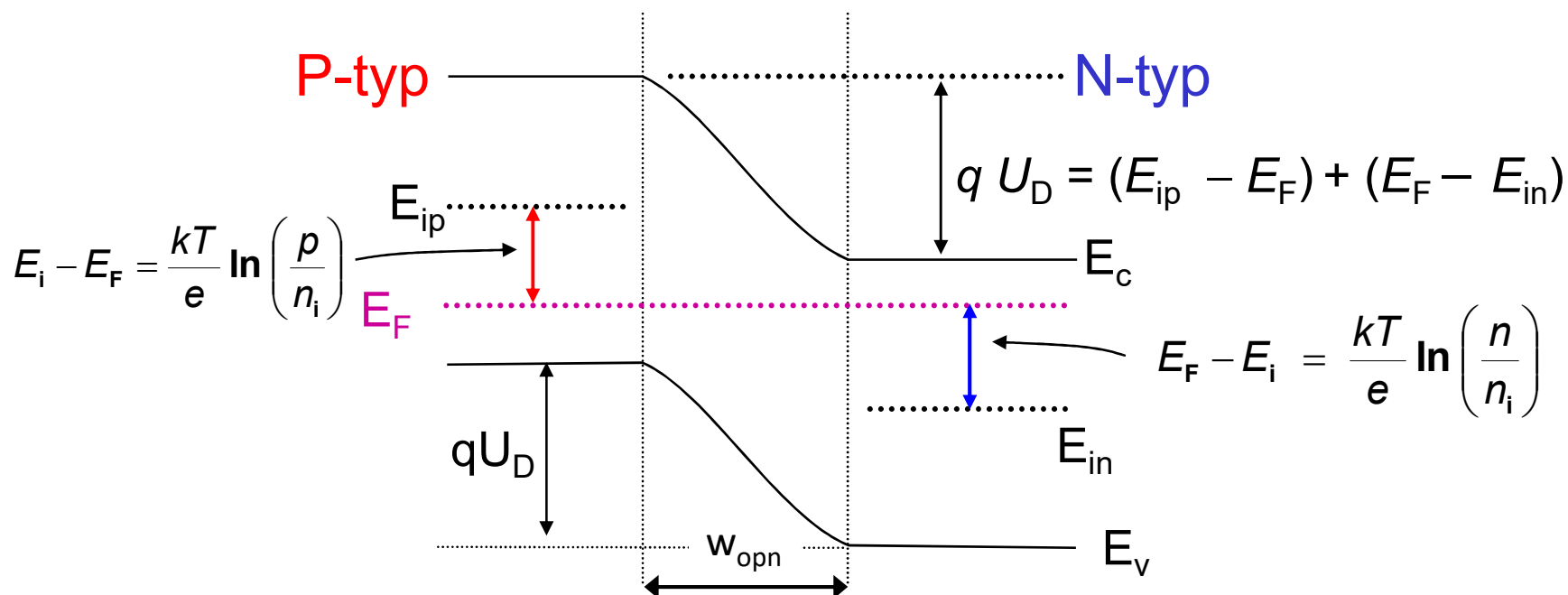
$$w_{OPN} = x_N + x_P = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s U_D}{e} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)}$$

$$U_D = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

C4.2 Přejchod PN

Příklad CP4.5:

Určete difúzní napětí strmého přechodu PN v křemíku při teplotě 300 K. Koncentrace akceptorů a donorů jsou $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ a $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Určete šířku oblasti prostorového náboje ($\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$, $\epsilon_{Si} = 11.8$, $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $u_T = kT = 0.0259 \text{ V}$).



Difúzní napětí je dáno rozdílem poloh intrinzických hladin v polovodiči P a N po jejich spojení (odpovídá rozdílu poloh Fermiho hladin v polovodiči P a N před spojením).

Poloha Fermiho hladiny v části P:

$$E_{ip} - E_F = kT \ln \frac{p_p}{n_i} = 0.0259 \ln \frac{10^{18}}{1,5 \cdot 10^{10}} = 0,467 \text{ eV}$$

předpokládáme $p_p = N_A$

C4.2 Přejchod PN

Poloha Fermiho hladiny v části N: $E_F - E_{in} = kT \ln \frac{n_n}{n_i} = 0.0259 \ln \frac{5 \cdot 10^{15}}{1,5 \cdot 10^{10}} = 0,329 \text{ eV}$
předpokládáme $n_n = N_D$

Difúzní napětí:

$$U_D = \frac{E_F - E_{in} + E_{ip} - E_F}{e} = 0,329 + 0,467 = 0,796 \text{ V}$$

Hodnotu difúzního napětí lze také spočítat přímo z upraveného vztahu: $U_D = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$

Šířka OPN je dána dotací přechodu a hodnotou difúzního napětí

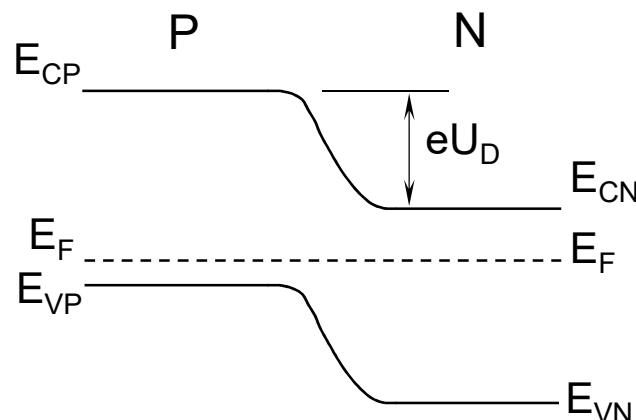
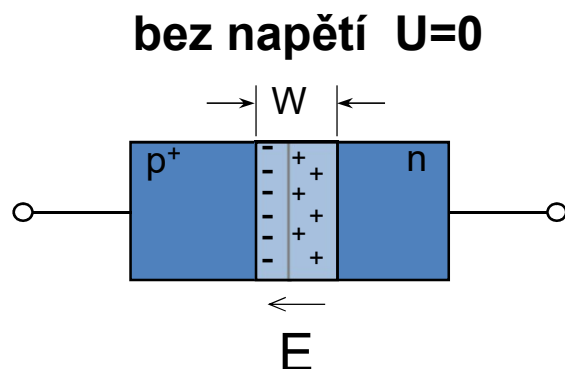
$$W_{OPN} = x_N + x_P = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_{Si} \varepsilon_0 U_D}{e} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)}$$

Je-li výrazný nepoměr mezi dotacemi P a N, OPN se rozšiřuje především do slaběji dotovaného materiálu. V našem případě $N_A \gg N_D$, šířku oblasti x_p lze tedy zanedbat.

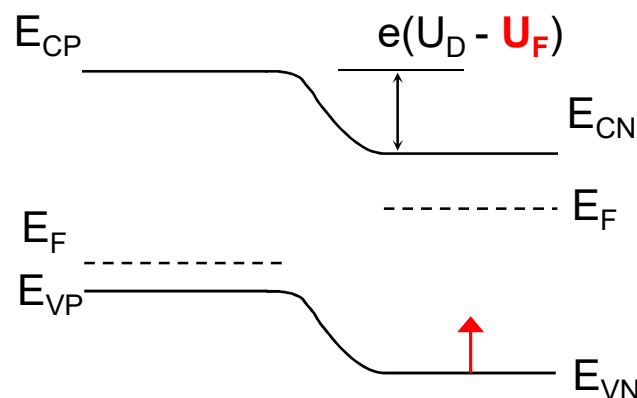
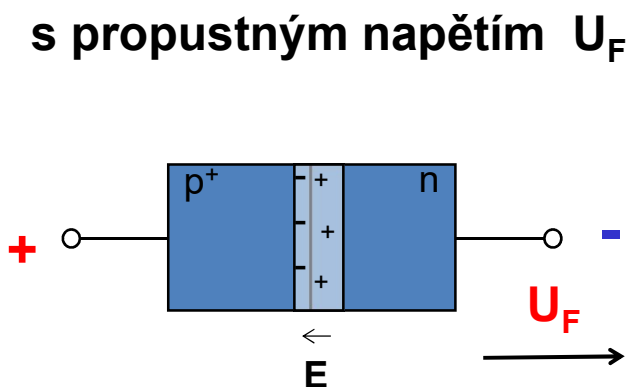
$$W_{OPN} \cong x_n = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_{Si} \varepsilon_0 U_D}{e N_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 0,796}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{15}}} = 455 \text{ nm}$$

C4.2 Přejchod PN

Přejchod PN s napětím přiloženým v propustném směru



Přiložením napětí U_F v propustném směru se sníží potenciálová bariéra, zúží OPN a zvýší se pravděpodobnost injekce minoritních nositelů.

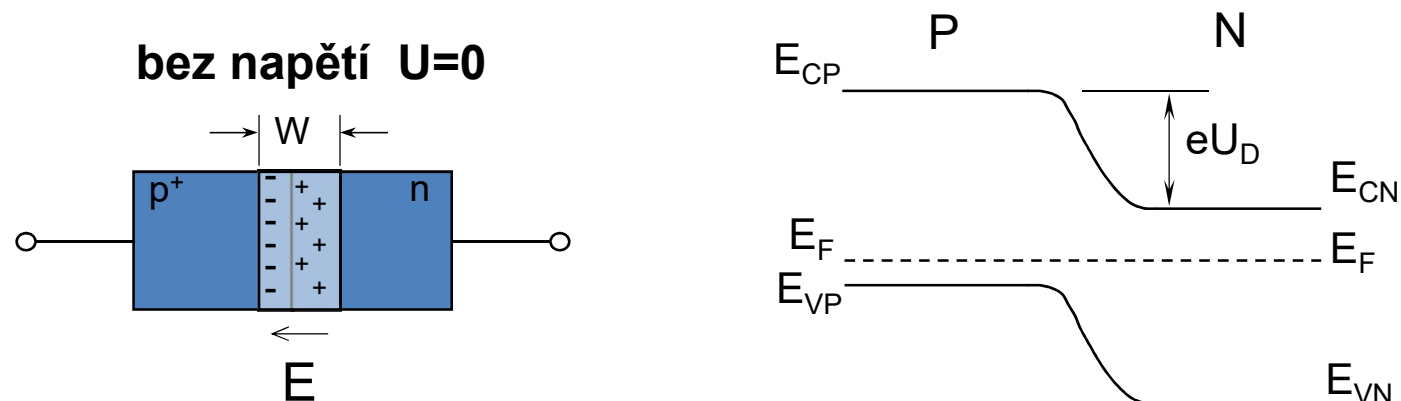


Po snížení potenciálové bariéry množství injektovaných minoritních nositelů exponenciálně narůstá.

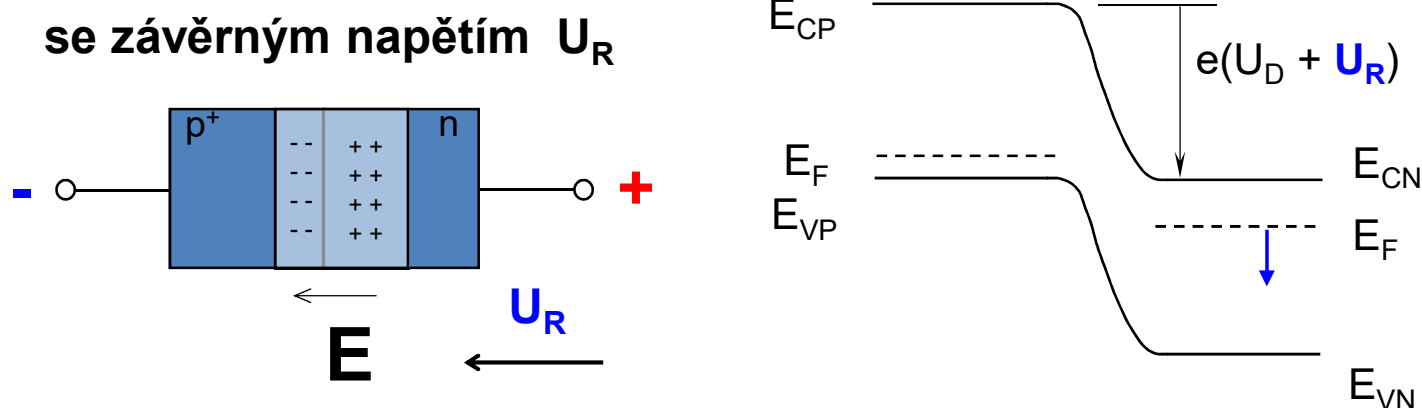
$$n_p = n_{p0} \cdot e^{\frac{U_F}{U_T}}$$

C4.2 Přejchod PN

Přejchod PN s napětím přiloženým v závěrném směru



Přiložením napětí U_R v závěrném směru dochází ke zvýšení potenciálové bariéry, OPN se rozšiřuje a prochází pouze nepatrný proud minoritních nositelů (driftový).



$$W_{\text{OPN}} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{\text{Si}} \epsilon_0 (U_R + U_D)}{e} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)}$$

$$E_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 e N_D (U_R + U_D)}{\epsilon_{\text{Si}} \epsilon_0}}$$

C4.2 Přechod PN

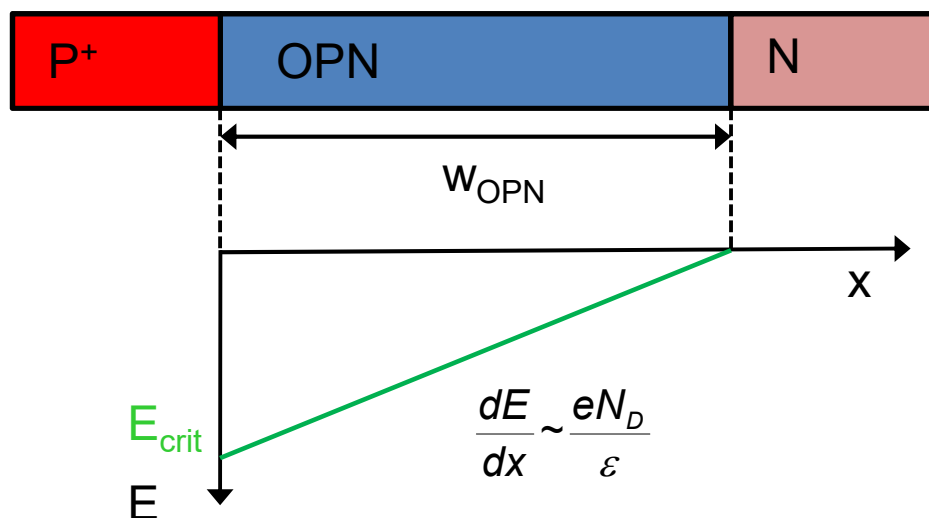
Příklad CP4.6:

Určete průrazné napětí U_{BR} strmého přechodu P^+N v křemíku při teplotě 300 K ($N_D = 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$, $\epsilon_{Si} = 11.8$). Jak široká bude oblast prostorového náboje v okamžiku průrazu ?

Řešení:

Diody se většinou proráží lavinovým průrazem ($U_{BR} > 5V$), ke kterému dochází pokud v OPN přesáhne intenzita elektrického pole E kritickou hodnotu E_{crit} .

Náš přechod je nesymetrický, úbytek napětí vzniká především na slabě dotované N-vrstvě.



Gaussova věta

gradient intenzity el. pole je roven podílu koncentrace náboje a permitivity

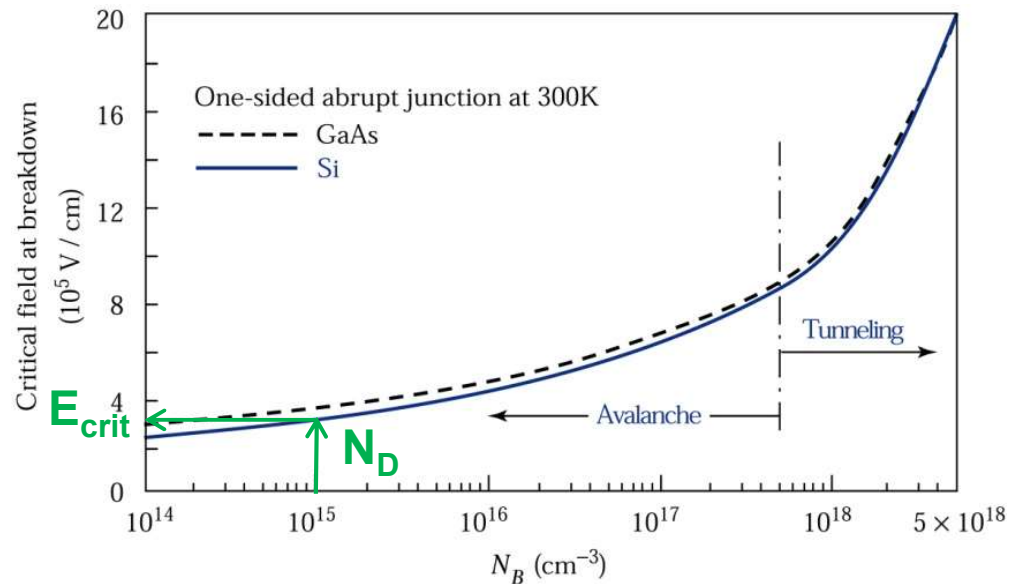
šířka oblasti prostorového náboje

$$w_{OPN} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}(U_D+U_R)}{eN_D}} \quad (1)$$

maximální intenzita elektrického pole

$$E_{crit} = \frac{dE}{dx} w_{OPN} = \frac{eN_D}{\epsilon_0\epsilon_{Si}} w_{OPN} \quad (2)$$

C4.2 Přechod PN



Průraz v slabě dotované N vrstvě bude lavinový (viz graf) při $E_{crit} = 3 \times 10^5 \text{ V/cm}$.
 Při lavinovém průrazu je $U_{BR} = U_R > 5 \text{ V}$. Lze tedy předpokládat, že $U_R \gg U_D \sim 0.6 \text{ V (Si)}$.
 Kombinací rovnic (1) a (2) a zanedbáním U_D získáme:

$$E_{crit} = \frac{eN_D}{\epsilon_0 \epsilon_{Si}} w_{OPN} = \frac{eN_D}{\epsilon_0 \epsilon_{Si}} \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_{Si} U_{BR}}{eN_D}} = \sqrt{\frac{2eN_D U_{BR}}{\epsilon_0 \epsilon_{Si}}}$$

$$U_{BR} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{Si}}{2eN_D} E_{crit}^2 = \frac{8.85 \times 10^{-14} \cdot 11.8}{2 \cdot 1.6 \times 10^{-19} \cdot 10^{15}} (3 \times 10^5)^2 = 293 \text{ V}$$

$$w_{OPN_{max}} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_{Si} U_{BR}}{eN_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8.85 \times 10^{-14} \cdot 11.8 \cdot 293}{1.6 \times 10^{-19} \cdot 10^{15}}} = 1.96 \times 10^{-3} \text{ cm} = 19.6 \mu\text{m}$$

C4.2 Přebod PN

1. Nutná instalace Wolfram Player

<https://www.wolfram.com/player/>

2. Demonstrační projekty naleznete na

<https://demonstrations.wolfram.com/>

Pro transport a PN přechod jsou vhodné projekty:

BandStructureOfPNJunctionSemiconductor.cdf

MechanismOfASolarCell.cdf

