

# Vlastnosti PN přechodu, fotovoltaický jev

A1B13SVS

# Absorpce světla materiálem

Pokud na povrch materiálu dopadá světlo o intenzitě  $\Phi_{in}$ , část světla o intenzitě  $\Phi_0$  vstoupí do objemu materiálu.

$$\Phi_0 = \Phi_{in} (1 - \mathcal{R})$$

$\mathcal{R}$  je odrazivost (reflexivita) povrchu

Při průchodu světla materiálem intenzita klesá se vzdáleností od povrchu.

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\alpha x) = \Phi_0 \exp\left(-\frac{x}{x_L}\right)$$

$\alpha$  je tzv. absorpční koeficient

$x_L = \frac{1}{\alpha}$  je tzv. **absorpční délka**

$$x=x_L \quad \Phi(x_L) = 0.38 \Phi_0$$

$$\int_0^{x_L} \Phi(x) dx = 0.68 \int_0^{\infty} \Phi(x) dx$$

Absorpce fotonu znamená předání jeho energie částicím materiálu.

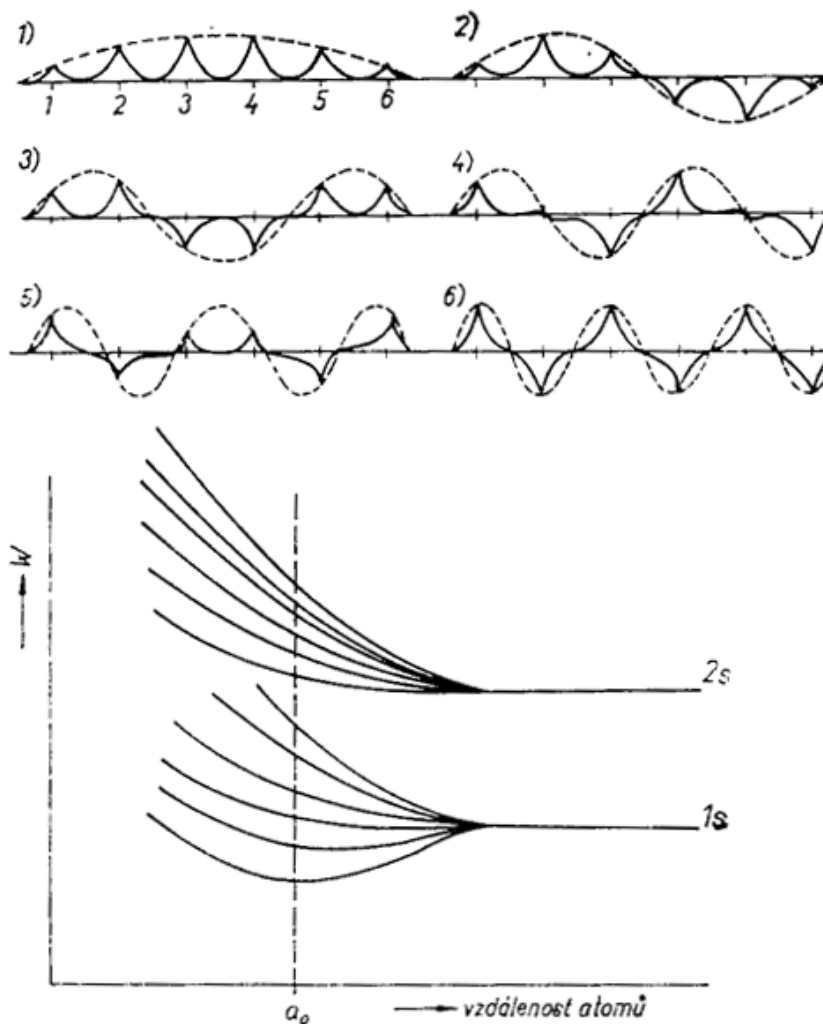
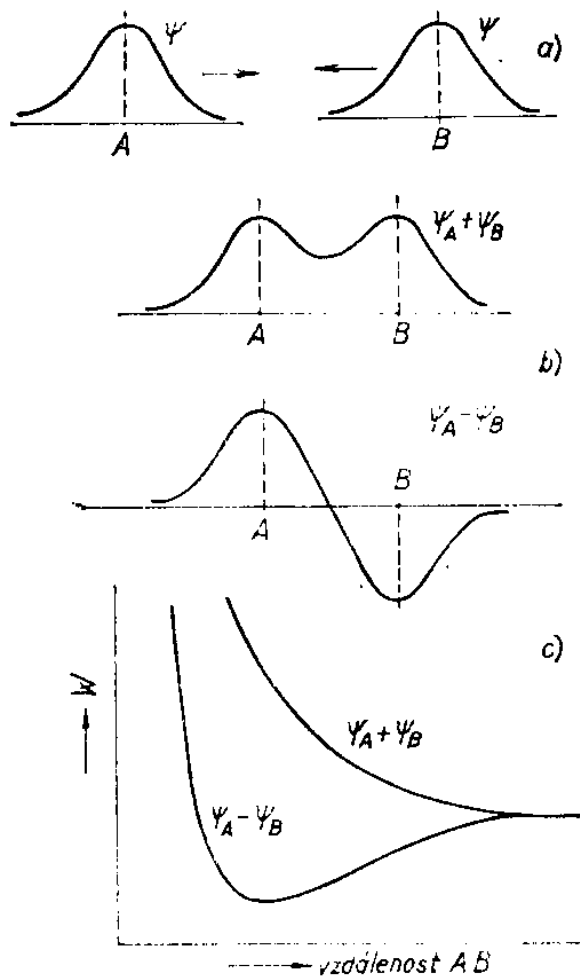
# Absorpce světla materiálem

Absorpce je způsobena interakcí světla s částicemi hmoty (elektrony a jádry).  
Je-li energie částice před interakcí  $W_1$ , po absorpci fotonu je energie zvýšena o energii fotonu:  $W_1 + h\nu$

- **interakce s mřížkou**
    - **nízkoenergetické fotony, následkem je zvýšení teploty**
  - **interakce s volnými elektrony**
    - **zvýšení teploty**
  - **interakce s vázanými elektrony**
    - **může dojít k uvolnění elektronu z vazby, vznik volných nosičů náboje**
- } **Solar Thermal – generace tepla**

Může dojít k vytvoření rozdílu potenciálu – **Fotovoltaický jev**

# Pásový model atomu



# Základní vlastnosti polovodičů

Volné nosiče náboje

- elektrony	-e	$m_n$	$n$
- díry	+e	$m_p$	$p$

V termodynamické rovnováze platí

$$n \cdot p = N_c N_v \exp(-W_g/kT) = n_i^2$$

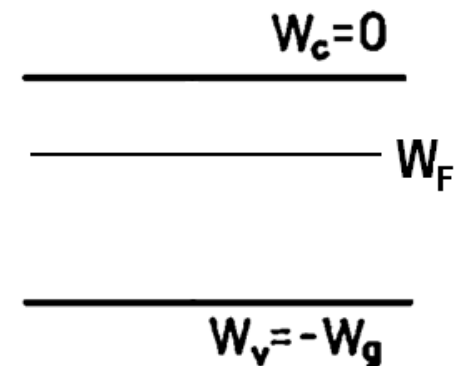
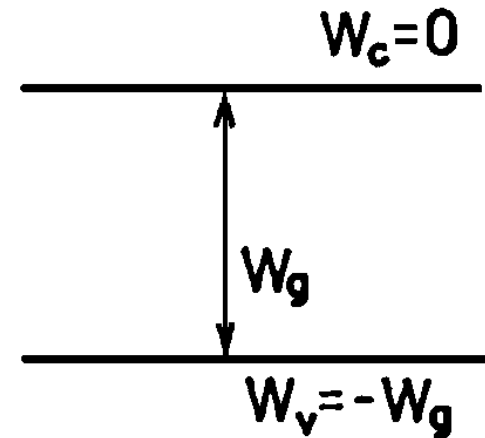
Koncentrace nosičů je možno vyjádřit pomocí Fermiho energie  $W_F$

$$n = N_c \exp(W_F/kT)$$

$$p = N_v \exp[(-W_g - W_F)/kT]$$

$N_c$  je hustota stavů ve vodivostním pásu

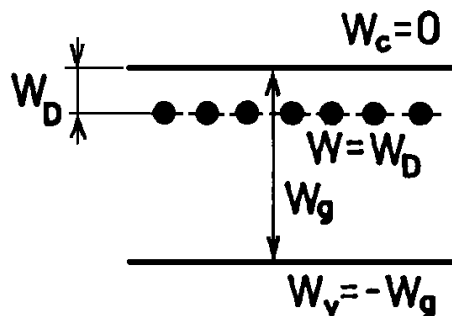
$N_v$  je hustota stavů ve valenčním pásu



# Příměsové polovodiče

dotace donory

typ N

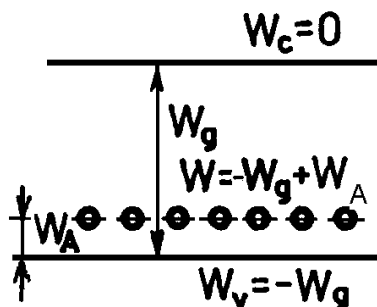


$$n = N_D$$

$$p_N = n_i^2 / N_D$$

dotace akceptory

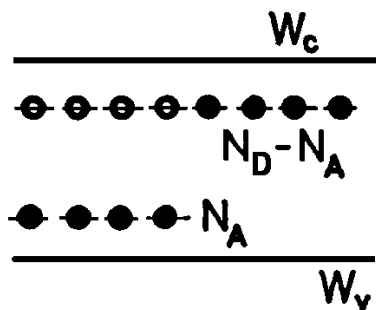
typ P



$$p = N_A$$

$$n_P = n_i^2 / N_A$$

kompenzovaný  
polovodič, obsahující  
donory i akceptory



$$N_D > N_A \text{ typ N}$$

$$n = N_D - N_A$$

$$N_A > N_D \text{ typ P}$$

$$p = N_A - N_D$$

# Konduktivita polovodičů

Nosiče náboje mají termickou rychlost  $v_{th}$

$$W_{kin} = \frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} m^* v_{th}^2$$

Pokud je přiloženo elektrické pole, volné nosiče jsou urychlovány

$$\vec{v}_{dn} = \mu_n \vec{E}, \quad \vec{v}_{dp} = \mu_p \vec{E}$$

Polovodičem prochází proud o hustotě

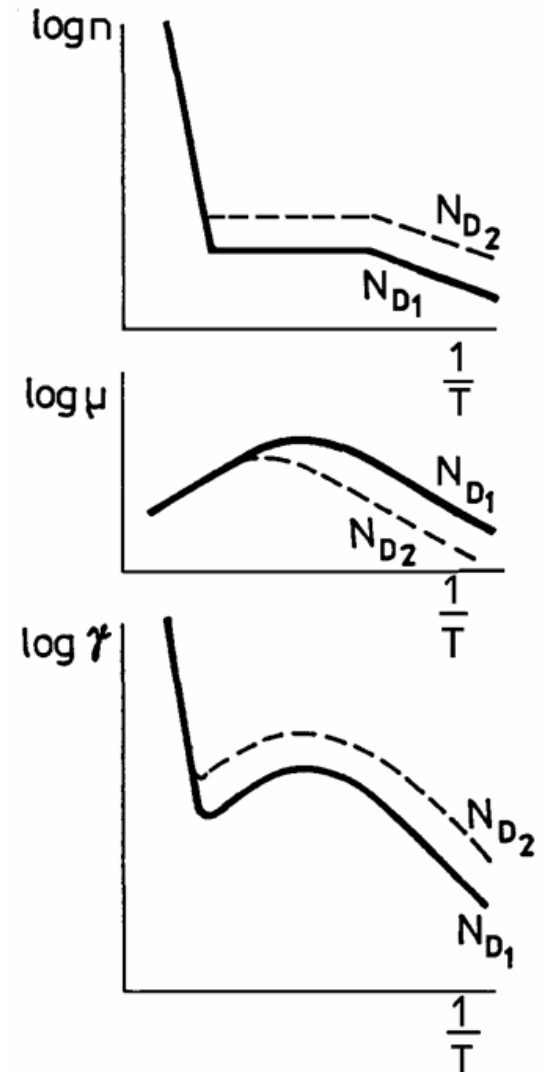
$$\vec{J} = \vec{J}_p + \vec{J}_n = e(n\mu_n + p\mu_p) \vec{E} = \gamma \vec{E}$$

Konduktivita  $\gamma$  je vyjádřena

$$\gamma = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

V oblasti běžných provozních teplot polovodičových součástek pohyblivost klesá s rostoucí teplotou, tedy odpor s rostoucí teplotou roste

U křemíku je  $3/2 < r < 5/2$   $\mu \sim T^{-r}$

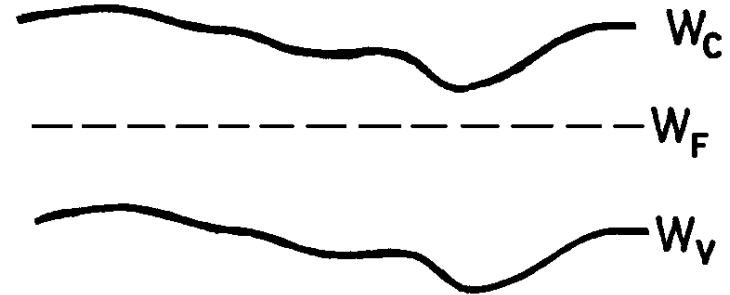


# Polovodiče s nehomogenní dotací

Poloha Fermiho energie  $W_F$  v zakázaném pásu závisí na koncentraci příměsí

$$W_F - W_C = kT \ln \frac{N_D}{N_C}$$

Jestliže se mění koncentrace příměsí s prostorovou souřadnicí, mění se rovněž potenciální energie volných nosičů náboje:



$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi = \frac{1}{e} \text{grad } (W_F - W_C) = \frac{kT}{e} \frac{1}{n} \text{grad } n$$

U polovodiče typu P

$$\vec{E} = -\frac{kT}{e} \frac{1}{p} \text{grad } p$$

Vnitřní elektrické pole vzniká rovněž při porušení elektroneutality

$$\text{div } \vec{E} = -\text{div grad } U = e(p - n + N_D - N_A) / \epsilon_r \epsilon_0$$

Pokud existuje vnitřní elektrické pole, mohou nastat odchylky od Ohmova zákona

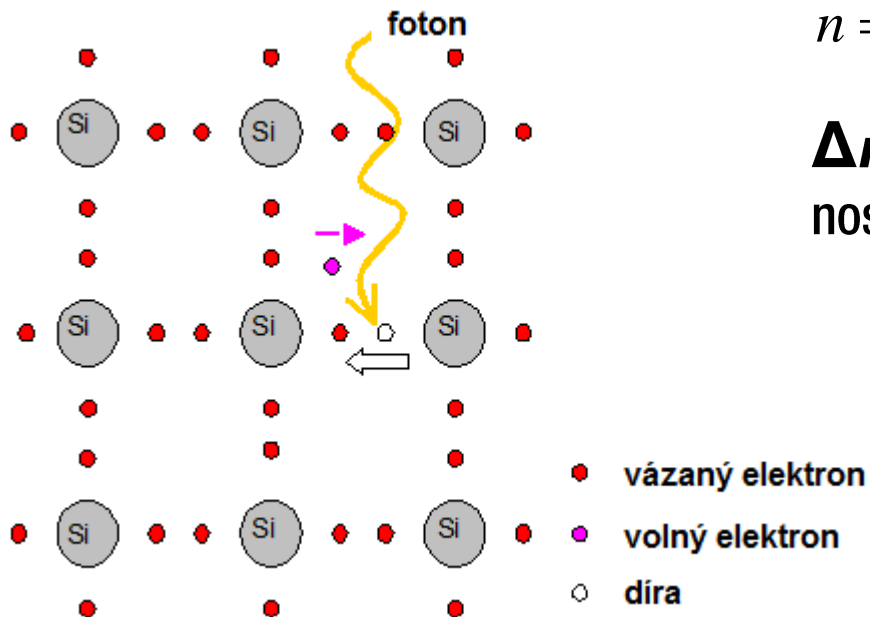


# Interakce se zářením

**V termodynamické rovnováze** (neosvětlený polovodič)

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{W_F}{kT}\right) \quad n_0 p_0 = n_i^2 = BT^3 \exp\left(\frac{-W_g}{kT}\right) = N_c N_v \exp\left(\frac{-W_g}{kT}\right)$$

**Po interakci s fotony s energií  $h\nu > W_g$**



$$n = n_0 + \Delta n, \quad p = p_0 + \Delta p \quad np > n_i^2$$

**$\Delta n, \Delta p$**  - koncentrace nerovnovážných nosičů (není termodynamická rovnováha)

**$\Delta n = \Delta p$**  - jsou generovány páry elektron-díra

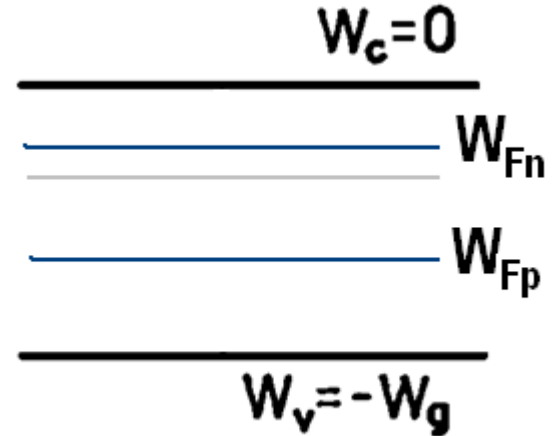
# Interakce se zářením

Interakcí se zářením dochází k porušení termodynamické rovnováhy a nelze již definovat Fermiho hladinu  $W_F$

$$n = (n_0 + \Delta n) = N_c \exp\left(\frac{W_{Fn}}{kT}\right)$$

$$p = (p_0 + \Delta p) = N_v \exp\left(\frac{-W_g - W_{Fp}}{kT}\right)$$

$$np = (n_{p0} + \Delta n)(p_{p0} + \Delta p) = n_i^2 \exp\left(\frac{\Delta W}{kT}\right)$$

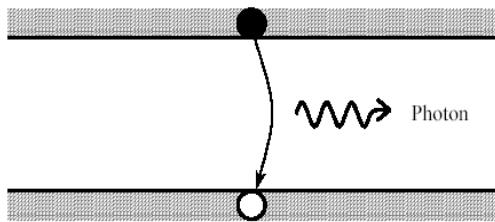


$$\Delta W = W_{Fn} - W_{Fp}$$

# Rekombinace nerovnovážných nosičů

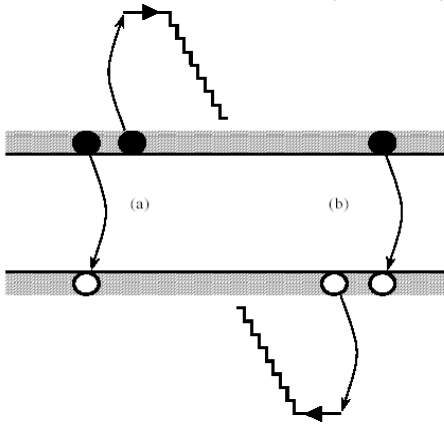
Doba života nerovnovážných nosičů -  $\tau$

$$\left( \frac{d\Delta n}{dt} \right)_{rec} = -\frac{\Delta n}{\tau}$$



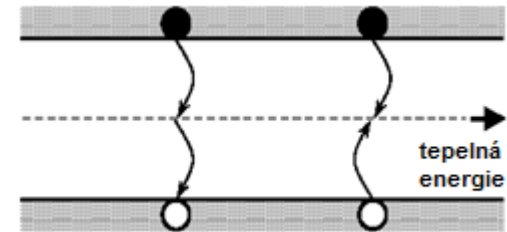
*zářivá rekombinace*

$$\tau_r = \frac{1}{C_r N}$$



*Augerova rekombinace*

$$\tau_A = \frac{1}{C_{An} N_D^2}$$



*rekombinace pomocí lokálních center*

$$\tau_t = \frac{1}{C_t N_t}$$

**Výsledná doba života nosičů**

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_t}$$

# Koncentrace nerovnovážných nosičů

S gradientem koncentrace nosičů je spojen difúzní proud:

$$J_{ndif} = eD_n \frac{dn}{dx} \quad D_n = kT\mu_n/e \quad J_{pdif} = -eD_p \frac{dp}{dx} \quad D_p = kT\mu_p/e$$

Rozložení koncentrace nosičů náboje - rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - \frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{e} \frac{d}{dx} J_n \quad \frac{\partial p}{\partial t} = G_p - \frac{\Delta p}{\tau_p} - \frac{1}{e} \frac{d}{dx} J_p$$

V dynamické rovnováze:  $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$

$$\frac{d^2 \Delta n}{dx^2} = \frac{\Delta n}{L_n^2} - \frac{G(\lambda; x)}{D_n} \quad \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{L_p^2} - \frac{G(\lambda; x)}{D_p}$$

Obvykle je  $\tau_n = \tau_p = \tau$

$L_n = \sqrt{D_n \tau}$  - difúzní délka elektronů

$L_p = \sqrt{D_p \tau}$  - difúzní délka děr

Rozložení koncentrace nosičů je možno stanovit řešením rovnice kontinuity za vhodných okrajových podmínek.

# Vlastnosti přechodu PN

Na přechodu PN vzniká energ. bariéra  $eU_{\text{diff}}$  :

$$U_{\text{diff}} = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2} \right)$$

Pokud je na oblast typu N přiloženo záporné napětí, energetická bariéra se sníží na hodnotu  $e(U_{\text{diff}} - U)$

- V typu P na  $n = n_{p0} + \Delta n$
- V typu N na  $p = p_{n0} + \Delta p$

$$np = (n_{p0} + \Delta n(0))(p_{p0} + \Delta p(0)) = n_i^2 \exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$$

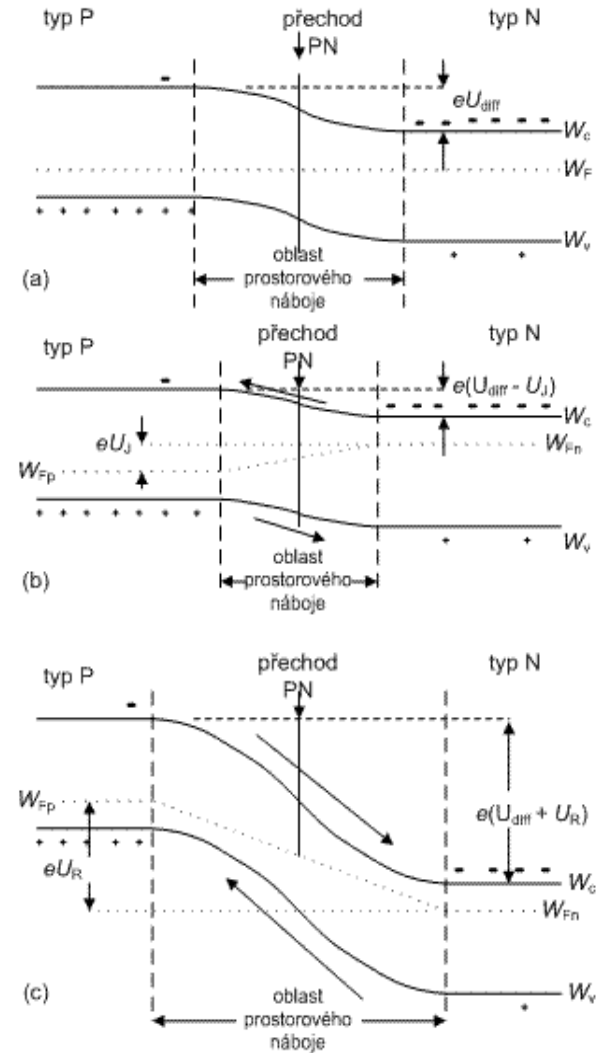
• Pro  $\Delta n \ll p_{p0}$   $np = (n_{p0} + \Delta n(0))p_{p0} = n_i^2 \exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$

Pak platí - v typu P

$$\Delta n(0) = n_{p0} \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$

- v typu N

$$\Delta p = p_{n0} \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$



# Vlastnosti přechodu PN

Elektrony v oblasti typu P difundují směrem od přechodu PN, a přitom v oblasti typu P rekombinují, rychlost rekombinace je charakterizována dobou života elektronů  $\tau_n$

V jednorozměrném případě a ustáleném stavu ( $\partial n/\partial t = 0$ ) je pak

$$D_n \frac{d^2(\Delta n)}{dx^2} = \frac{\Delta n}{\tau_n}$$

V typu P, pro neomezenou tloušťku oblasti typu P, je řešením

$$\Delta n(x) = \Delta n(0) \exp\left(\frac{-x}{L_n}\right)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad L_n - \text{difúzní délka}$$

hustota proudu elektronů v typu N

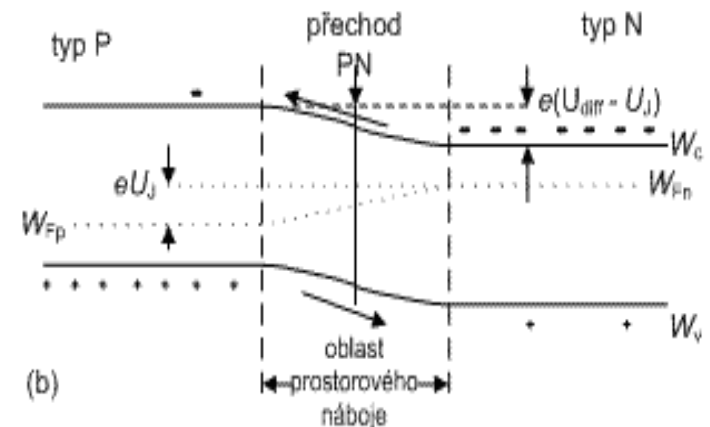
$$J_n = eD_n \left. \frac{d(\Delta n)}{dx} \right|_{x=0}$$

hustota proudu děr v typu N

$$J_p = -eD_p \left. \frac{d(\Delta p)}{d\xi} \right|_{\xi=0}$$

$$J = J_n + J_p = e \left( \frac{D_n}{L_n} n_{P0} + \frac{D_p}{L_p} p_{N0} \right) \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$J = n_i^2 e \left( \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{p_{P0}} + \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{n_{N0}} \right) \left[ \exp\left(\frac{eU_J}{kT}\right) - 1 \right] = J_0 \left[ \exp\left(\frac{eU_J}{kT}\right) - 1 \right]$$



# Vlastnosti přechodu PN

Nelze-li tloušťku  $d$  oblasti prostorového náboje zanedbat, je třeba uvažovat generaci párů elektron-díra v této oblasti. Rychlost generace nosičů je dána vztahem:  $G = \frac{n_i}{\tau_{sc}}$

V oblasti prostorového náboje je tak generován proud o hustotě  $J_{gr} = e \int_0^d G dx$

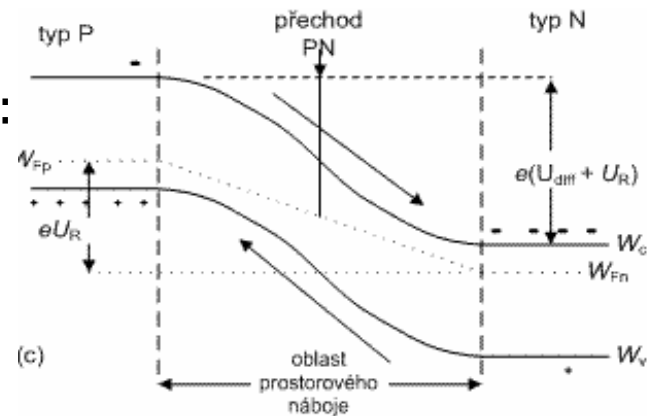
Hustotu generačně-rekombinačního proudu  $J_{gr}$  lze aproximovat vztahem:

$$J_{gr} = \frac{en_i d(U)}{\tau_{sc}} \left[ \exp\left(\frac{eU}{\zeta kT}\right) - 1 \right]$$

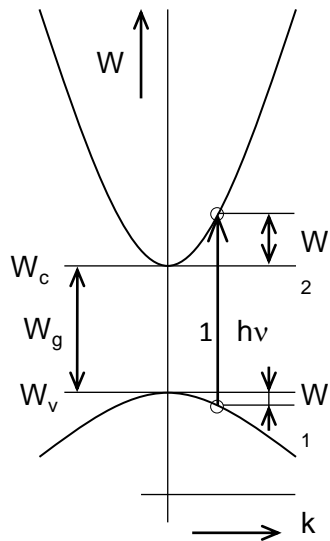
**Generačně-rekombinační proud je tvořen majoritními nosiči náboje.**

Celková hustota proudu přechodem PN je pak dána vztahem:

$$J = n_i^2 e \left( \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{p_{p0}} + \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{n_{n0}} \right) \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] + \frac{en_i d(U)}{\tau_{sc}} \left[ \exp\left(\frac{eU}{\zeta kT}\right) - 1 \right]$$

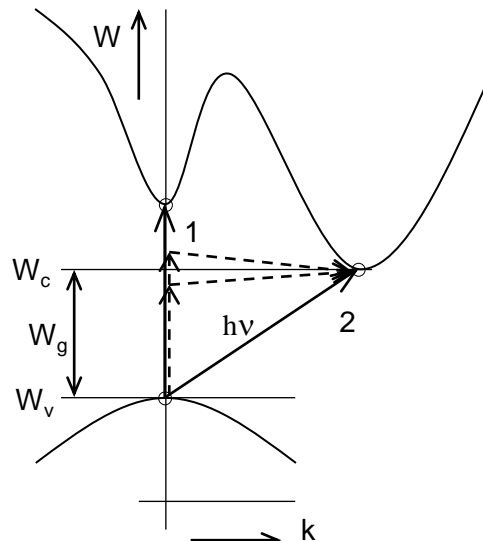


# Generace nerovnovážných nosičů náboje

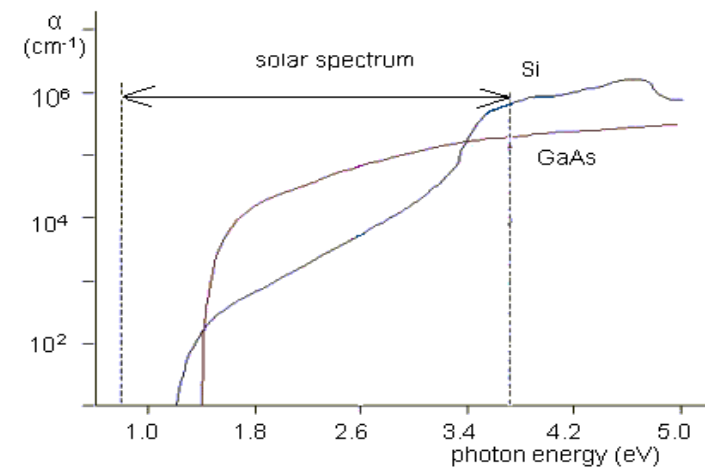
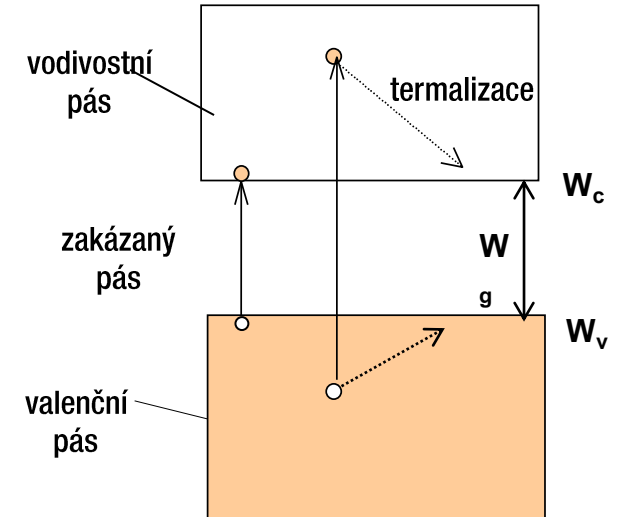


GaAs  
a-Si

$$h\nu \geq W_g$$



c-Si





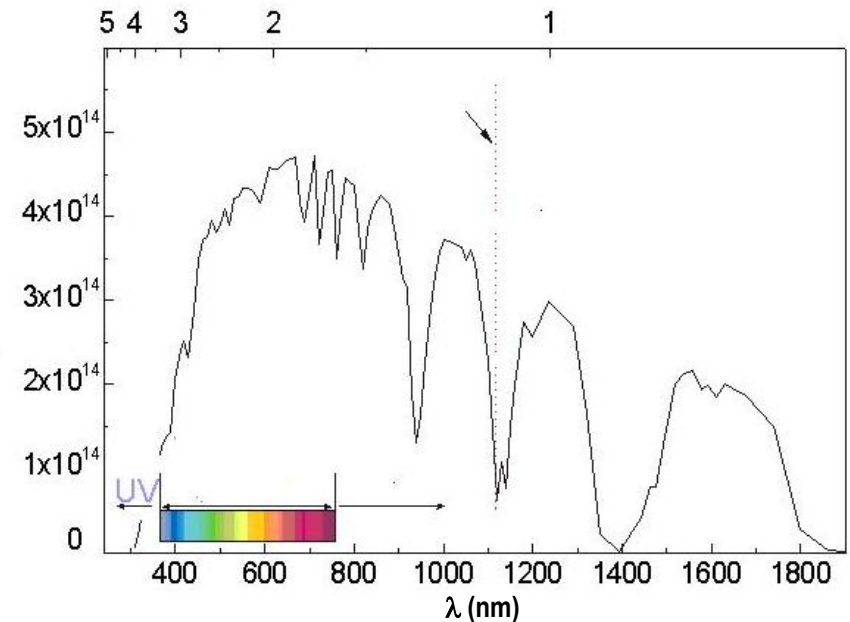
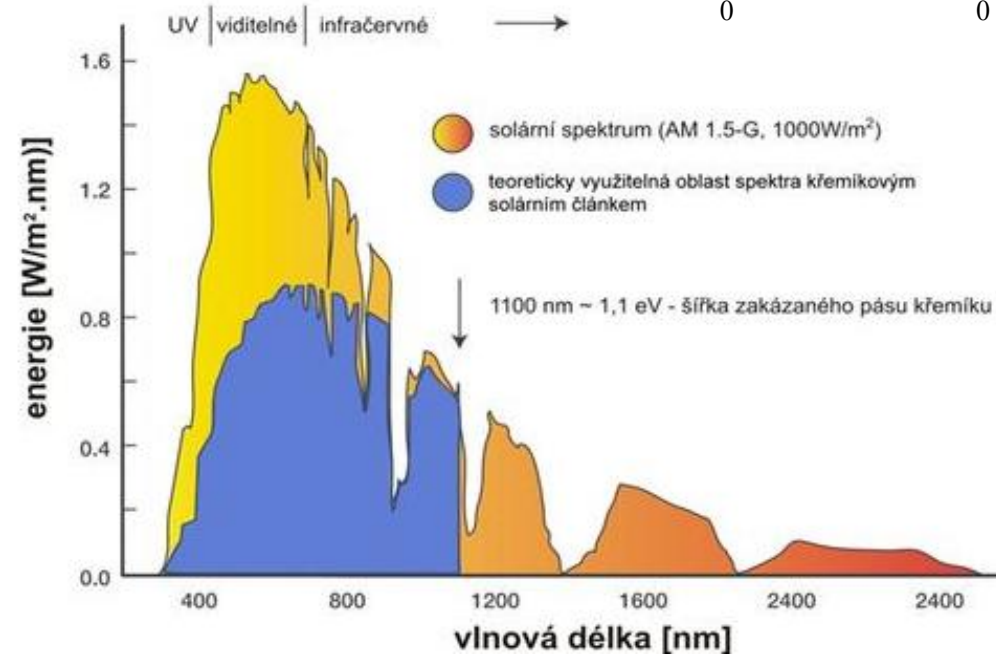
# Generace nerovnovážných nosičů náboje

## Generace nerovnovážných nosičů

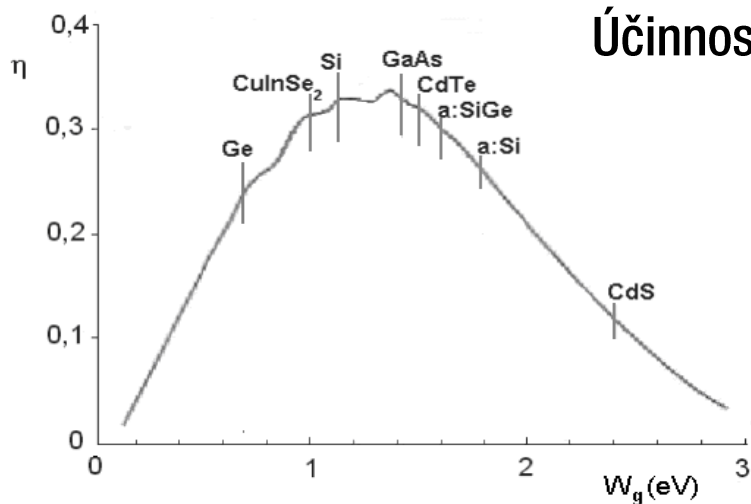
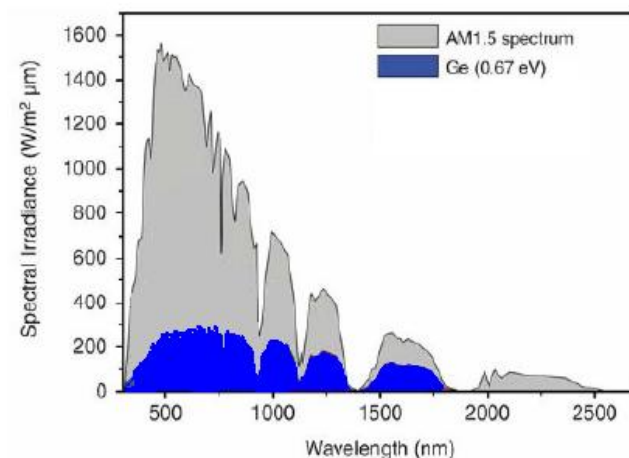
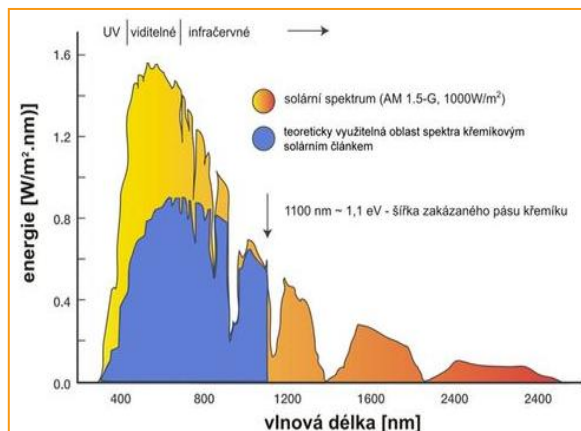
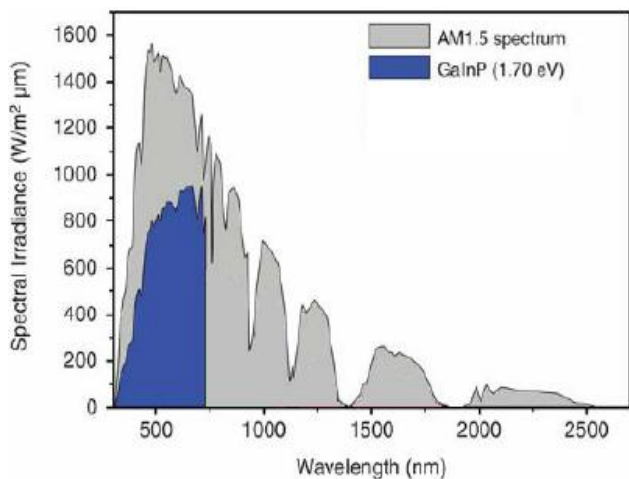
$$G(\lambda; x) = \left( \frac{d\Delta n}{dt} \right)_{gen} = \alpha(\lambda)\beta(\lambda)\Phi(\lambda; x) = \alpha(\lambda)\beta(\lambda)\Phi_0(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda)x)$$

## Celková generace

$$G_{tot}(x) = \int_0^{\infty} G(\lambda; x)d\lambda = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda)\beta(\lambda)\Phi(\lambda; x)d\lambda$$



# Účinnost generace



Účinnost generace nosičů závisí na šířce zakázaného pásu

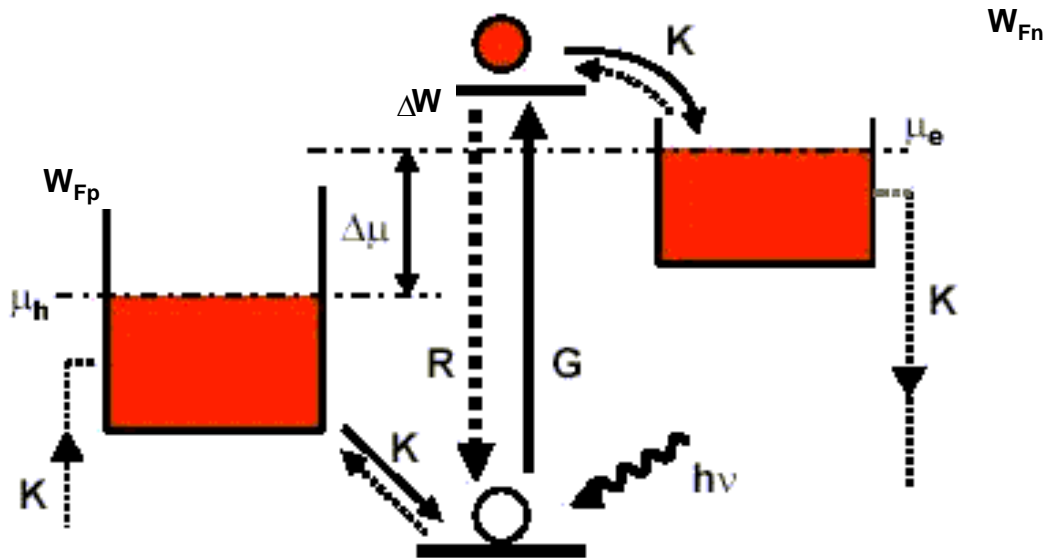
## Vhodné materiály

- Si
- GaAs
- CuInSe<sub>2</sub>
- amorfnní SiGe
- CdTe/CdS

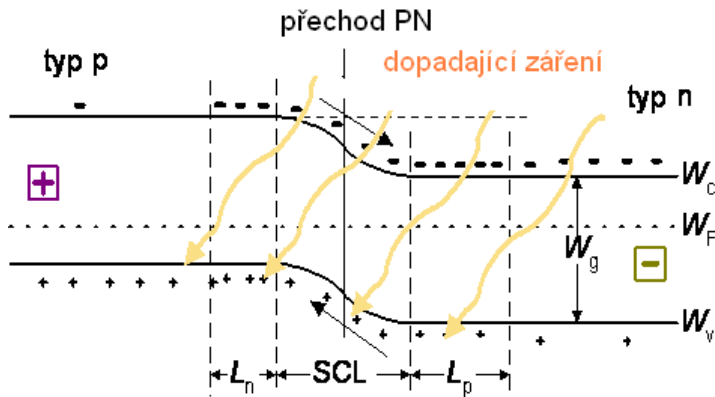
# Separace nosičů

V homogenním polovodiči je elektrická neutralita  $\Delta n = \Delta p \Rightarrow$  nevzniká rozdíl potenciálů

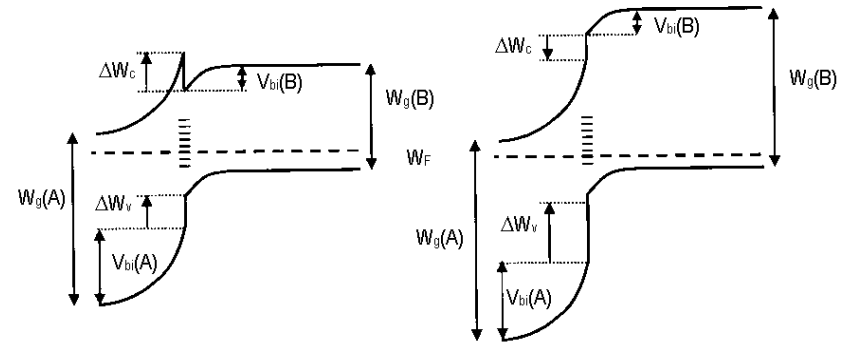
K separaci nosičů a vytvoření rozdílu potenciálu je třeba silné **vnitřní elektrické pole**



# Polovodičové fotovoltaické články

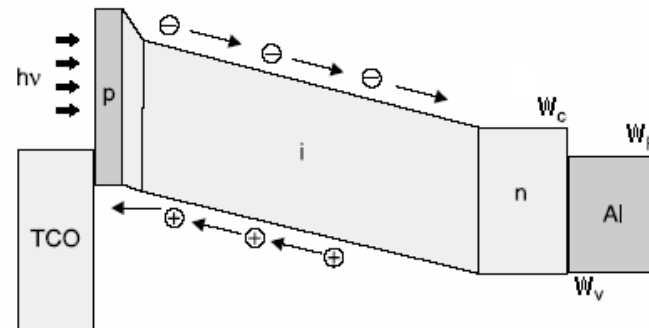


PN přechod



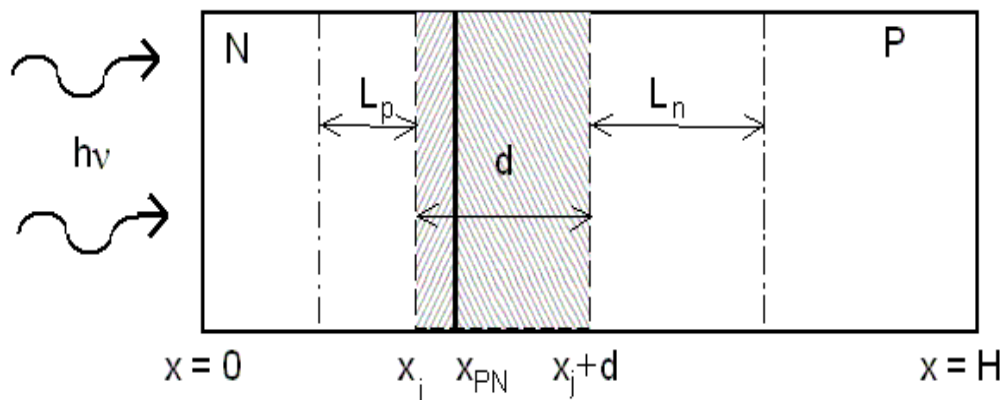
heteropřechod (kontakt různých materiálů).

Pro vytvoření potřebného rozdílu potenciálu je možno využít struktury s vestavěným elektrickým polem



struktura PIN

# Princip funkce fotovoltaického článku



V ozářené oblasti jsou generovány nerovnovážné nosiče, které difundují směrem k přechodu PN. Hustota proudu  $J_{PV}$  je tvořena nosiči které byly zachyceny oblastí prostorového náboje  $J_{PV}(\lambda) = J_{PVN}(\lambda) + J_{PVP}(\lambda) + J_{OPN}(\lambda)$

- v oblasti typu N

$$J_{PVN}(\lambda) = q \int_0^{x_j} G(\lambda) dx - q \int_0^{x_j} \frac{\Delta p}{\tau_p} dx - J_{sr}(0)$$

- v oblasti typu P

$$J_{PVP}(\lambda) = q \int_{x_j+d}^H G(\lambda) dx - q \int_{x_j+d}^H \frac{\Delta n}{\tau_n} dx - J_{sr}(H)$$

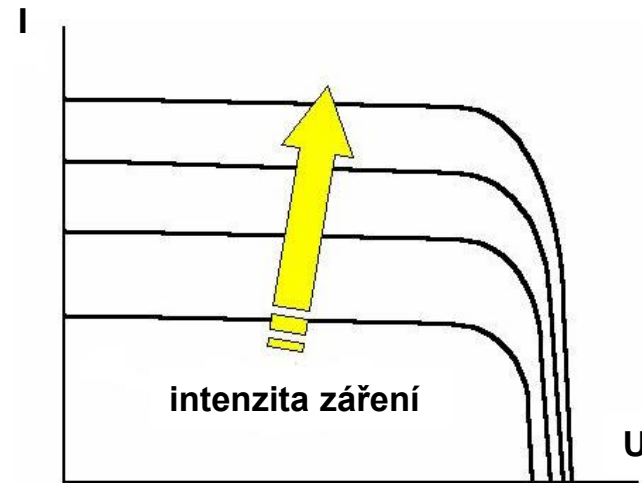
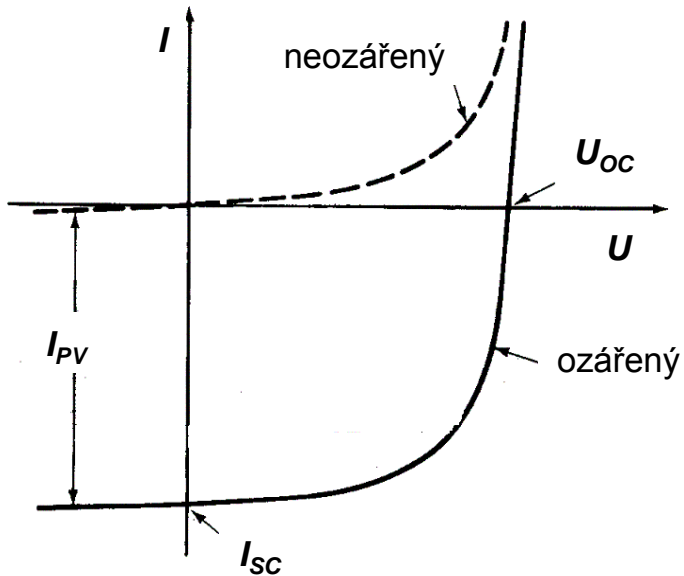
- v oblasti prostorového náboje přechodu PN

$$J_{OPN}(\lambda) \approx q \int_{x_j}^{x_j+d_j} G(\lambda) dx - q \int_{x_j}^{x_j+d_j} \frac{\Delta n}{\tau_{sc}} dx$$

# Princip funkce fotovoltaického článku

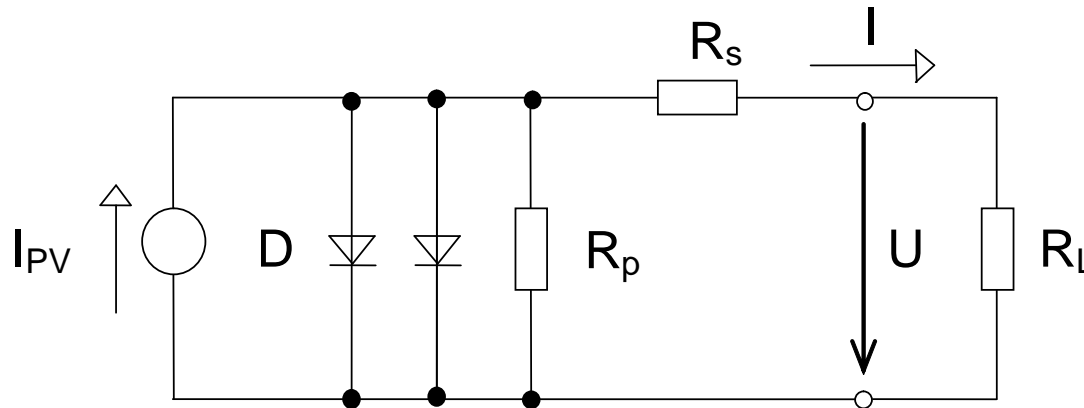
## V ozářené oblasti přechodu PN

Superpozice generovaného proudu a proudu (neozářeného) přechodu PN



# V-A charakteristika fotovoltaických článků

- Náhradní schéma – dvoudiodový model



$$I = I_{PV} - I_D - I_{R_P}$$

$$I_{PV} = A_{ill} J_{PV}$$

$R_P$  – Paralelní odpor

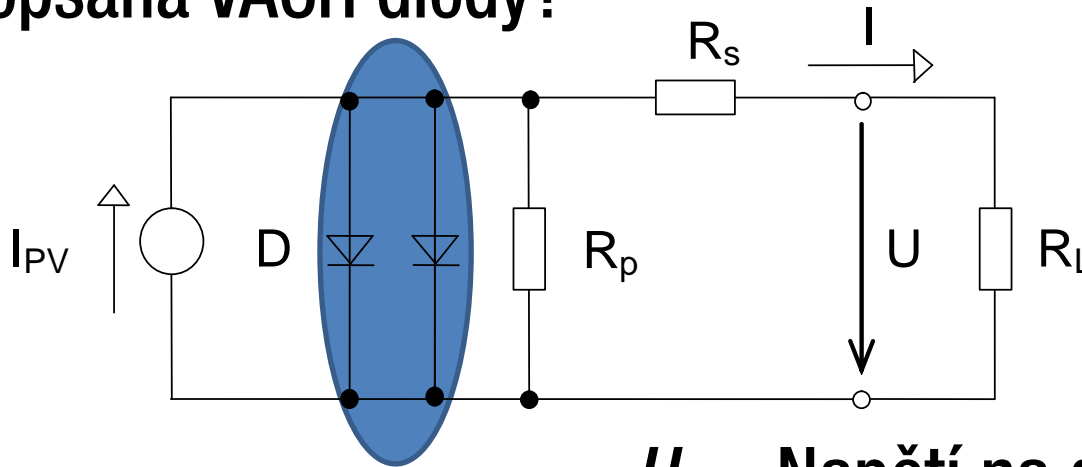
$R_S$  – Sériový odpor

$A_{ill}$  – Ozářená plocha

$I_{PV}$  – Fotovoltaický proud

# V-A charakteristika fotovoltaických článků

- Čím je popsána VACH diody?



- Shockleyho rovnice

$$I = I_0 \left[ \exp\left( e \frac{U_D}{\eta k T} \right) - 1 \right]$$

$U_D$  – Napětí na diodě

$e$  – Elementární náboj

$k$  – Boltzmannova konstanta

$T$  – Termodynamická teplota

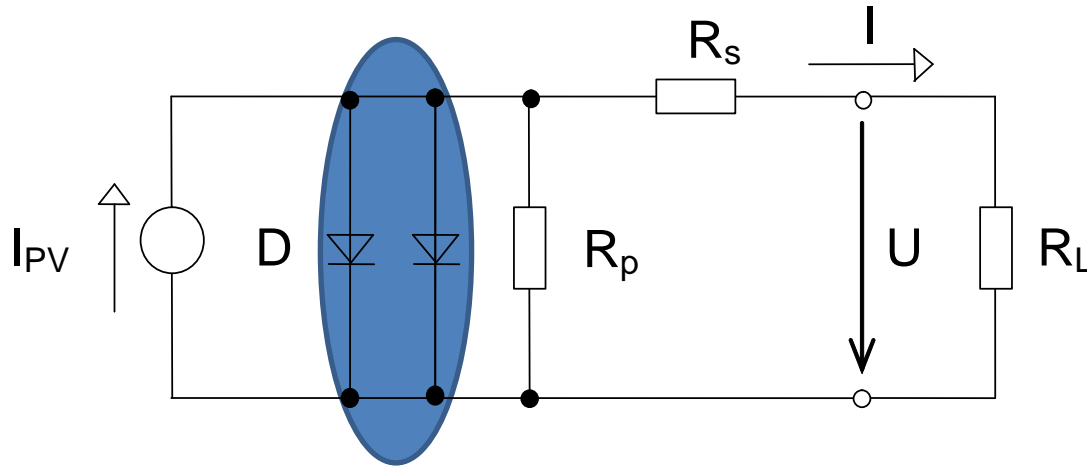
$\eta$  – Diodový faktor



# V-A charakteristika fotovoltaických článků

- Dvě diody!

$$I = I_0 \cdot \left( e^{\frac{eU_D}{\eta kT}} - 1 \right)$$



$$I_{D_1} = I_{01} \left[ \exp \left( e \frac{U_j}{\eta_1 kT} \right) - 1 \right]$$

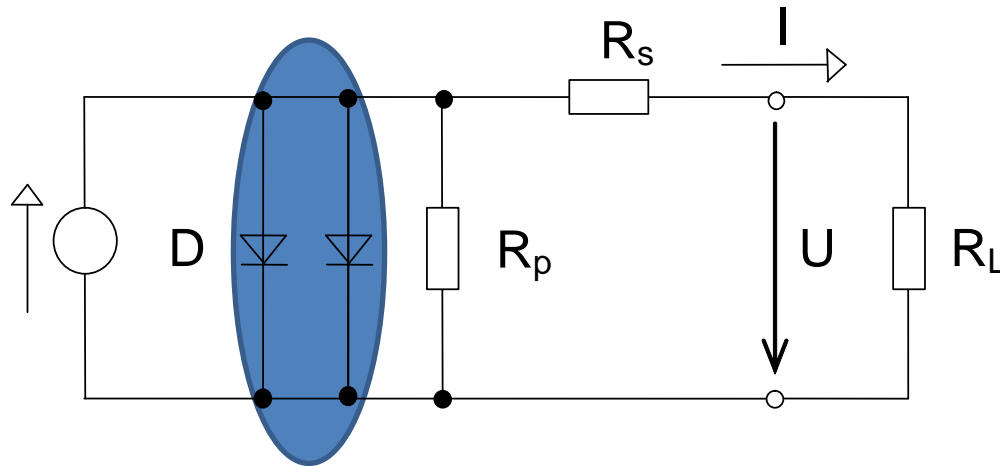
$$I_{D_2} = I_{02} \left[ \exp \left( e \frac{U_j}{\eta_2 kT} \right) - 1 \right]$$

$U_j$  – Napětí na PN přechodu

# V-A charakteristika fotovoltaických článků

- Proč dvě?

$$I = I_0 \cdot \left( e^{\frac{eU_D}{\eta kT}} - 1 \right) I_{PV}$$



$$I_{D_1} = I_{01} \left[ \exp \left( e \frac{U_j}{\eta_1 kT} \right) - 1 \right]$$



VACH neosvětleného přechodu

$$I_{D_2} = I_{02} \left[ \exp \left( e \frac{U_j}{\eta_2 kT} \right) - 1 \right]$$

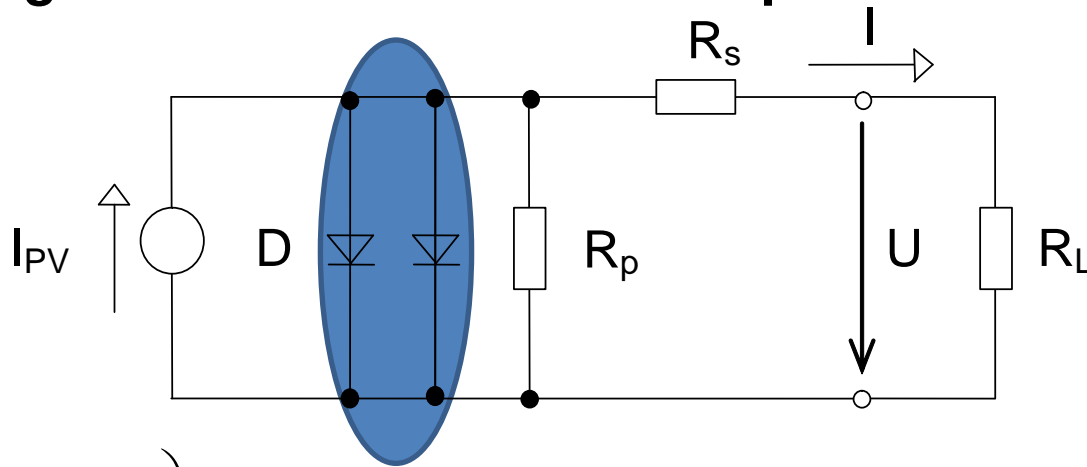


Generace a rekombinace

Diodové faktory:  $1 \leq \eta_1 < 2, \quad \eta_2 \geq 2$

# V-A charakteristika fotovoltaických článků

- Difúzní proud a generačně-rekombinační proud



$$J_{01} = n_i^2 e \left( \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{p_{p0}} + \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{n_{n0}} \right)$$



Difúzní proud  $I_{01} = AJ_{01}$

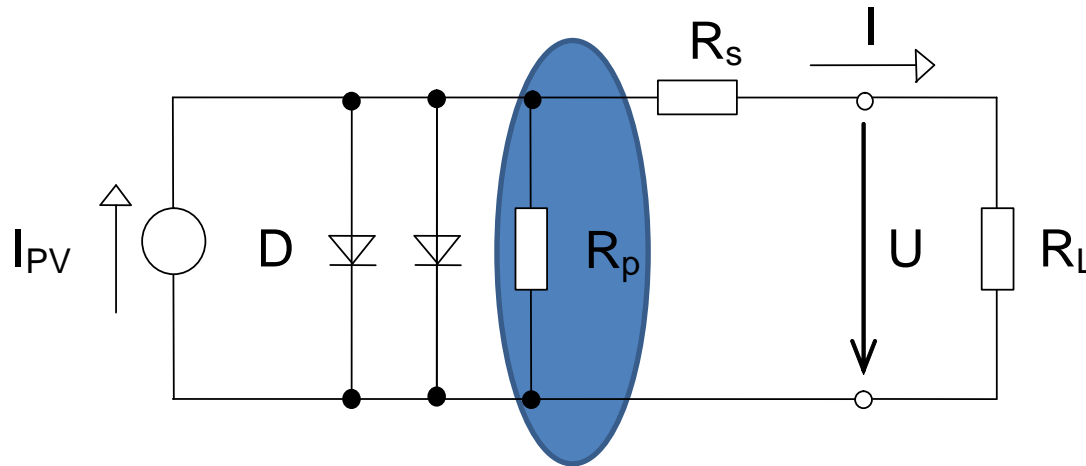
$$J_{02} = \frac{en_i d}{\tau_{sc}}$$



Generačně-rekombinační proud  
 $I_{02} = AJ_{02}$

# V-A charakteristika fotovoltaických článků

- Proud paralelním odporem

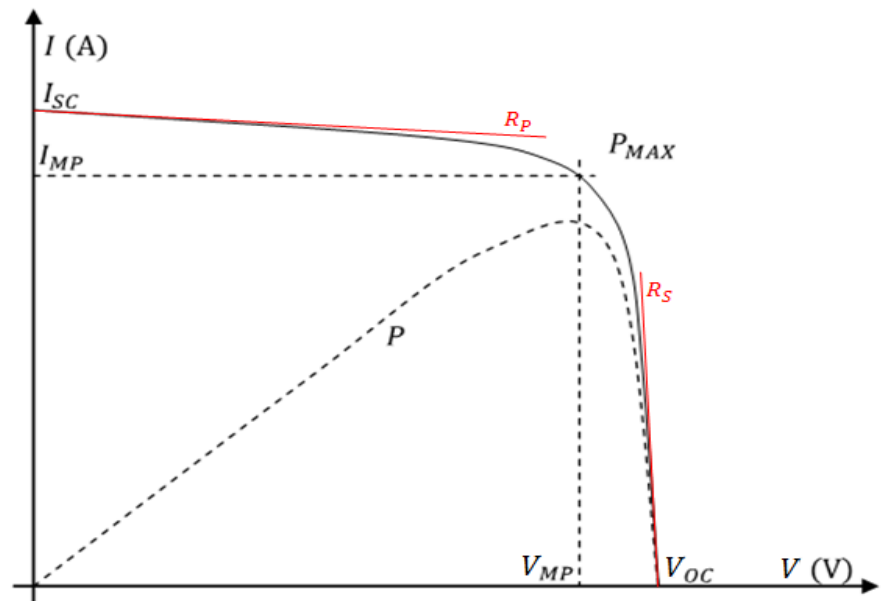
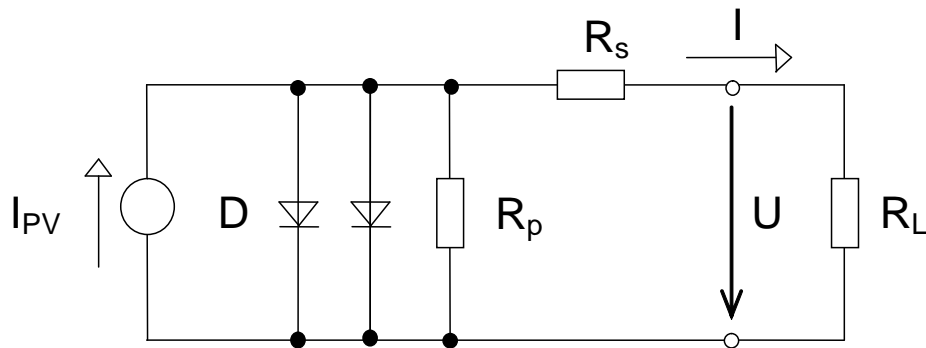


$$U_j = U + R_s I \quad I_{R_p} = \frac{U_j}{R_p} = \frac{U + R_s I}{R_p}$$

# V-A charakteristika fotovoltaických článků

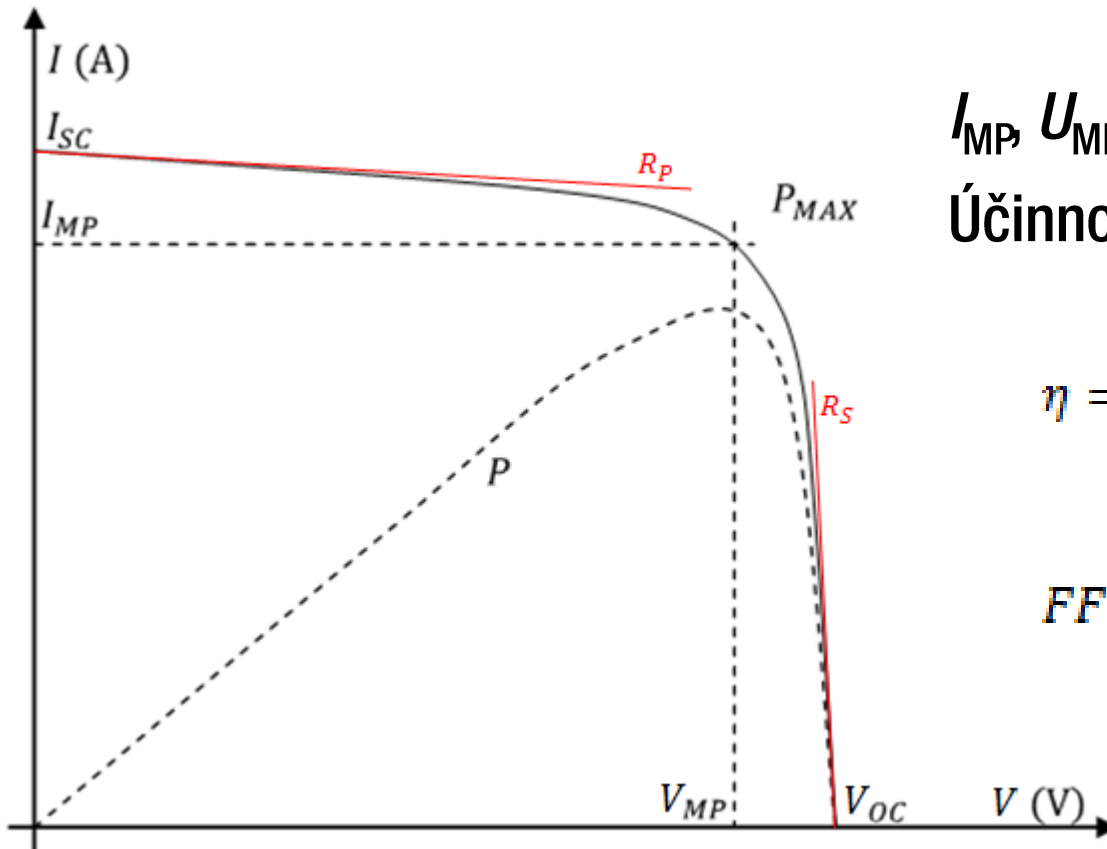
- Výsledná rovnice VACH:

$$I = A_{ill} J_{PV} - I_{01} \left[ \exp \left( e \frac{U + R_s I}{\eta_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp \left( e \frac{U + R_s I}{\eta_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_p}$$



# V-A charakteristika fotovoltaických článků

## Stanovení parametrů



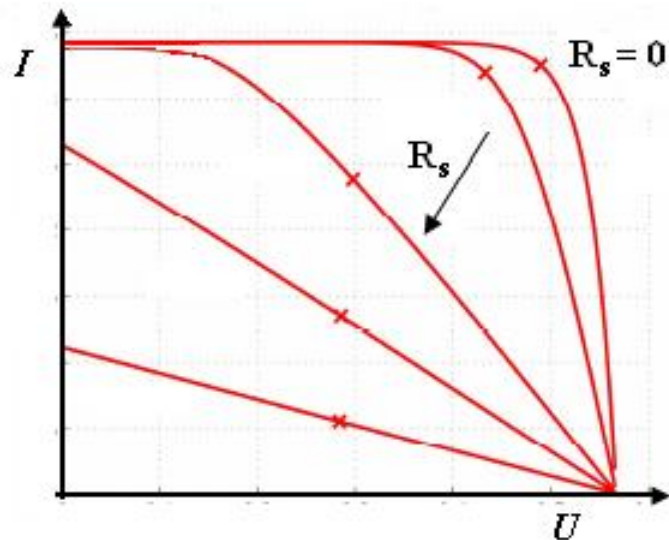
$I_{MP}$ ,  $U_{MP}$ ,  $P_{MAX}$ ,  $U_{OC}$  a  $I_{SC}$  přímo  
 Účinnost a FF výpočtem:

$$\eta = 100 \cdot \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = 100 \cdot \frac{P_{MAX}}{G \cdot A}$$

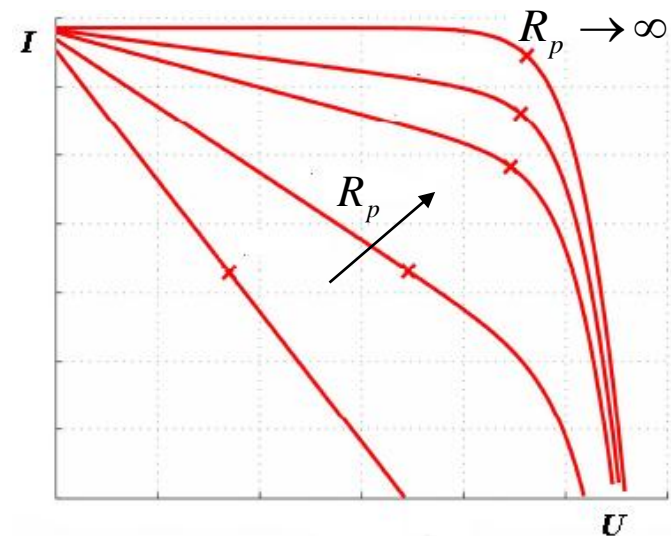
$$FF = \frac{U_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

# Vliv parazitních odporů ( $R_s$ a $R_p$ )

Nárůst sériového odporu  $R_s$   
 má za následek pokles  
 proudu, účinnosti a FF



Pokles paralelního odporu  $R_p$   
 pokles napětí  $U_{OC}$ , pokles FF a  
 účinnosti



# Vliv teploty na VA charakteristiku

$$U_{oc} \approx \frac{kT}{e} \ln \frac{I_{PV}}{I_{01}}$$

$$I_{01} \sim n_i^2 = BT^3 \exp\left(\frac{-W_g}{kT}\right)$$

Je proto  $\frac{\partial U_{oc}}{\partial T} < 0$

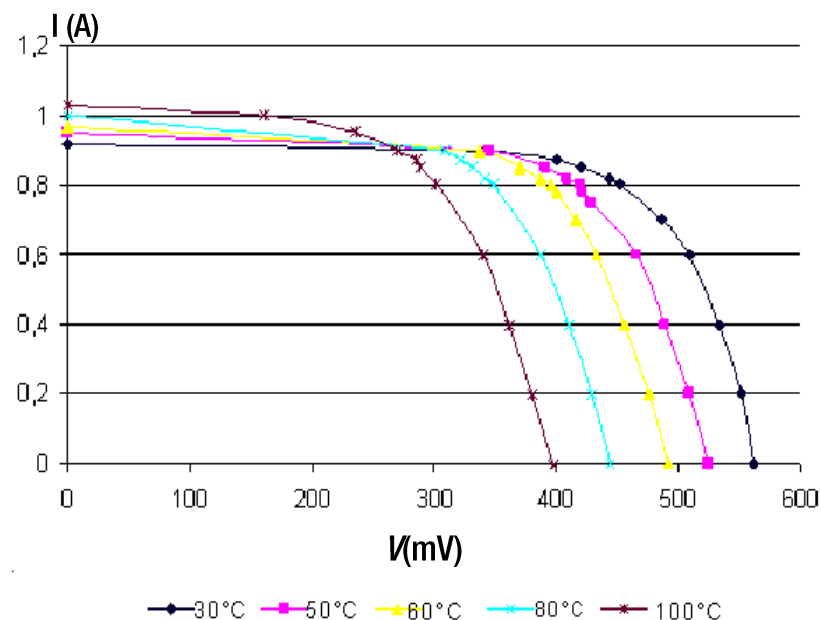
Pro c-Si fotovoltaické články pokles  $U_{oc}$  je okolo 0.4%/K

$R_s$  roste s rostoucí teplotou

$R_p$  klesá s rostoucí teplotou

Činitel plnění FF a účinnost s rostoucí teplotou klesají

$$\frac{\partial FF}{\partial T} < 0 \quad \frac{\partial \eta}{\partial T} < 0$$



	$\eta$ (28°C)	$(1/\eta)(d\eta/dT)$ ( $10^{-3}/^\circ\text{C}$ )
Si	0.148	-4.60
Ge	0.090	-10.1
GaAs/Ge	0.174	-1.60
InP	0.195	-1.59
a-Si	0.066	-1.11 (nelineární)
CuInSe <sub>2</sub>	0.087	-6.52