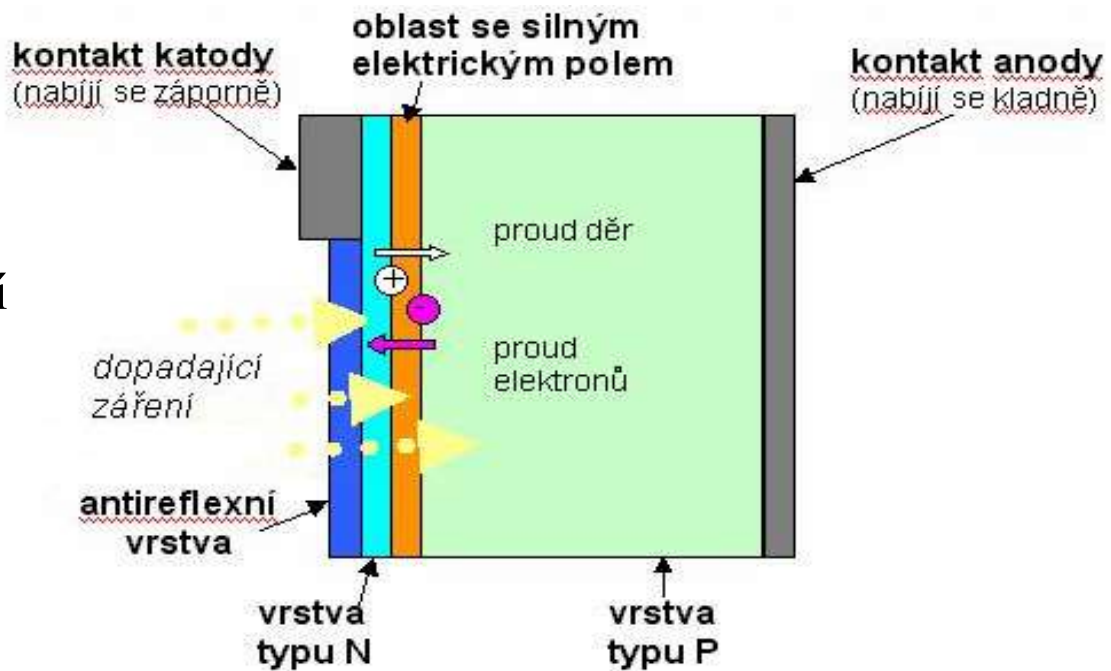
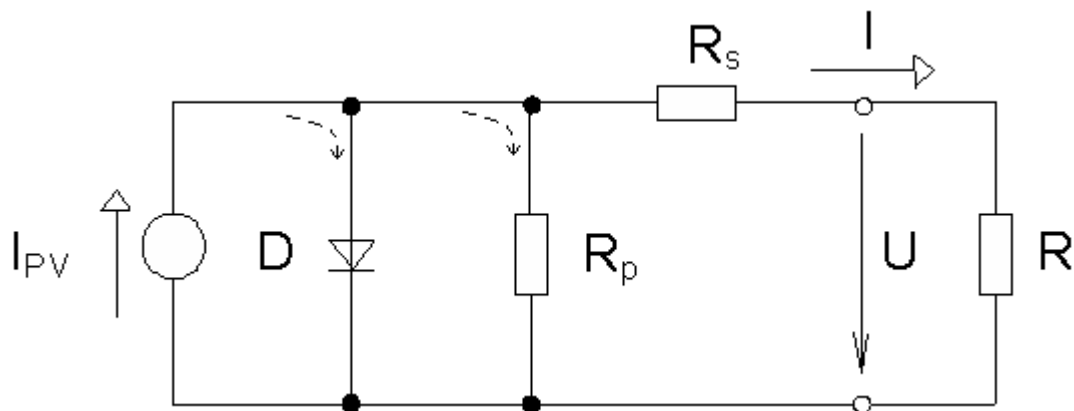


Fotovoltaický článek

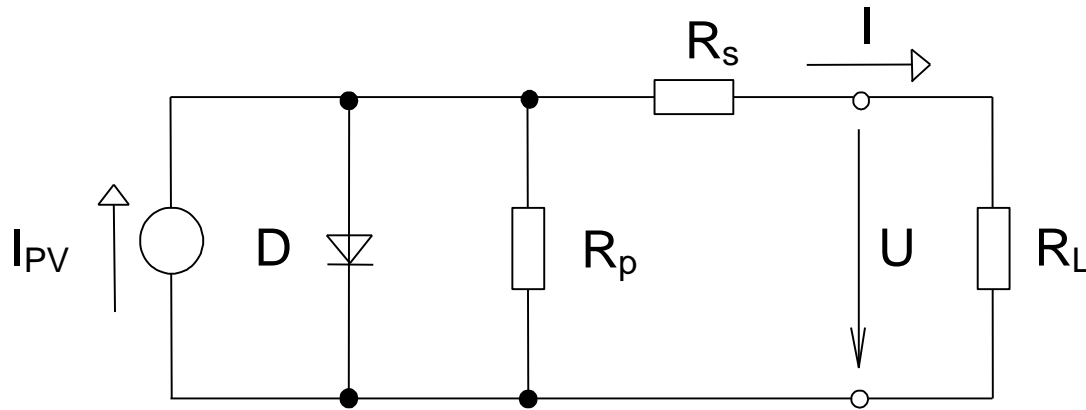
Struktura na které se při ozáření generuje napětí



K popisu funkce se používá náhradní schéma



V-A charakteristika fotovoltaických článků



Paralelní odpor R_p

Sériový odpor R_s

A_{ill} – ozářená plocha

A - celková plocha

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

$$I_D = A J_{PN}(U_j)$$

$$J_{PN} = J_{01} \left[\exp\left(\frac{eU_j}{\zeta_1 kT}\right) - 1 \right] + J_{02} \left[\exp\left(\frac{eU_j}{\zeta_2 kT}\right) - 1 \right]$$

$$J_{01} = n_i^2 e \left(\frac{D_n}{L_n} \frac{1}{p_{p0}} + \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{n_{n0}} \right) \quad J_{02} = \frac{en_i d}{\tau_{sc}} \quad 1 \leq \zeta_1 \leq 2 \quad \zeta_2 \geq 2$$

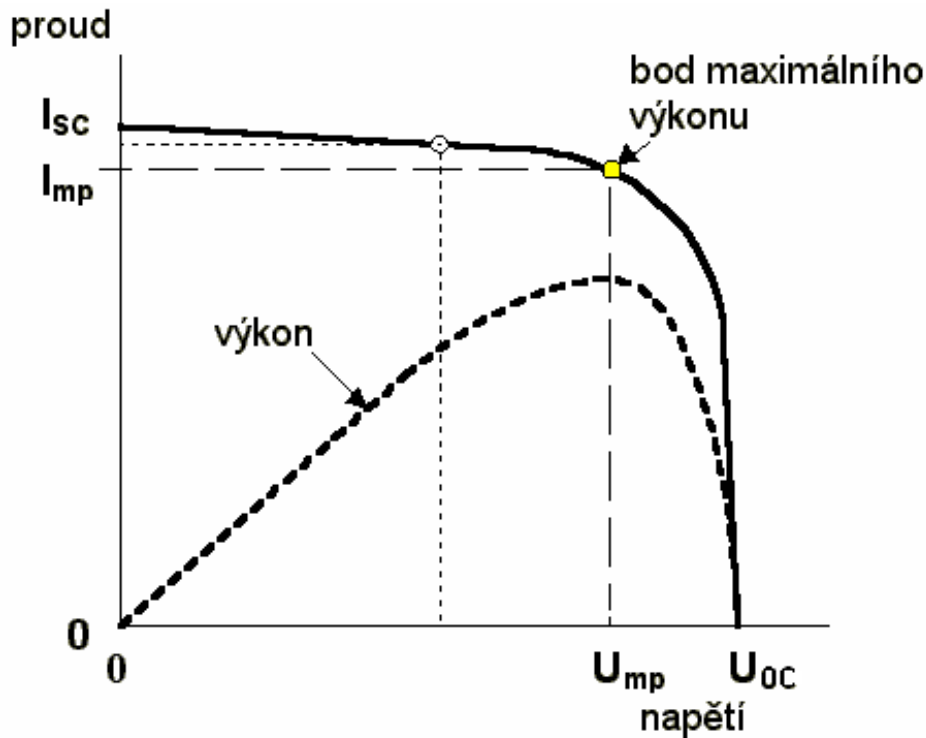
$$I_{Rp} = U_j / R_p$$

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

Napětí na článku $U = U_j - R_s I$

$$I = A_{ill} J_{PV} - A J_{01} \left[\exp\left(e \frac{U + R_s I}{\zeta_1 kT}\right) - 1 \right] - A J_{02} \left[\exp\left(e \frac{U + R_s I}{\zeta_2 kT}\right) - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_p}$$

V-A charakteristika fotovoltaického článku a její důležité body



Parametry

$$U_{oc}, I_{sc}, U_{mp}, I_{mp}, P_m = U_{mp} I_{mp}$$

(STC: 25°C, 1 kW/m², AM= 1,5)

Činitel plnění

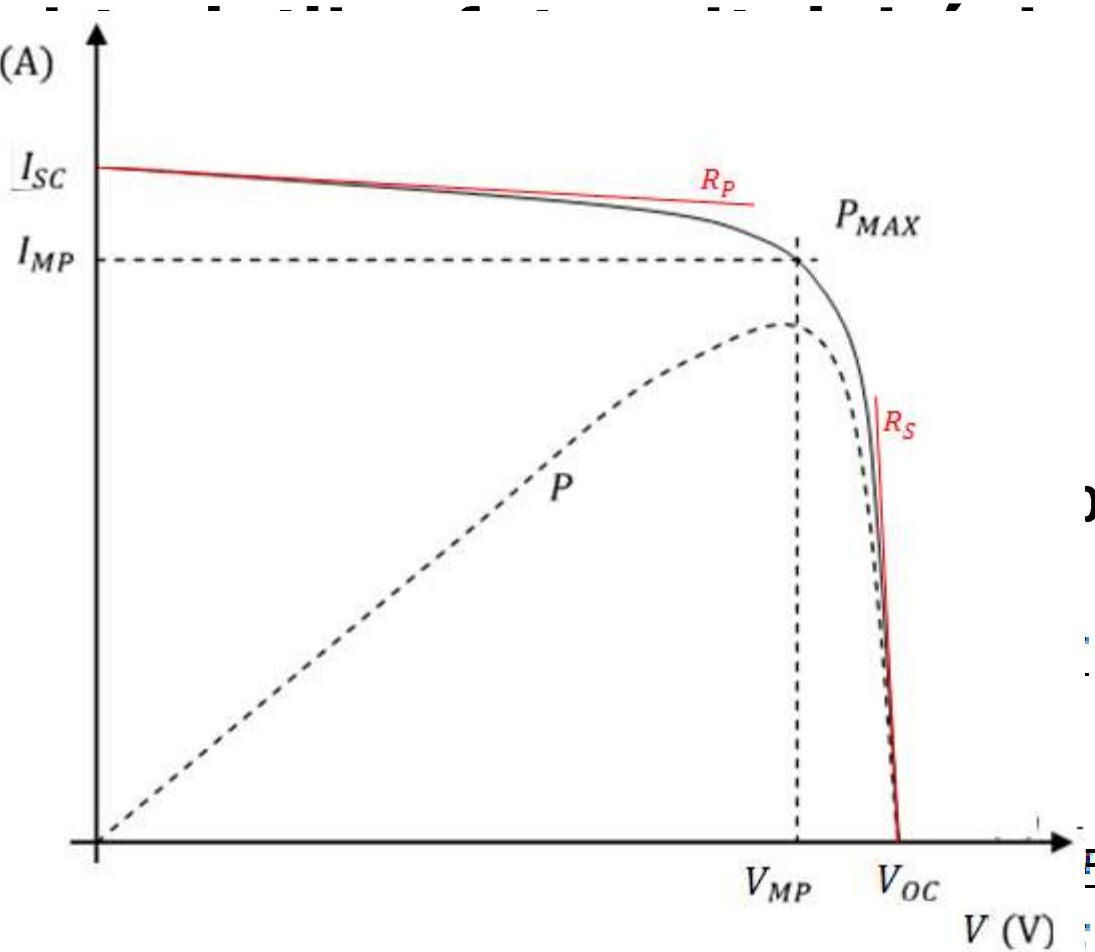
$$FF = \frac{U_{mp} I_{mp}}{U_{oc} I_{sc}}$$

Účinnost článku

$$\eta = \frac{U_{mp} I_{mp}}{P_{in}}$$

V-A charakteristika

Stanoven



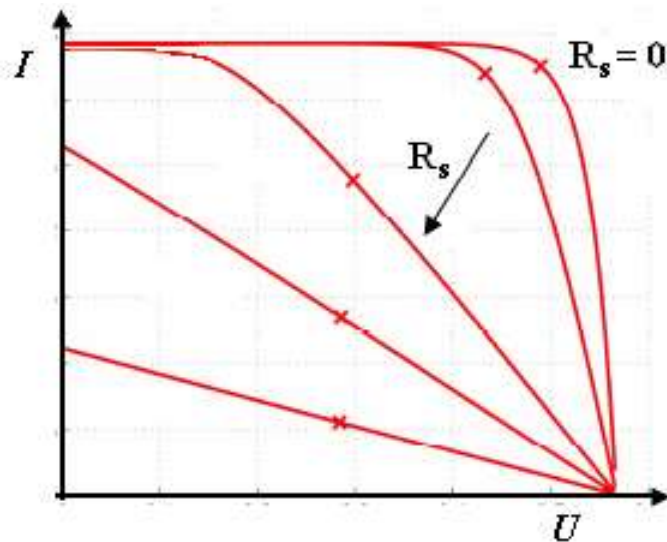
článků

a I_{SC} přímo
počtem:

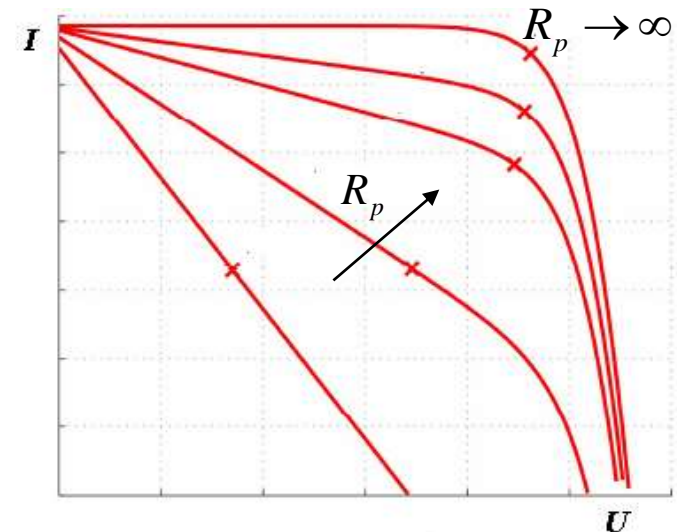
$$\eta = 100 \cdot \frac{P_{MAX}}{G \cdot A}$$

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

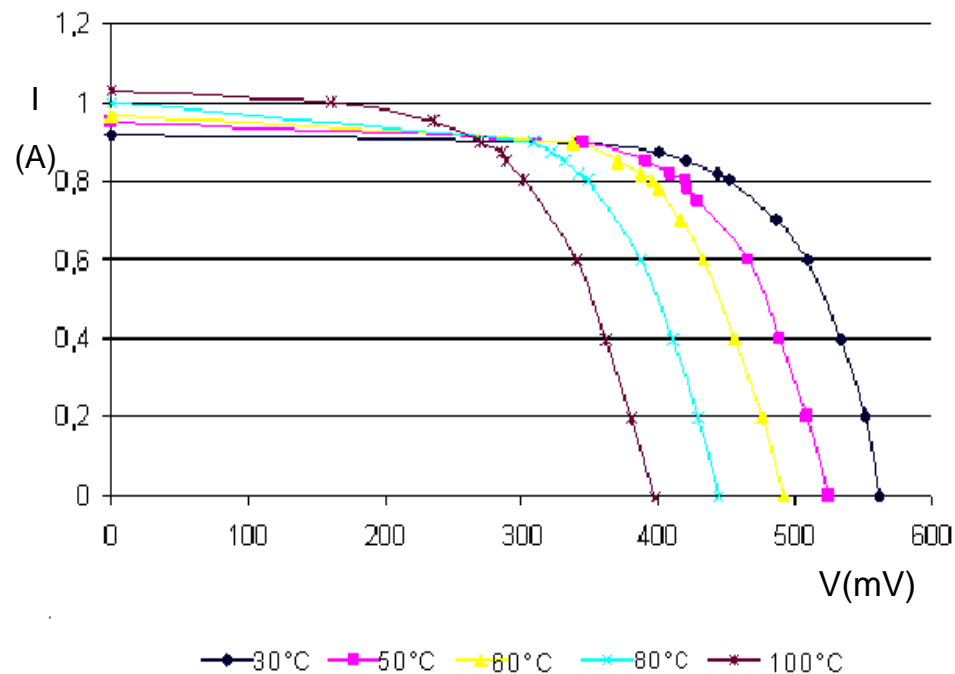
Pro c-Si fotovoltaické články pokles U_{oc} je okolo 0.4%/K

R_s roste s rostoucí teplotou

R_p klesá s rostoucí teplotou

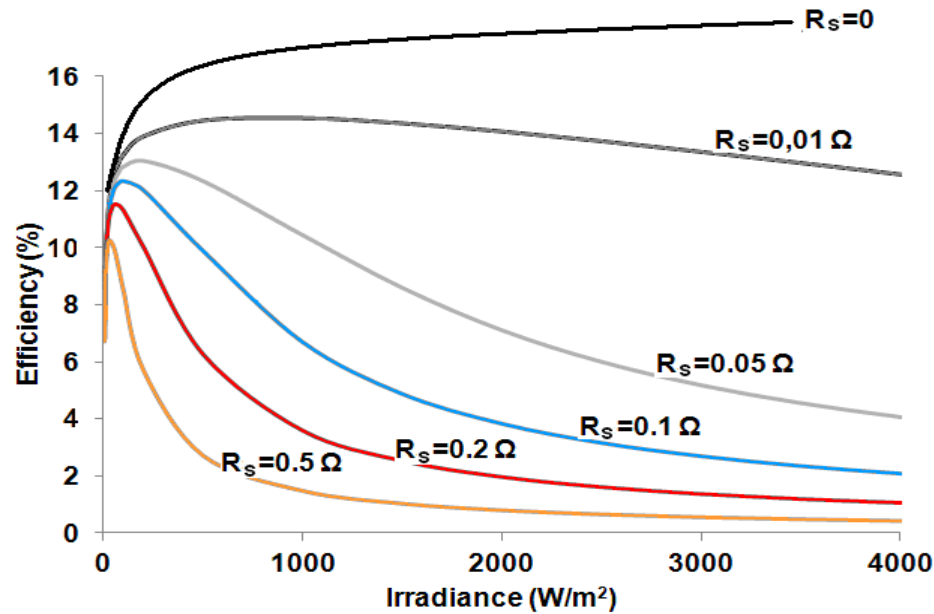
Činitel plnění FF a účinnost s rostoucí teplotou klesají

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

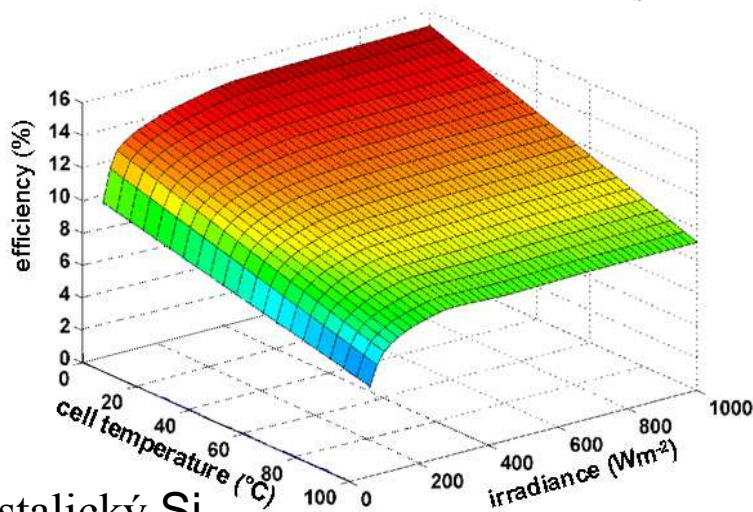


	η (28°C)	$(1/\eta)(d\eta/dT)$ ($10^{-3}/^\circ\text{C}$)
Si	0.148	-4.60
Ge	0.090	-10.1
GaAs/Ge	0.174	-1.60
InP	0.195	-1.59
a-Si	0.066	-1.11 (nelineární)
CuInSe ₂	0.087	-6.52

R_s ovlivňuje také závislost účinnosti na intenzitě záření

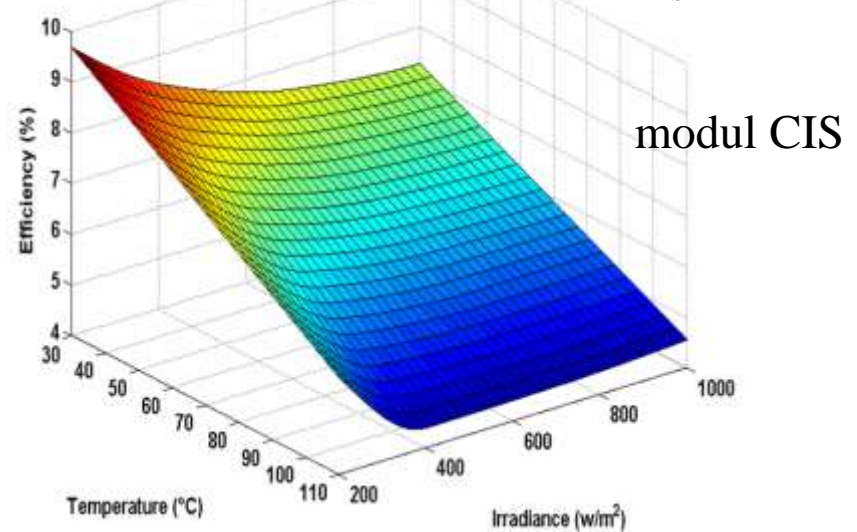


FV článek (modul) s malým R_s



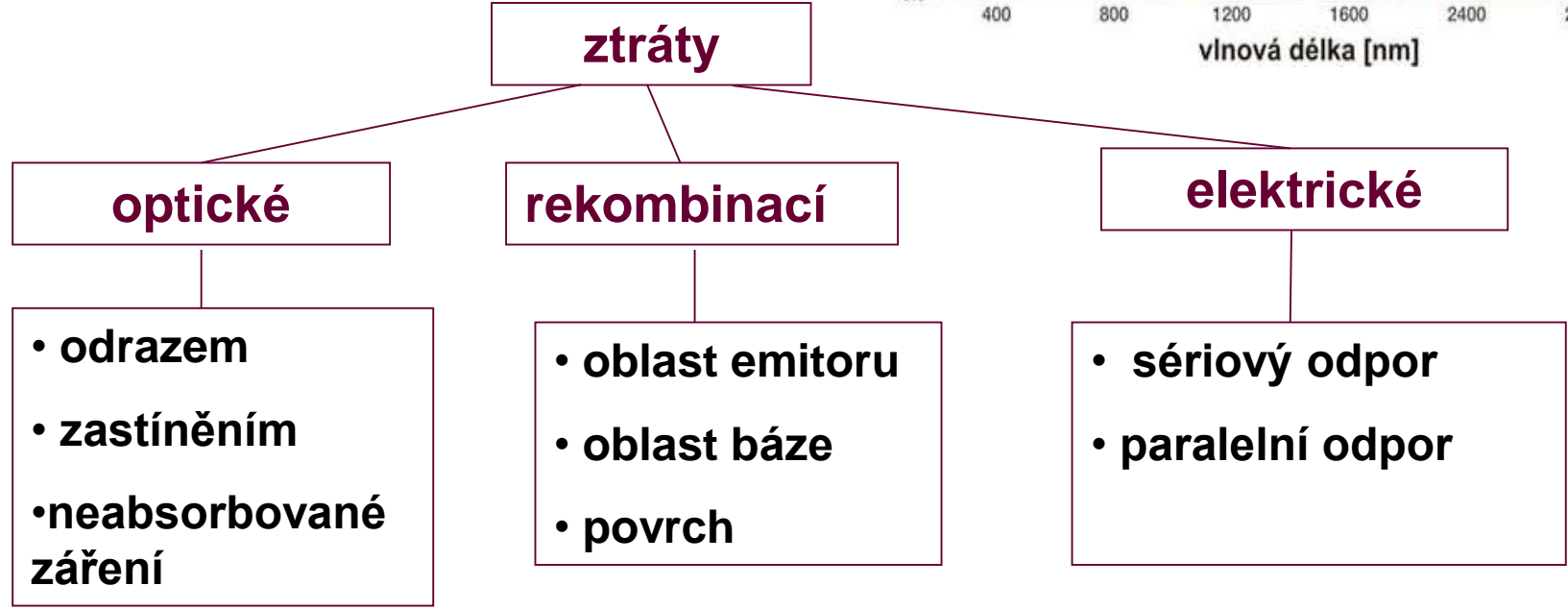
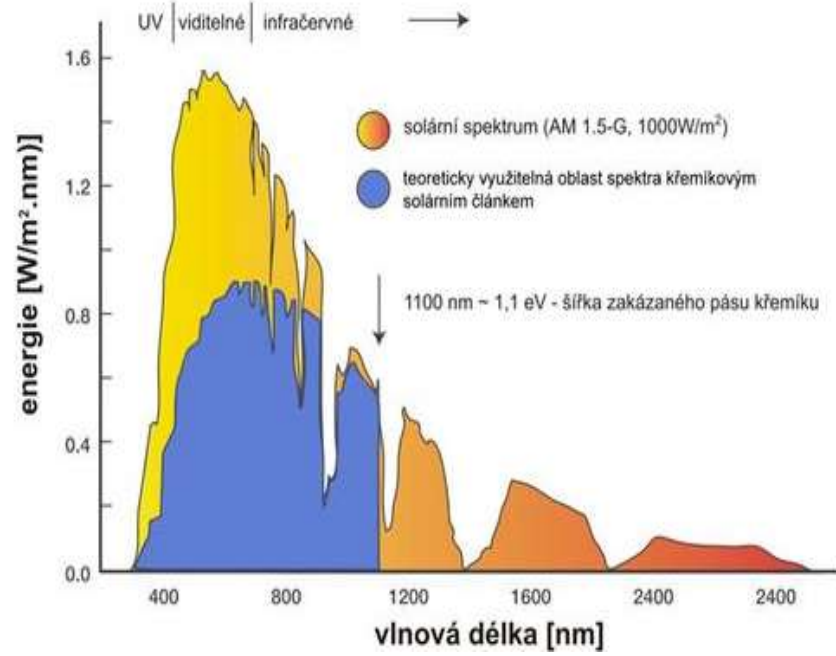
krystalický Si

FV článek (modul) s velkým R_s



K dosažení maximální hodnoty J_{PV} je třeba

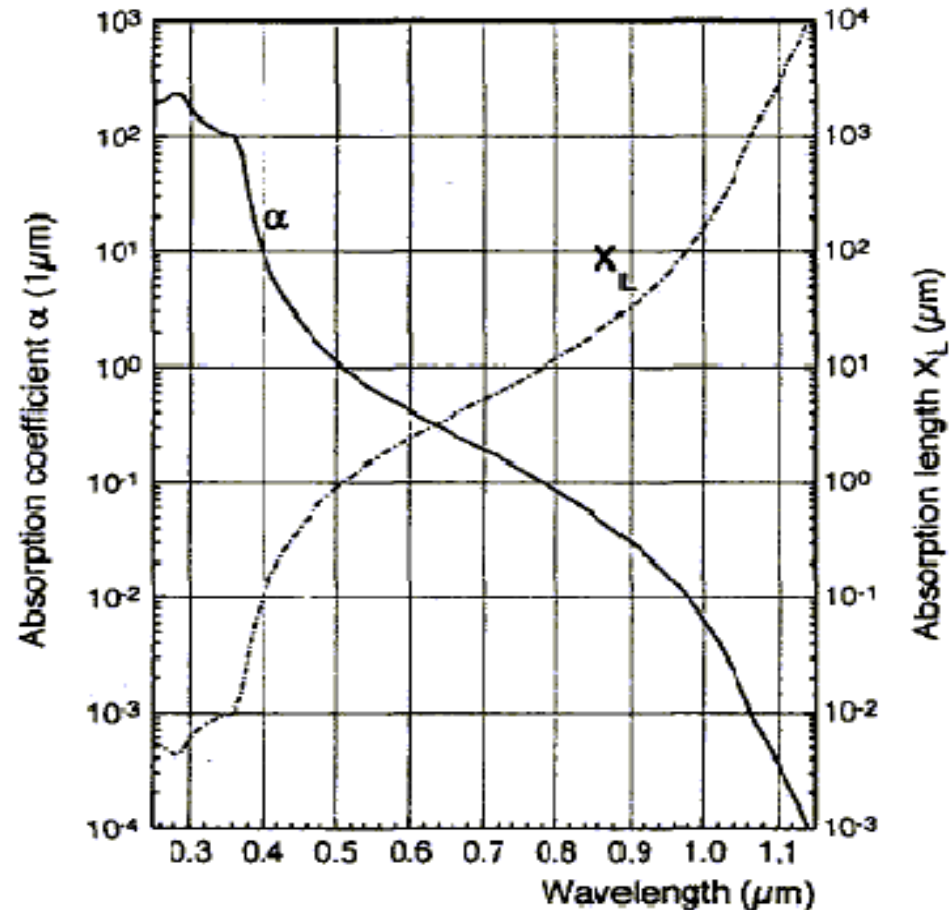
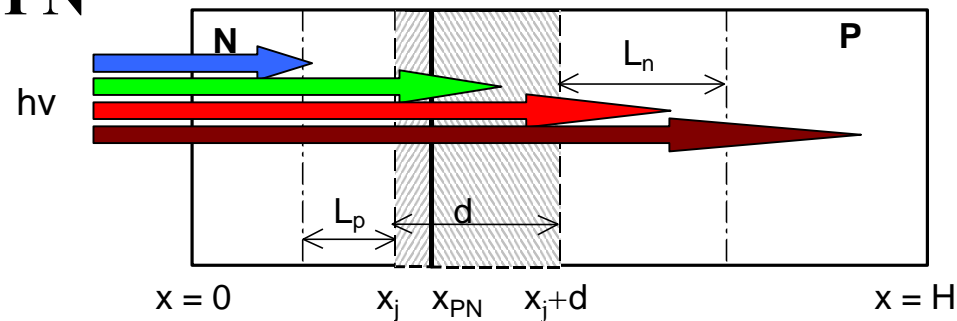
- maximální generace G
- minimální ztráty



Optimalizace pozice přechodu PN

PN přechod sbírá nosiče generované jak v oblasti typu P tak v oblasti typu N.

U článků z c-Si vzdálenost přechodu PN od povrchu x_j by měla být menší, než $0.5 \mu\text{m}$ ($0.2 \mu\text{m}$ je žádoucí).



Antireflexní vrstva

V případě monochromatického záření, minimální odraz \mathcal{R}_{min} nastává je-li optická dráha rovna čtvrtině vlnové délky

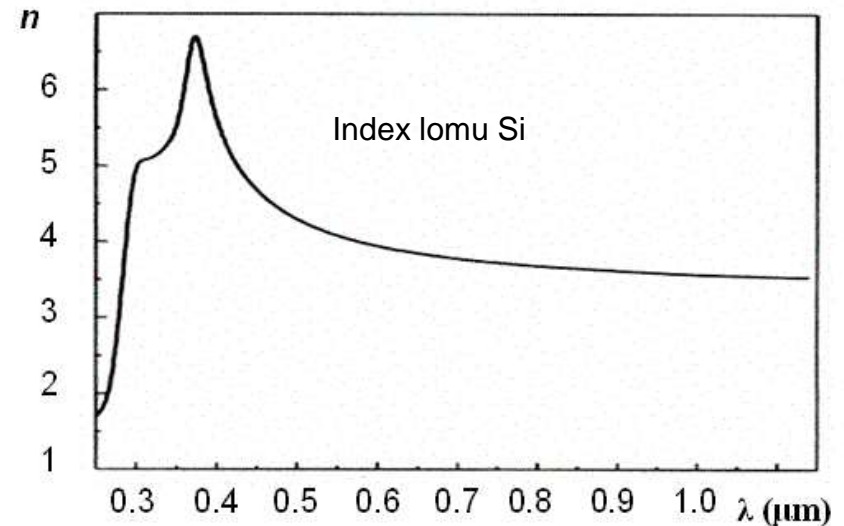
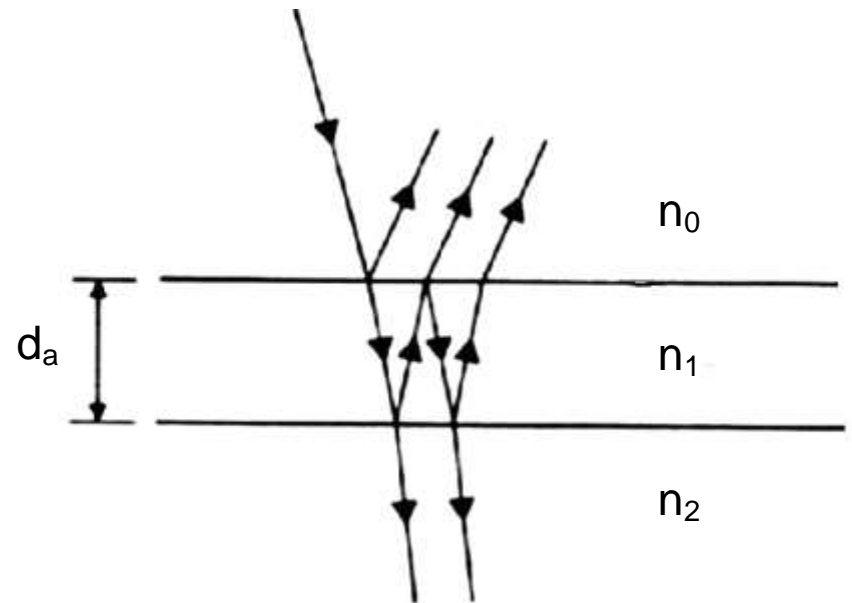
$$d_a = \frac{\lambda}{4n_1}$$

$$(n_1^2 + n_0n_2)^2 \mathcal{R}_{min} = (n_1^2 - n_0n_2)^2$$

Je tedy třeba, aby $\mathcal{R}_{min} = 0$

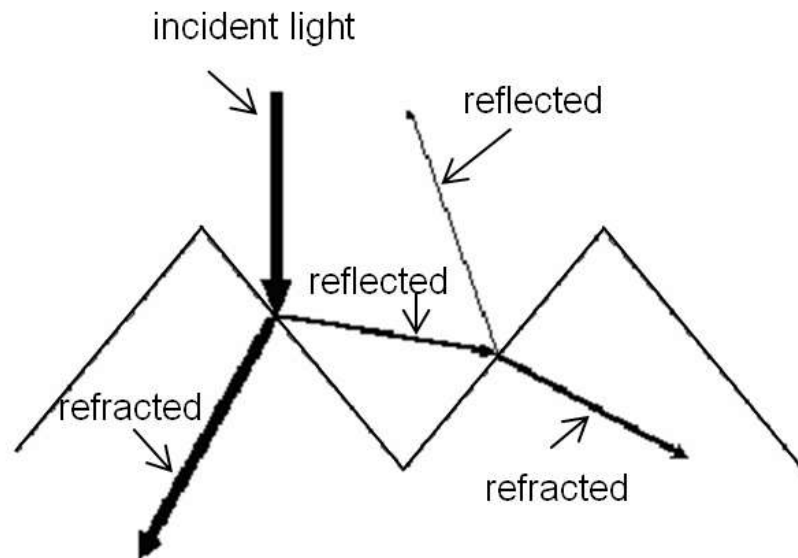
$$n_1 = \sqrt{n_0n_2}$$

Tenká vrstva s $n_1 \cong 2$ je potřebná pro články z c-Si (Si_3N_4 nebo TiO_2 , $d \cong 75$ nm).

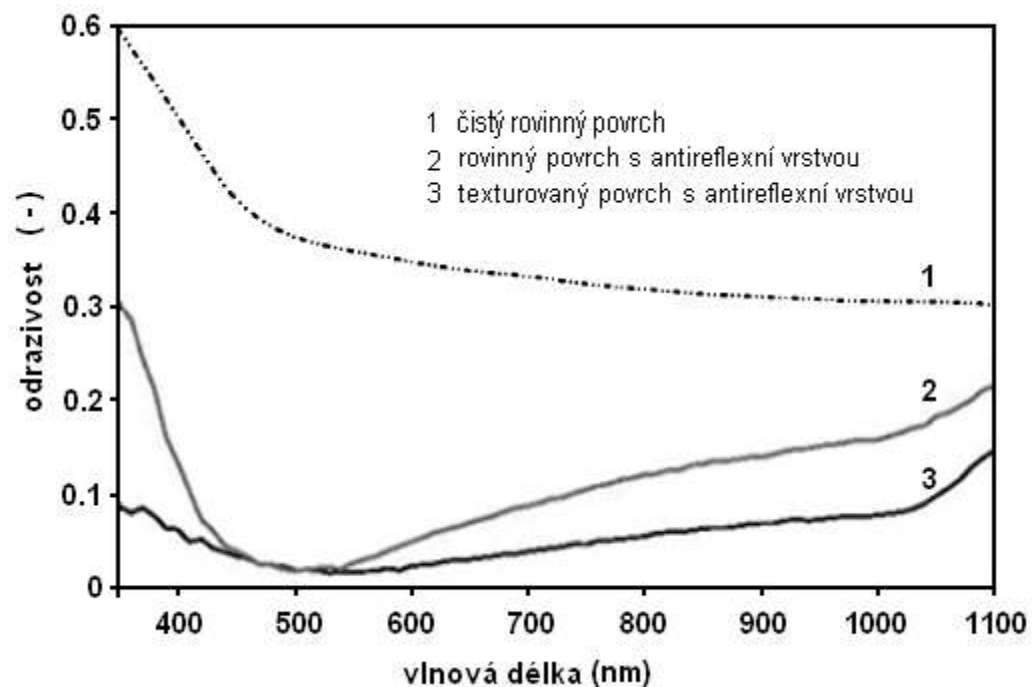


Texturace povrchu

Má-li povrch pyramidovou strukturu, je možné snížit odrazivost na zhruba jednu třetinu oproti rovinnému povrchu.



Oba principy
(texturaci povrchu a
antireflexní vrstva)
mohou být
kombinovány



Ztráty rekombinací

Snížit koncentraci rekombinačních center

- čistota materiálu
- optimální teploty depozičních procesů

Snížit rychlost mezipásové rekombinace

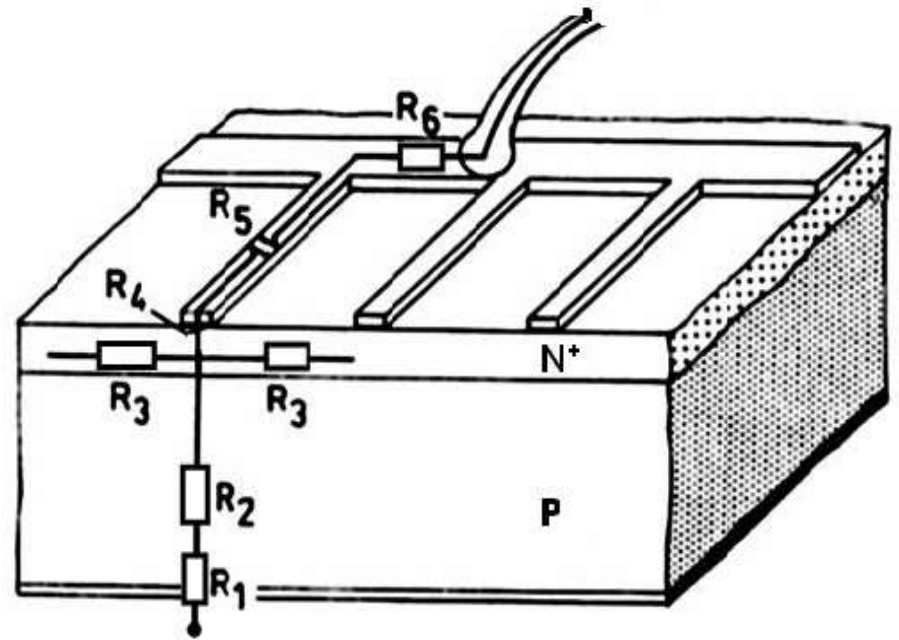
- optimalizace koncentrace příměsí v silněji dotovaných vrstvách

Snížit rychlost povrchové rekombinace

- pasivace povrchu
- pasivace hranic zrn (u multikrystalických materiálů)

Elektrické ztráty

Sériový odpor R_s ovlivňuje silně parametry FV článku



Sériový odpor R_s sestává z:

- R_1 – kontakt kov-polovodič na zadním kontaktu
- R_2 – odpor materiálu báze
- R_3 – laterální odpor vrstvy typu N
- R_4 – kontakt kov-polovodič
- R_5 – odpor „prstu“ sběrnice
- R_6 – odpor hlavní sběrnice

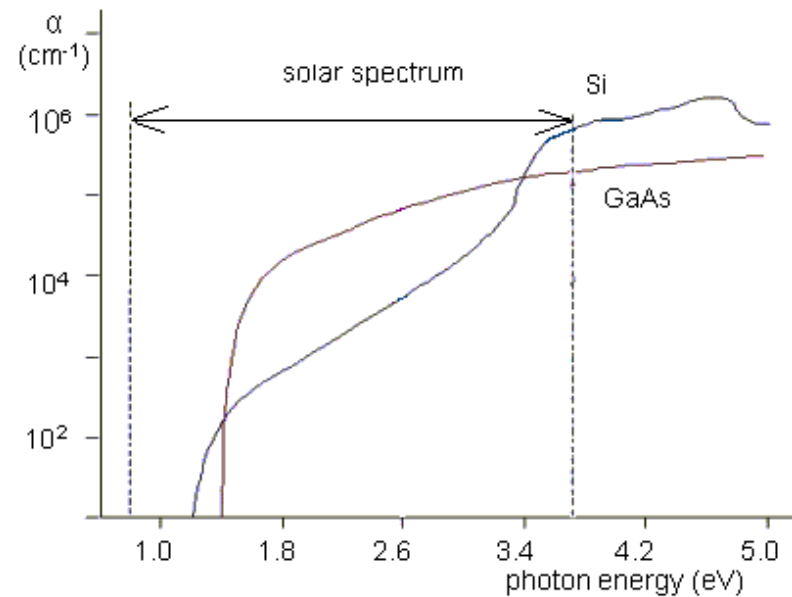
$$R_2 = \rho_{Si} H / A$$

$$R_3 \sim \frac{\rho_N d}{x_j}$$

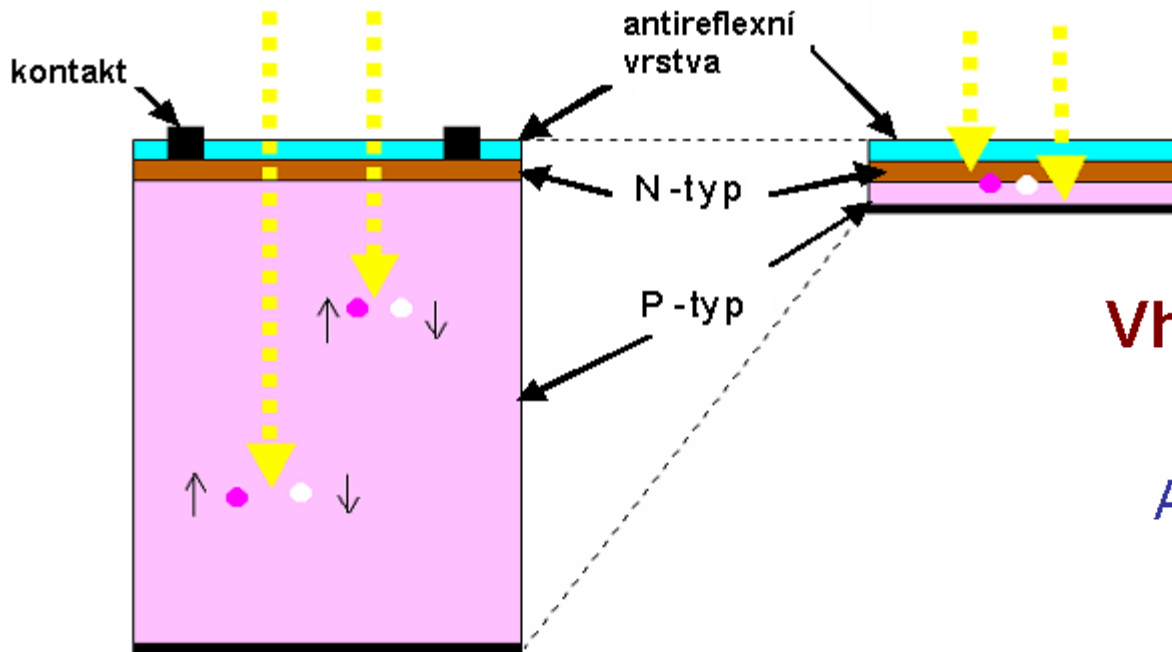
$$R_5 = \frac{\rho_M l}{3bh}$$

$$R_6 \sim \frac{\rho_M l_B}{hb_B}$$

Základní typy článků:



Články z krystalického Si



Tenkovrstvé články

Vhodné materiály

CuInSe₂
Amorfní křemík
amorfní SiGe
CdTe/CdS

Materiály a technologie pro fotovoltaické články

Objemové materiály

- Krystalický křemík - monokrystalický, multikrystalický

91%

Tenkvrstvé struktury

- Amorfnní křemík
- Mikrokrystalický křemík
- Amorfnní germánium
- Amorfnní SiGe
- CdTe/CdS
- CuInSe - CIS

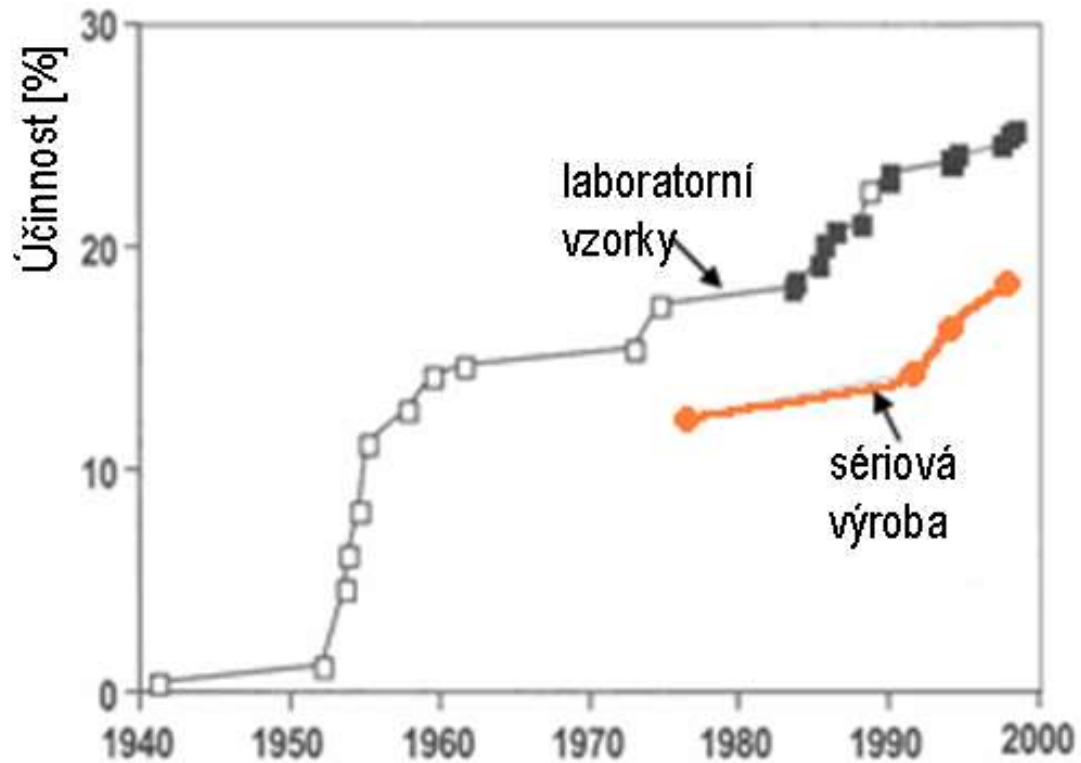
9%

Nové materiály

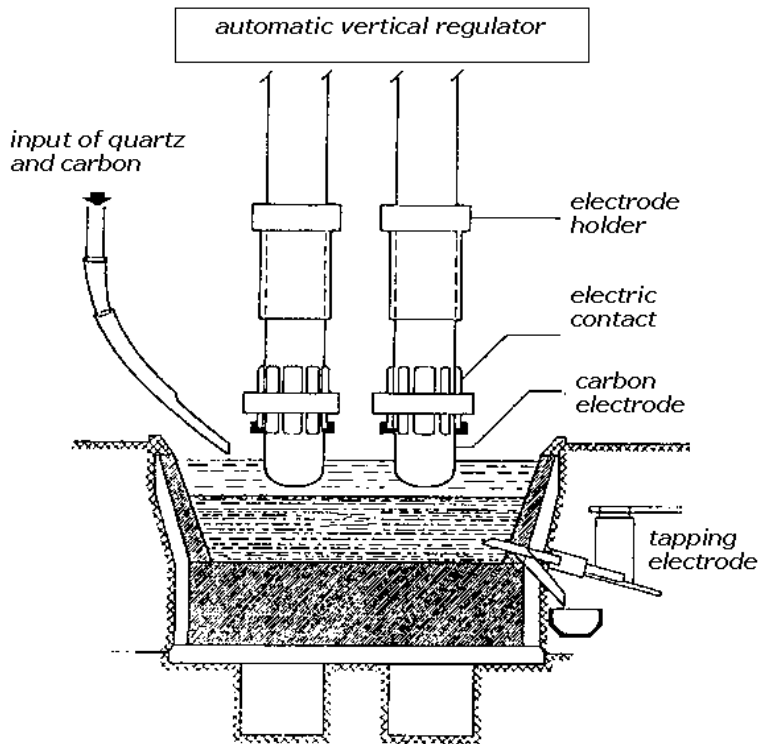
- Gratzel, DSSC
- polymery
- nanotechnologie

R&D

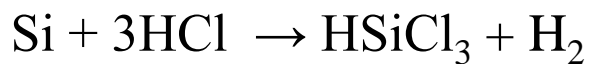
Technologický vývoj křemíkových FV článků



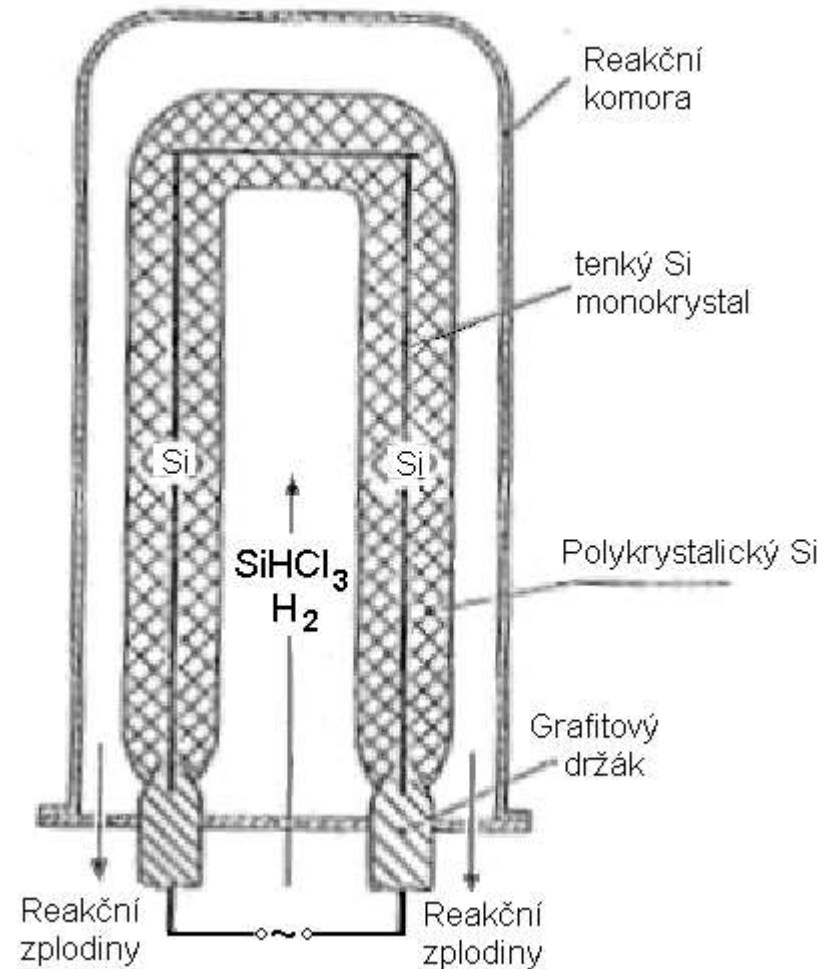
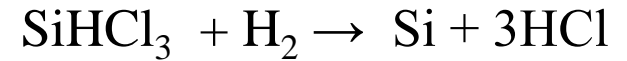
Výroba křemíku potřebné čistoty



99% Si



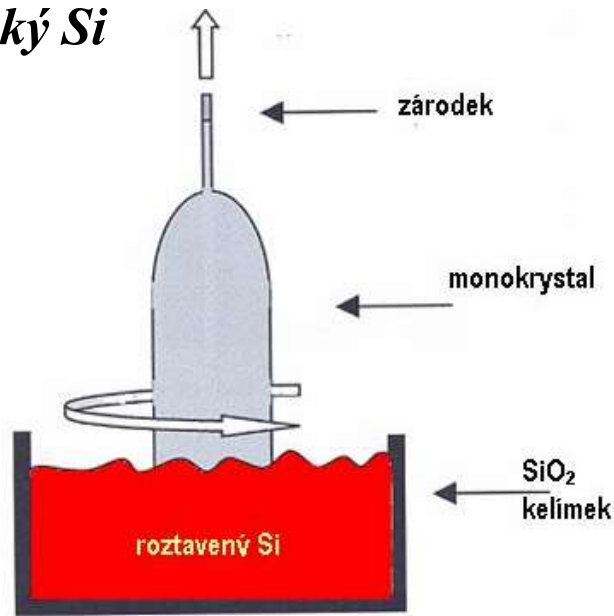
rektifikace



Polykrystalický Si (99,999%)

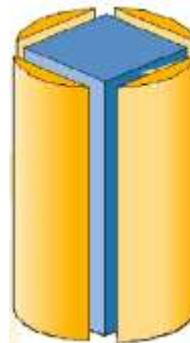
Výchozí materiál – Si typu P (solar grade- 6N)

-monokrystalický Si

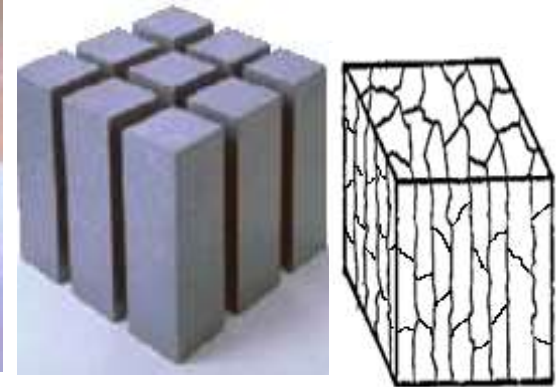
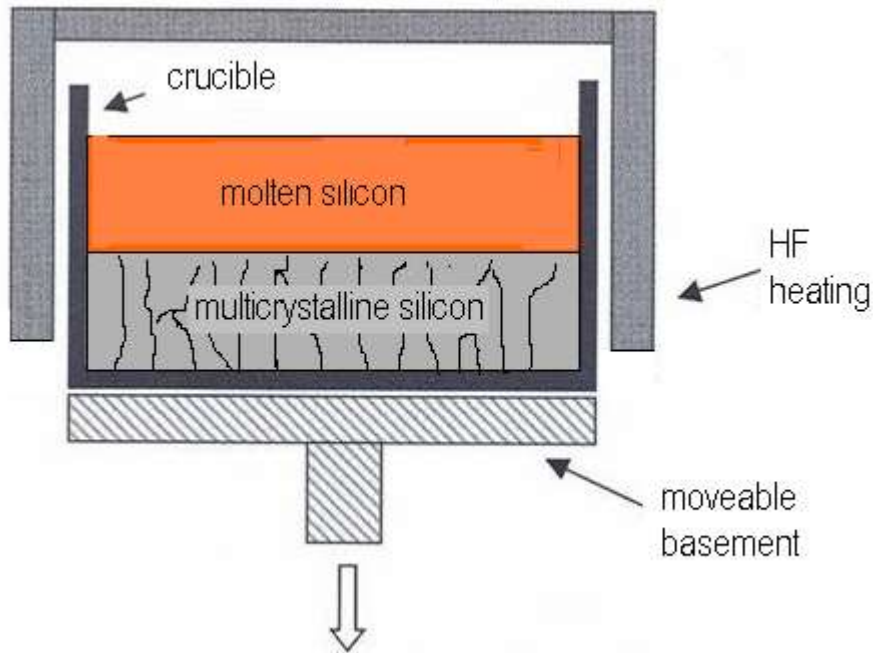


-průměr až 450 mm

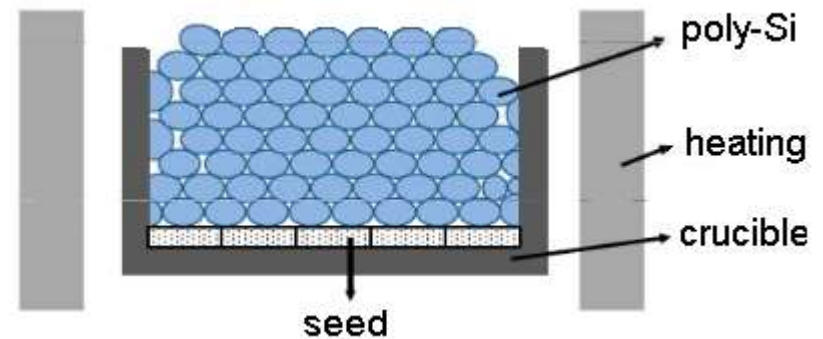
-hmotnost až 300 kg



Výroba multikrystalických ingotů



Multi-like-mono (Quasi mono) c-Si

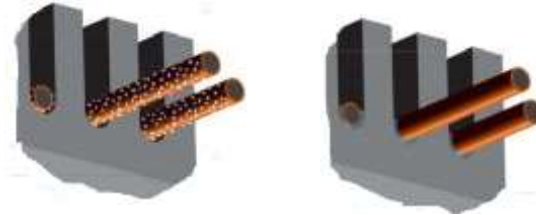
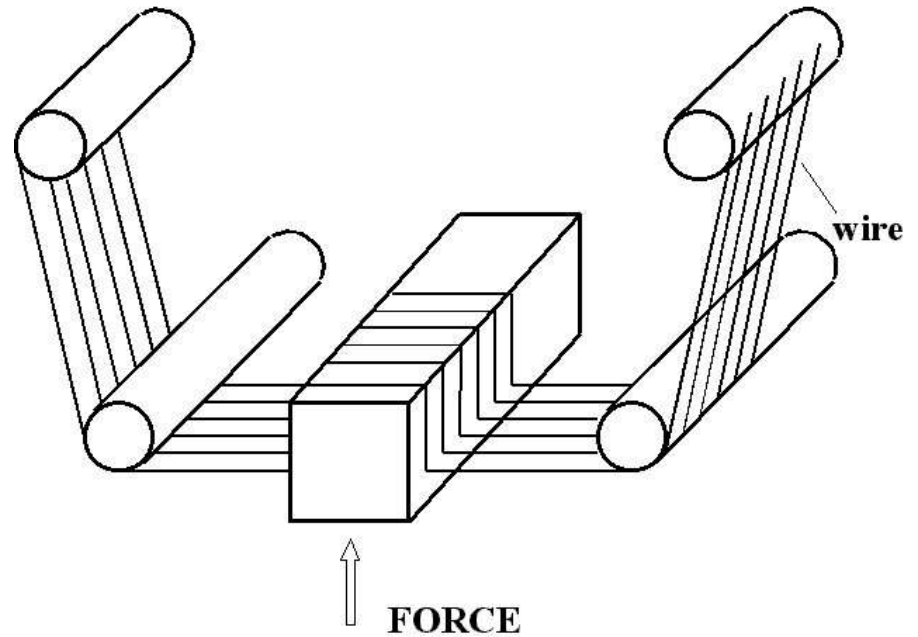


Příprava Si destiček

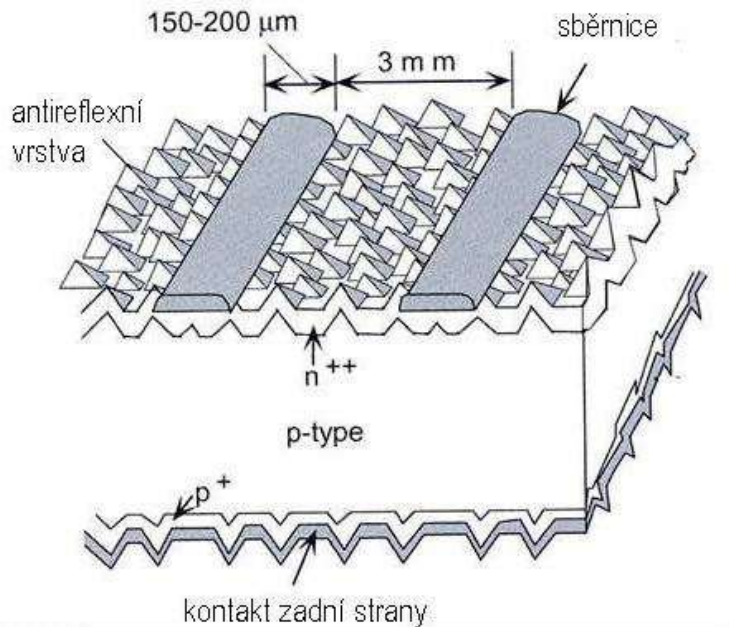
WIRE CUTTING

Rozřezání ingotu na destičky
o tloušťce cca 200 μm a
hraně 100 až 200 mm

Při řezání se ztrácí 40% (i více)
materiálu (Si)



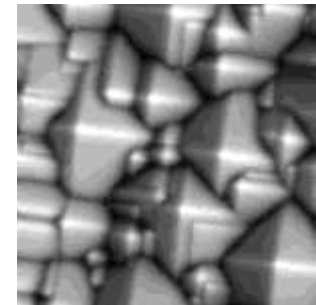
Současná technologie používaná v sériové výrobě



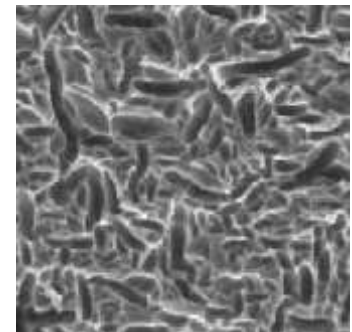
- kontakty realizované pomocí sítotisku (bez fotolitografie a vakuových technologií)

-texturace povrchu bez fotolitografie

- leptání v KOH u monokrystalického (1,0,0) Si



- kyselé leptání v případě jinak krystalograficky orientovaného Si



Výroba článků z krystalického Si

- odleptání zhmožděné vrstvy
- texturace povrchu
- difúze fosforu
- Si_3N_4 ARC
- Ag/Al sítotisk
- Ag sítotisk
- vyžihání kontaktů
- odstranění obvodového zkratu
- měření parametrů a třídění



PV články z krystalického Si

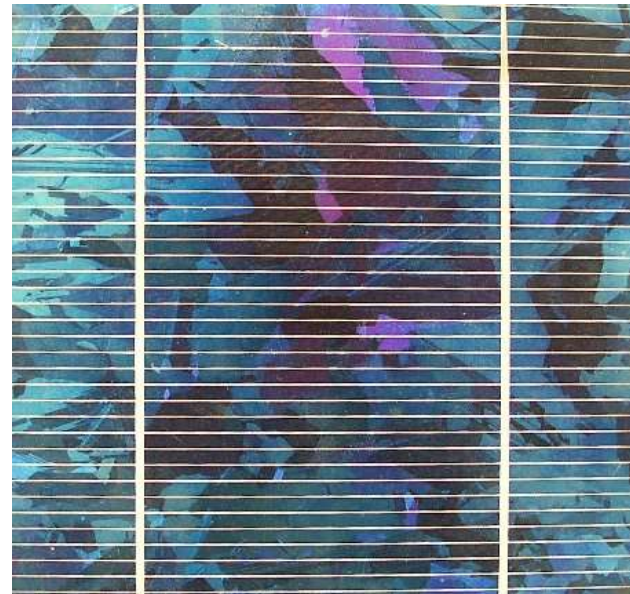
(plocha až 400 cm²)

monokrystalické



$\eta \approx 18\%$

multikrystalické



$\eta \approx 16\%$

Snižování ceny

Snižování energetické náročnosti přípravy krystalického Si

V období 1995-2005 klesla energetická náročnost přípravy monokrystalického CZ křemíku ze 100 kWh/kg na 40 kWh/kg.

Snižování spotřeby křemíku – snižování tloušťky Si destiček a prořezu

300 μm

250 μm

180 μm

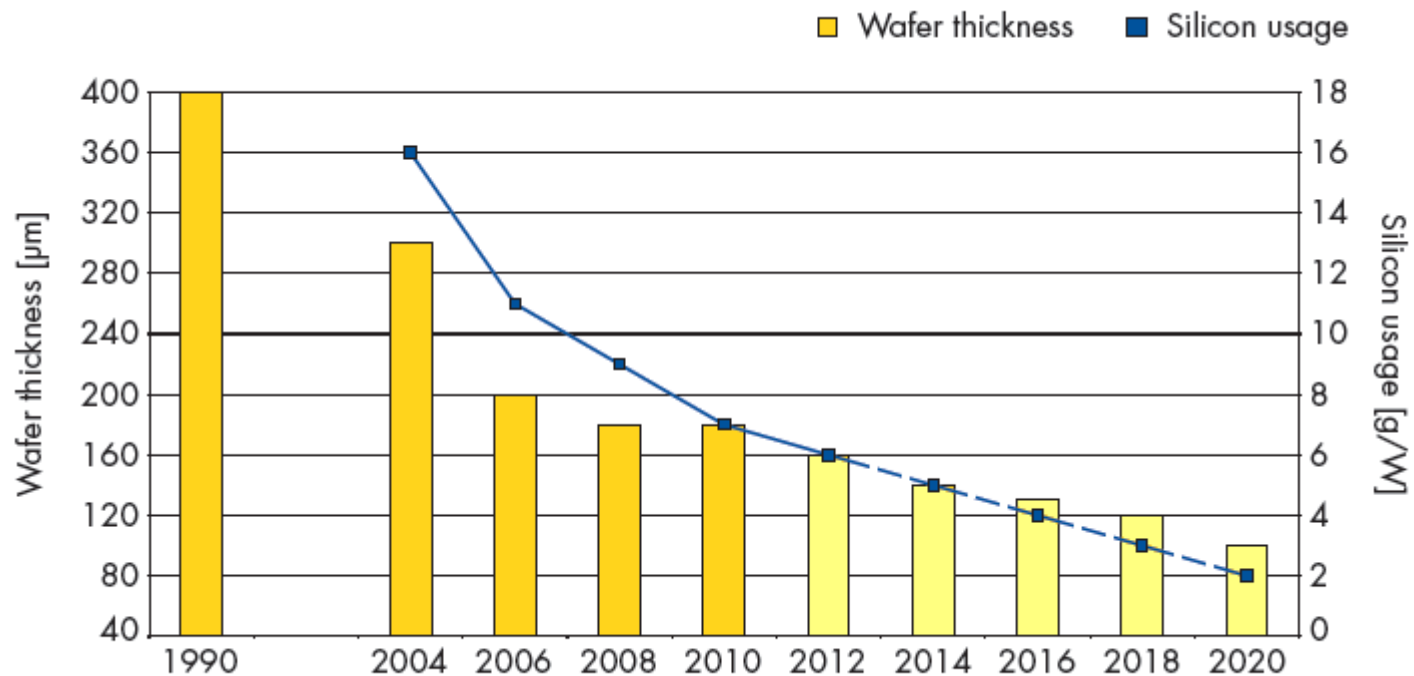
160 μm

V současnosti tloušťka desky 150 - 200 μm

Snižování materiálové náročnosti

Náhrada Ag jinými materiály (Cu?)

Snižování tloušťky výchozích křemíkových destiček - trend



Zvyšování účinnosti článků

- *monokrystalické – ze současných 17% na 20 – 22%*
- *multikrystalické – ze současných 15% na 18 – 20%*
- *pásky Si (ribon) – ze současných 14% na 17-19%*

snížení optických ztrát - zkvalitnění ARC

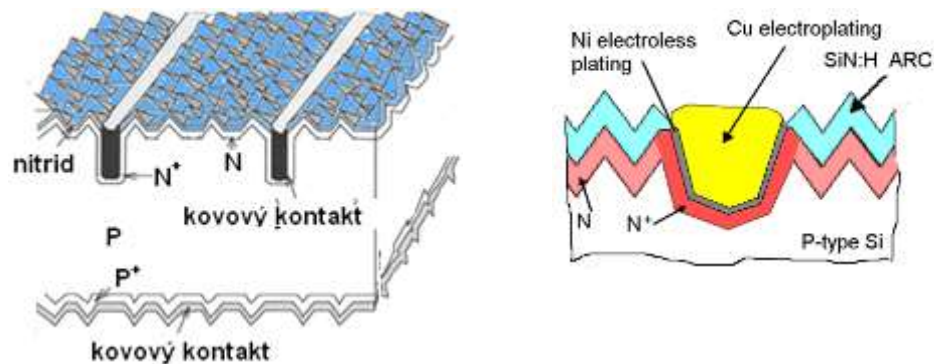
- snížení zastínění povrch

- *snížování ztrát rekombinací (objemovou i povrchovou)*
- *snížení kontaktního odporu*
- *optimalizace konstrukce a technologie*

Zvyšování účinnosti u článků z krystalického Si

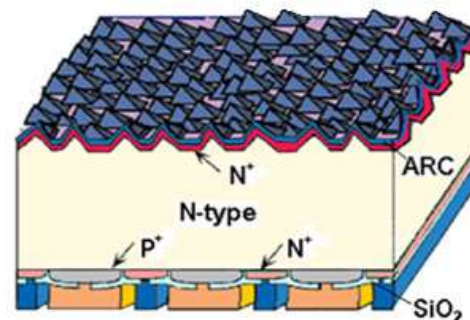
Selektivní emititor

U výchozího materiálu
typu P účinnost až 20%



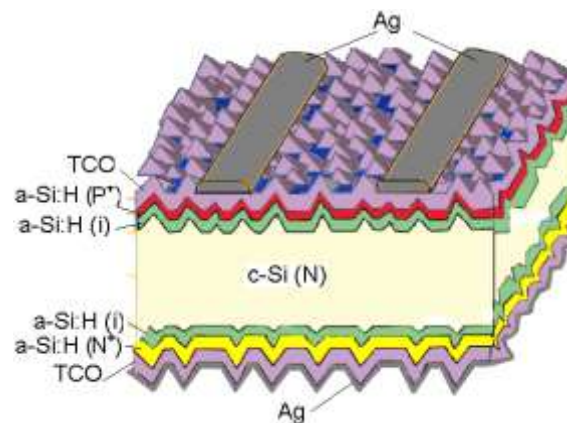
Výchozí materiál monokrystal typu N,
optimalizovaná pasivace povrchu,
kontakty ze zadní strany

Účinnost až 24%

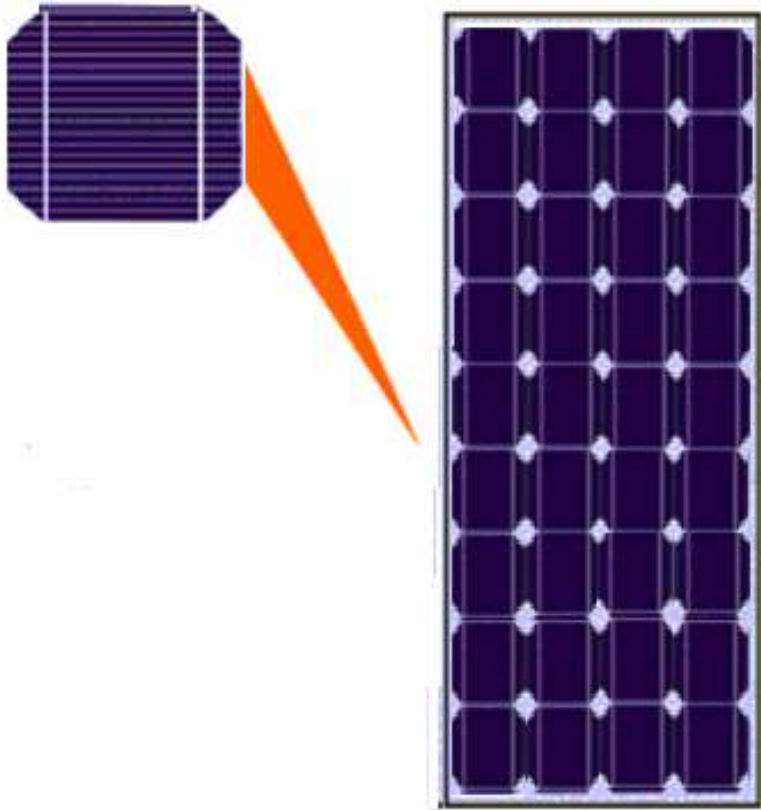


Heteropřechody c-Si/a:Si (HIT)
(monokrystalický)

Účinnost až 22%



FV článek z c-Si.....~0.5 V, ~30 – 40 mA/cm²



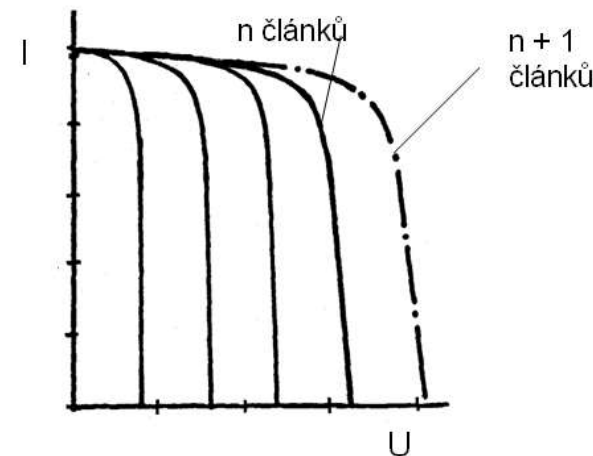
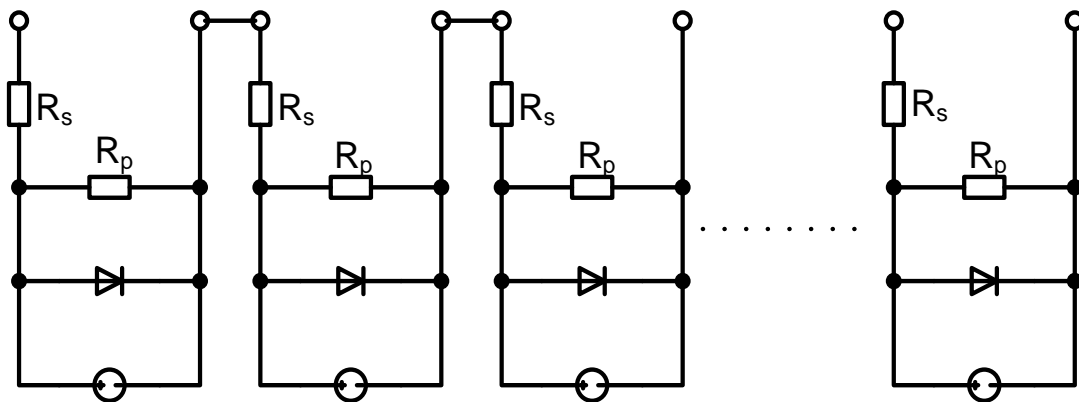
Pro praktické použití je třeba články spojovat do série do **modulů**

FV moduly musí být odolné proti vlhkosti, větru, dešti, krupobití (kroupy o průměru 25 mm), teplotním změnám (od -40 do +85°C) písku a mechanickému namáhání.

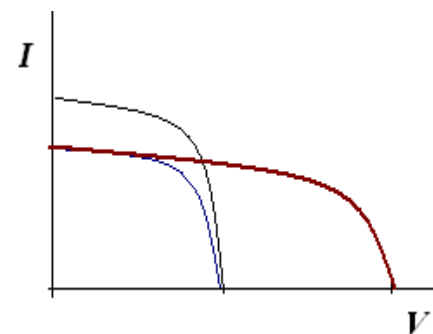
Odolnost vůči napětí > 600 V
> 1000 V

Požadovaná životnost: 20 – 30 let

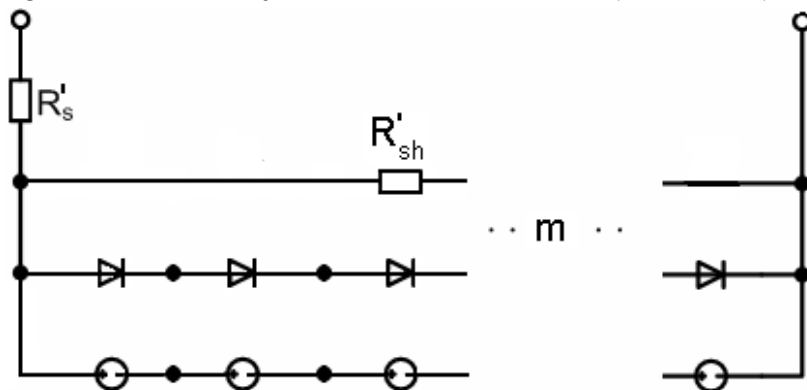
Sériově zapojené FV články: všemi články teče stejný proud



Optimální situace: **Všechny články mají stejný I_{mp}**



Zjednodušený model modulu (řetězce)

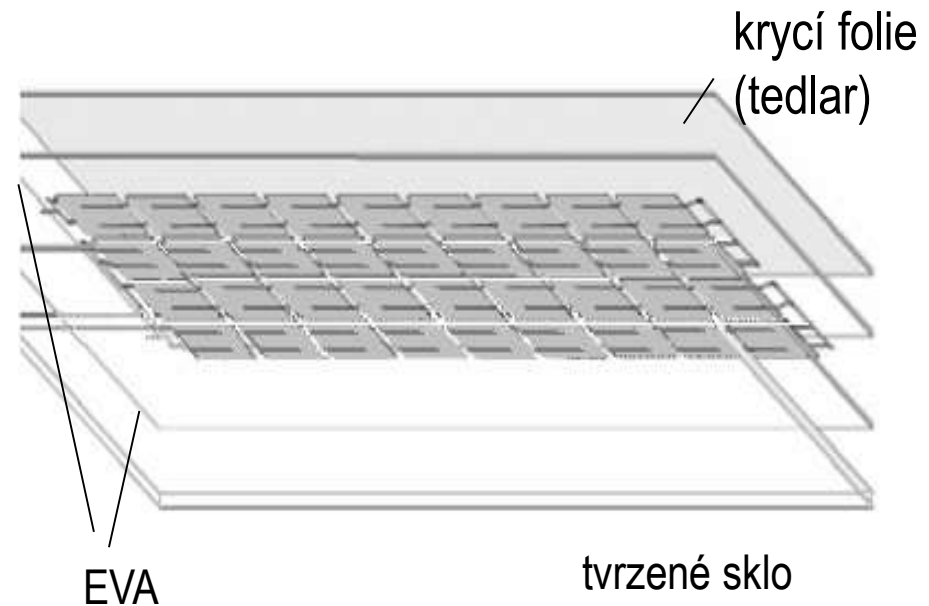
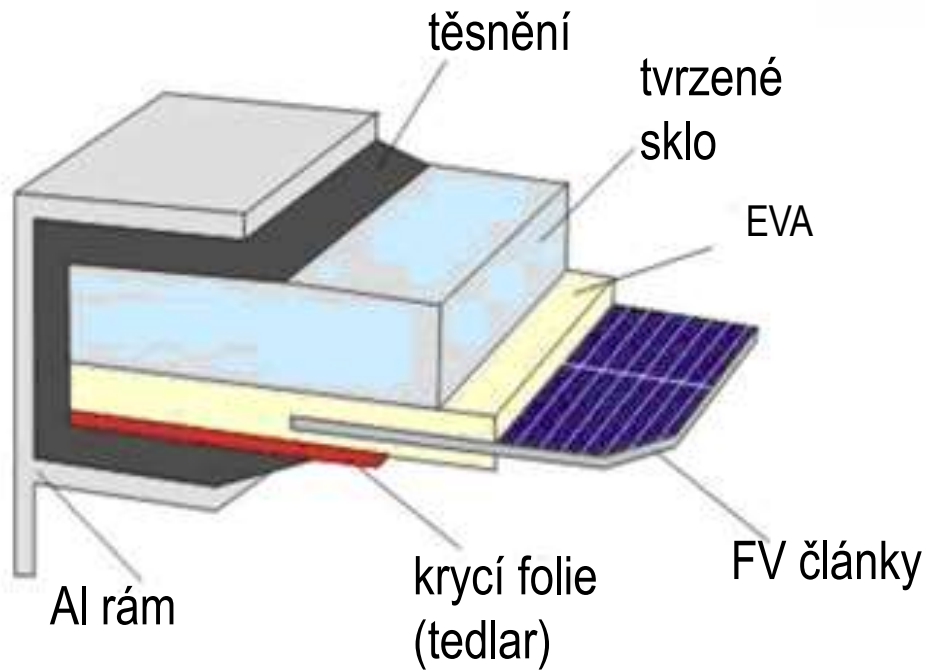
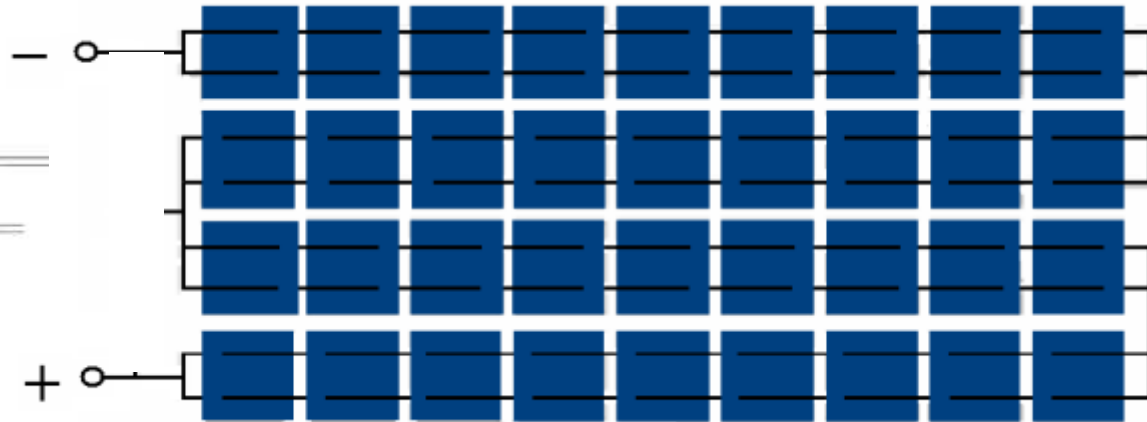


Pokud články mají různý I_{mp} , pracují mimo bod maximálního výkonu a účinnost klesá

$$I = I_{PV} - I_{01} \left[\exp \left(e \frac{U + R'_s I}{m \zeta_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(e \frac{U + R'_s I}{m \zeta_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{U + R'_s I}{R_{sh}}$$

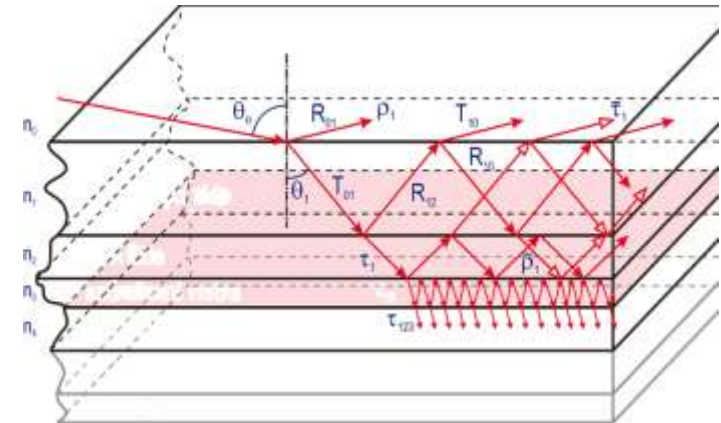
Technologie modulů z c-Si

pájení



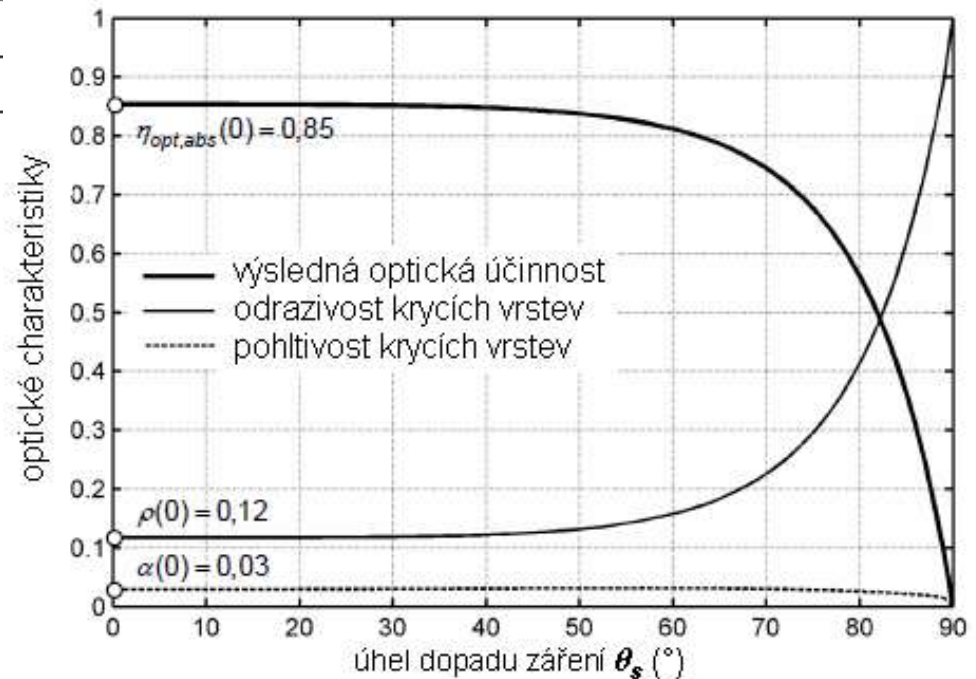
Laminace za sníženého tlaku při 150 °C

Optická účinnost PV modulů



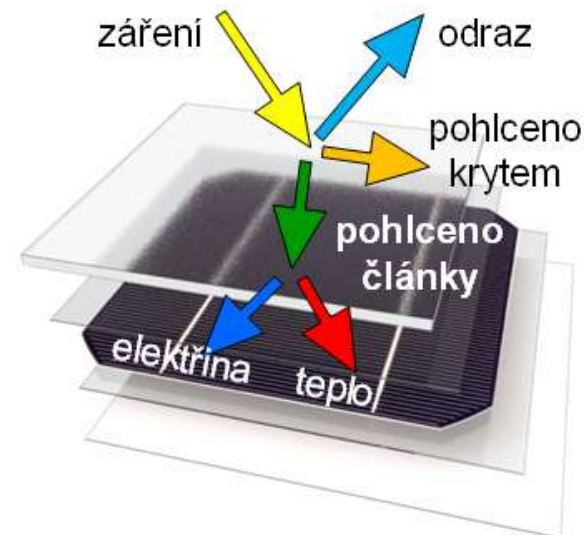
Vrstva	Materiál	Tloušťka	Index lomu	Součinitel pohltivosti
		d [mm]	n [-]	K [-]
krycí sklo	solární sklo	4,0	1,517	4,38
laminační fólie	EVA / PVB	0,5	1,45	25,2
antireflexní vrstva	různé	75×10^{-3}	2,30	-
fotovoltaické články	c-Si	0,3	3,69	-
zadní ochranná fólie	plast	0,3	1,46	-

Optická účinnost PV modulů závisí na úhel dopadu záření θ_s (úhel mezi Sluncem a kolmicí k rovině modulu)



Dopadající záření se z části

- odráží od krycí vrstvy (skla)
- absorbuje se v krycí vrstvě (mění se na teplo)
- absorbuje v PV článku

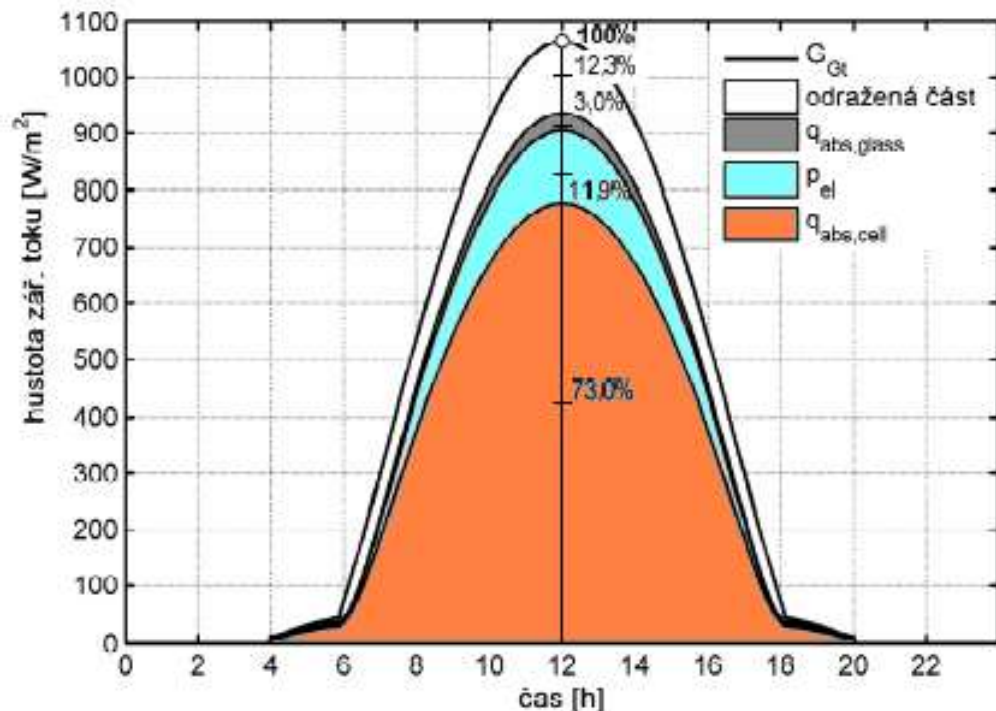


Výsledná účinnost modulů závisí na odrazivosti krycí vrstvy

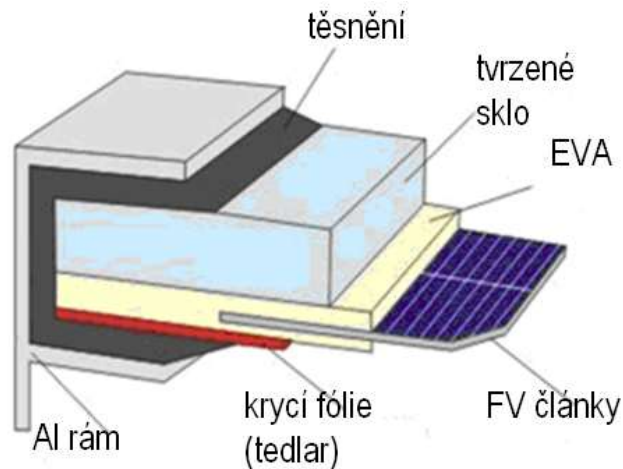
$$\eta_{\text{mod}} = \eta_{\text{opt}} \eta_{\text{cell}}$$

Energie záření absorbovaná v PV článku se mění na

- energii elektrickou
- teplo



Provozní teplota FV článků a modulů



Provozní teplota FV článků v modulu závisí na teplotě okolí, intenzitě dopadajícího záření na konstrukci modulu

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) je definována jako teplota článků T_c při teplotě okolí $T_a' = 20^\circ\text{C}$, intenzitě slunečního záření $G = 0.8 \text{ kWm}^{-2}$ a rychlosti větru 1 ms^{-1} .

$$T_c = T_a + R_{thca} G_{ab}$$

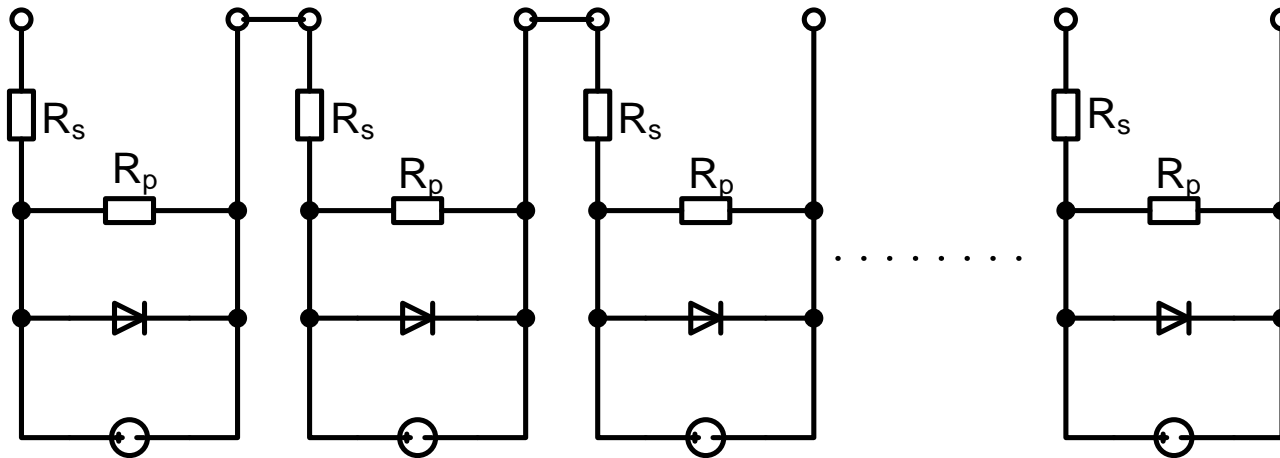
$$R_{thcab} = \frac{d_b}{\lambda_b} + \frac{1}{h_b} \quad R_{thcaf} = \frac{d_f}{\lambda_f} + \frac{1}{h_f}$$

$$R_{thca} = \frac{R_{thcaf} R_{thcab}}{R_{thcaf} + R_{thcab}}$$

Na zadní straně modulu je možno měřit teplotu modulu T_{mod}

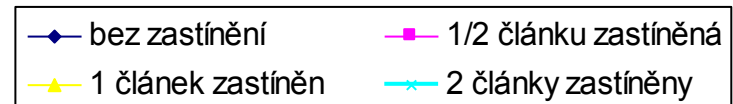
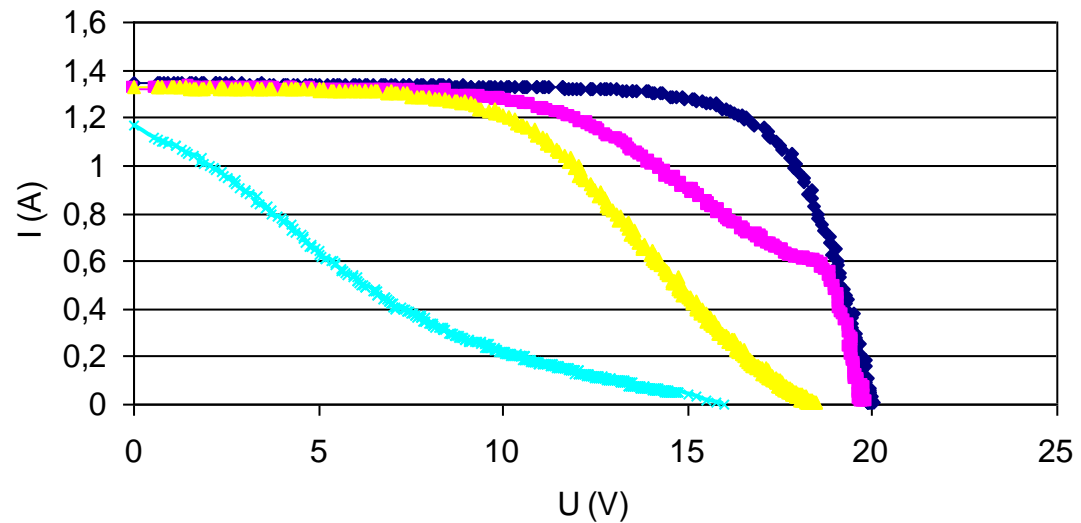
$$T_c = T_{mod} + \Delta T \frac{G}{G_{SCT}}$$

Vliv částečného zastínění – články v sérii

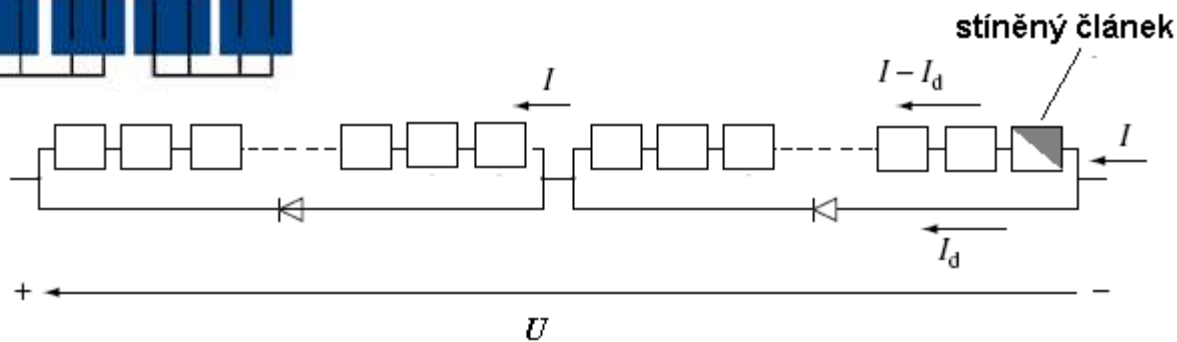
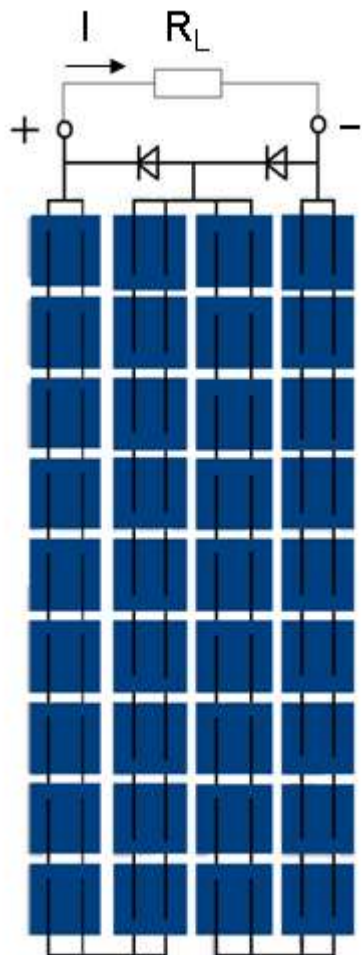


V případě spojení článků do série se zvyšuje sériový odpor

- pokles výstupního proudu
- pokles výstupního napětí
- pokles výstupního výkonu

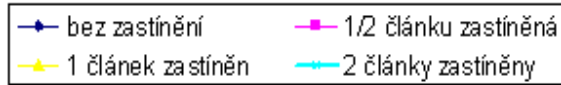
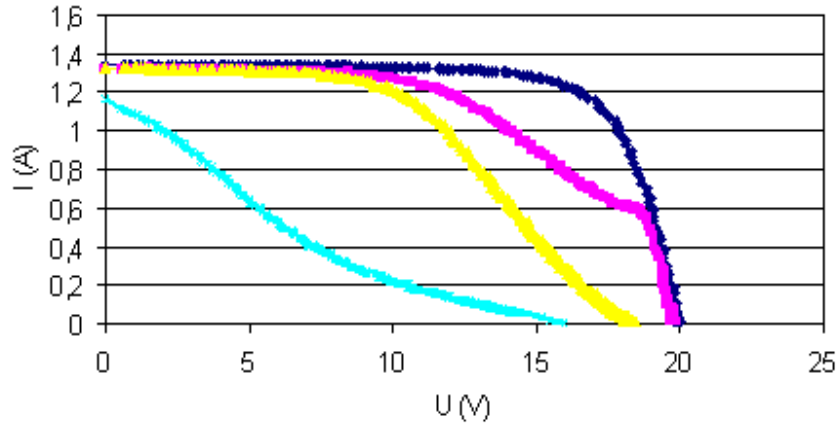


Překlenovací (bypass) diody

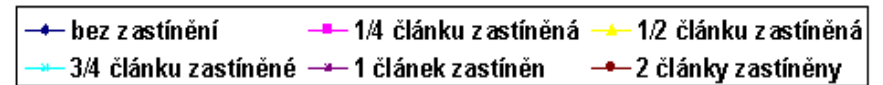
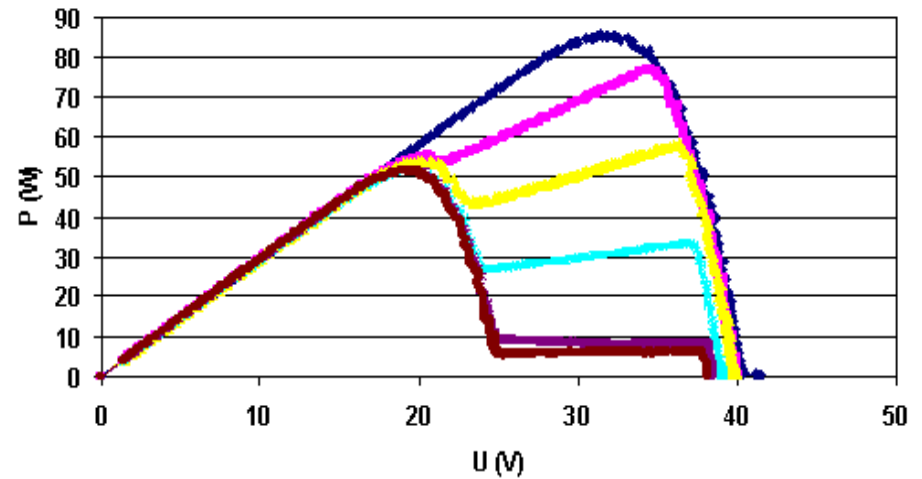
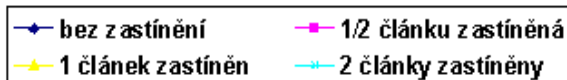
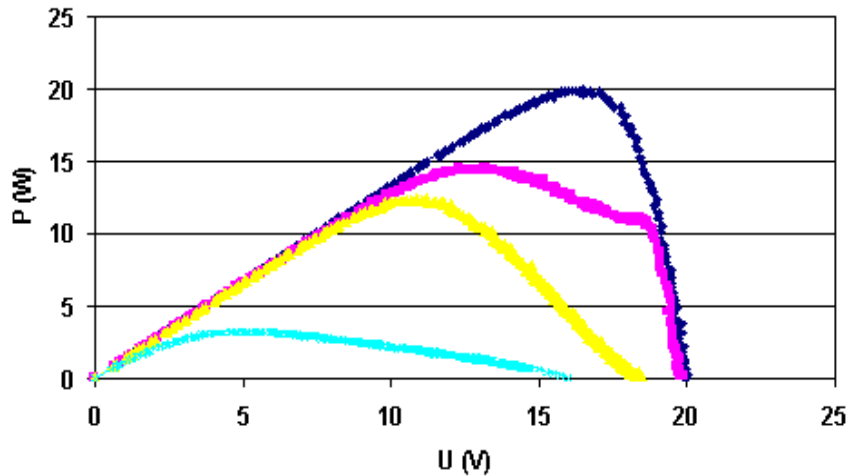
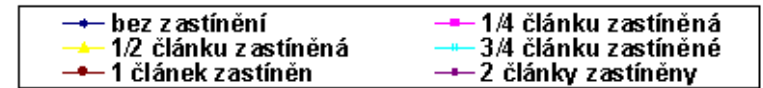
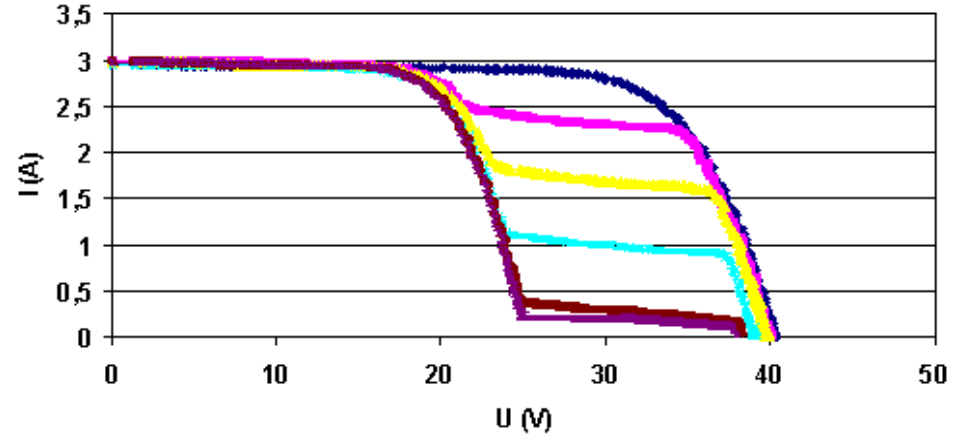


Vliv překlenovacích diod

Bez diod

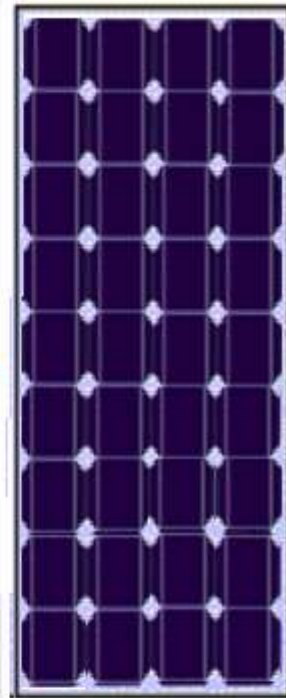


S diodami

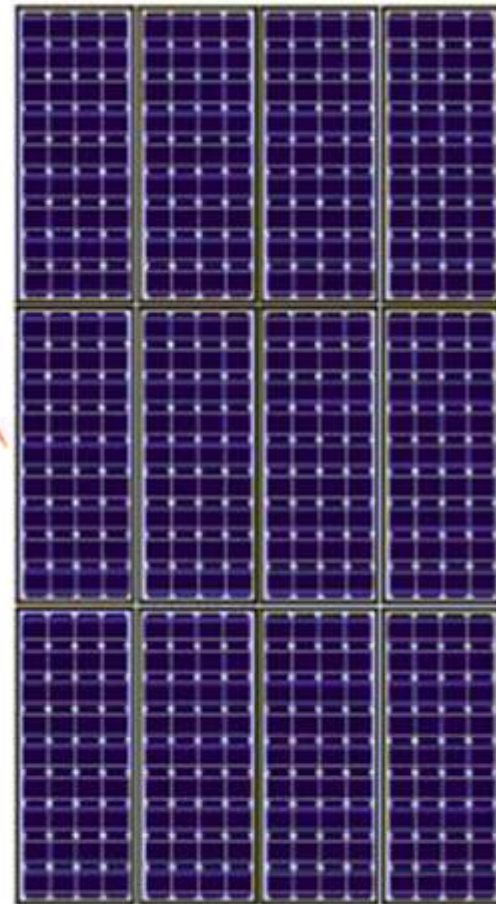




FV článěk



FV modul



FV pole