

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Jiří Toušek; Jana Toušková

Perspektiva využití fotovoltaických článků pro přeměnu sluneční energie

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 36 (1991), No. 4, 217--237

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138403>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1991

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

# Perspektiva využití fotovoltaických článků pro přeměnu sluneční energie

*Jiří Toušek, Jana Toušková, Praha*

## 1. Úvod

Když byla v roce 1957 vypuštěna první umělá družice Země, vznikl problém, jak zlepšit napájení elektrických přístrojů takovýchto kosmických těles. Od této doby začal rychlý rozvoj nejjednodušších a nejspolehlivějších zdrojů elektrické energie — fotovoltaických článků. Naftová krize roku 1973 znamenala další zvýšení zájmu o fotovoltaickou přeměnu slunečního záření. Na Zemi totiž dopadá zářivý tok  $175 \cdot 10^9$  MW, a využití několika setin procenta této hodnoty by znamenalo vyřešit zásobování lidstva naší planety čistou, ekologicky nezávadnou energií. Stačilo by k tomu pokrýt  $10^6$  km<sup>2</sup> vhodné plochy zemského povrchu slunečními články o účinnosti alespoň 10 %. Na této ploše, která činí méně než 5 % celkové rozlohy pouští, by bylo možno postavit sluneční elektrárnu o výkonu  $\sim 10^{13}$  W.

Existují důvody pro i proti využívání slunečních článků. Zdroj energie — Slunce — je prakticky nevyčerpatelný, jeho záření není omezeno jen na některé lokality — lze jej využívat téměř všude na zeměkouli. Výroba elektrické energie nezanechává zplodiny, nehrozí skleníkový efekt ani tepelné zamoření. Na druhé straně má sluneční záření své specifické vlastnosti, k nimž patří nízká hustota zářivého toku ( $1 \text{ kW/m}^2$ ), závislost na počasí a možnost využívání pouze v denním období, což vede k potřebě akumulace energie.

S nízkou hustotou zářivého toku souvisí plocha, kterou články určitého výkonu musí zaujímat. Např. pro elektrárnu o výkonu 1 000 MW by bylo potřeba pokrýt těmito konvertory plochu asi 15 — 20 km<sup>2</sup>. I když se tato rozloha zdá být velká, je srovnatelná s plochou nádrže spolu se zatopenými oblastmi vodní elektrárny stejného výkonu, která je postavena v rovinaté krajině. K ploše zaujímané klasickou tepelnou elektrárnou je nutno ještě přičíst rozlohu uhelných dolů a dalších zdevastovaných oblastí.

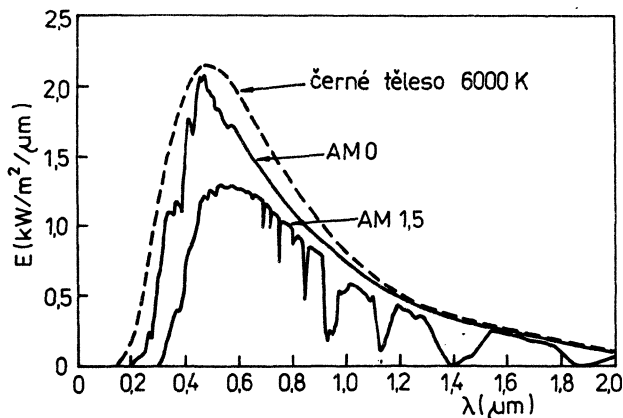
Přestože zásoby paliv na Zemi jsou ještě poměrně značné (uvádí se [1], že ropa vystačí asi na 40 roků, plyn na 120 let, uhlí na 330 let a uran na 115 let), řada států vyčerpá své zdroje mnohem dříve. Např. Velká Británie má zásoby ropy na 5,5 roku, USA na 9 let, Kanada asi na 11 let atd. Ropa se tedy bude muset nahrazovat jinými palivy, především uhlím, což by způsobilo značné zhoršení životního prostředí. Lépe bude, prosadí-li se ekologicky čisté zdroje, jako je větrná, vodní a zejména sluneční energie.

---

RNDr. JIŘÍ TOUŠEK, CSc. (1938) a RNDr. JANA TOUŠKOVÁ, CSc. (1941) jsou odborní asistenti na katedře fyziky polovodičů MFF, Ke Karlovu 5, 121 16 Praha 2.

## 1.1 Sluneční záření

Elektromagnetické záření, které vysílá Slunce, se příliš neliší od záření černého tělesa při teplotě 6000 K. Celkový zářivý tok na jednotku plochy ve střední vzdálenosti Země — Slunce mimo zemskou atmosféru udává solární konstanta, která má hodnotu  $1,353 \text{ kW/m}^2$ . Toto záření, označované jako AM 0, se při průchodu vzduchem zeslabuje a mění se i jeho spektrální složení. Je-li Slunce v zenitu, procházejí jeho paprsky minimální tloušťkou zemské atmosféry a odpovídající záření je AM 1. Jestliže sluneční paprsek svírá se zenitem úhel  $\vartheta$ , je poměr mezi skutečnou a minimální dráhou roven  $x = 1/\cos \vartheta$  a příslušné záření se označuje jako AM x. Nejpoužívanějším definovaným zářivým tokem pro testování slunečních článků je standard AM 1,5 s plošnou hustotou výkonu  $1 \text{ kW/m}^2$ . Odpovídající plošná hustota spektrálního zářivého toku je znázorněna na obr. 1, kde je pro srovnání uvedena tato veličina i pro záření neoslabené při průchodu zemskou atmosférou a pro záření černého tělesa [2].



Obr. 1. Závislost plošné hustoty spektrálního zářivého toku Slunce a černého tělesa o teplotě 6000 K na vlnové délce (význam AM 0, AM 1,5 viz text).

Absorpční pásy ve spektru AM 1,5 jsou způsobeny hlavně absorpcí vodními parami, oxidem uhličitým a kyslíkem. Průchodem atmosférou se celkově zeslabuje sluneční záření asi o 30 %. Sluneční záření na povrchu Země obsahuje také difúzní složku, která vzniká jeho rozptylem v atmosféře. Difúzní záření má obecně jiné spektrální složení a obvykle se považuje za izotropní. Za jasného dne činí 10 až 20 % celkové intenzity, ale s přibývajícím oblačností jeho podíl roste.

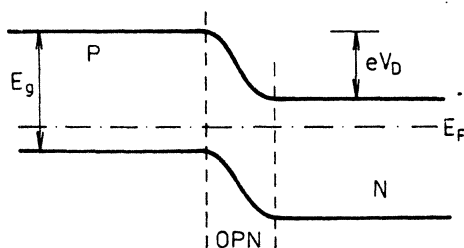
## 2. Princip činnosti fotovoltaického článku

Fotovoltaické články jsou polovodičové součástky, které přeměňují energii záření na energii elektrickou. Je-li v polovodiči absorbován foton o dostatečné energii, vybudí elektron z valenčního pásu do pásu vodivostního a vznikne tak pár elektron–díra. Vnitřní elektrické pole v článku páry rozdělí a ve vnějším obvodu se objeví elektric-

ký proud. K rozdělování párů slouží nejčastěji pole vytvářené přechodem P–N nebo Schottkyho kontaktem.

## 2.1 Fotovoltaický článek s přechodem P–N

Přechod P–N je vlastně kontakt oblastí polovodiče s elektrickou vodivostí typu P a oblasti s elektrickou vodivostí typu N, přičemž obě oblasti mohou být buď z chemicky stejného, nebo rozdílného materiálu. V prvním případě jde o homogenní přechod a ve druhém o heterogenní. Na obr. 2 je znázorněno pásové energetické schéma homogenního přechodu P–N s vyznačením oblastí prostorového náboje (OPN) a velikosti difúzního napětí  $V_D$ .  $E_g$  značí šířku pásu zakázaných energií polovodiče.  $E_F$  je Fermiho hladina.

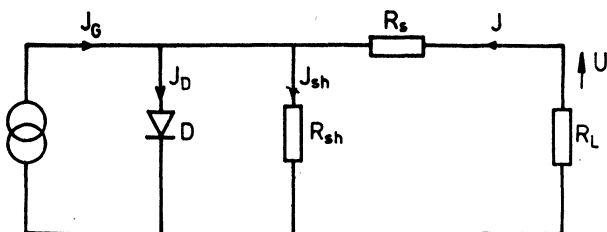


Obr.2. Energetické pásové schéma homogenního přechodu P–N.  $E_g$  — šířka zakázaného pásu,  $E_F$  — Fermiho hladina,  $V_D$  — difúzní napětí, OPN — oblast prostorového náboje.

Vnitřní elektrické pole má směr od N k P a brání tedy pohybu majoritních nosičů přes přechod. Nosiče proudu generované zářením v OPN (nadbytečné nosiče) jsou jím však urychlovány tak, že elektrony směřují do oblasti typu N a díry do oblasti typu P. Vlivem tohoto pole probíhá odsávání velmi rychle, takže koncentrace nadbytečných nosičů je v OPN malá. Jsou-li ozářeny také neutrální části, vzniká na rozhraní s OPN gradient koncentrace nadbytečných nosičů. To vede ke vzniku difúzních proudů do OPN, které jsou nesené jak elektrony, tak i děrami a k přenosu náboje tedy nedochází. Na rozhraní s OPN jsou z difúzního proudu tekoucího z oblasti P odsávané elektrony a z difúzního proudu z oblasti N jsou odsávané díry. Teprve nyní se může projevit příspěvek z neutrálních oblastí, které by bez existence OPN neměly na funkci součástky žádný vliv. Difúzní proudy tvoří však podstatnou složku celkového proudu vzhledem k tomu, že při silném dopování, které se pro dobrou funkci součástky vyžaduje, je šířka OPN malá a počet nosičů, které v ní mohou být generovány, je proto nízký.

O odlišnostech heterogenního přechodu v souvislosti s využitím pro fotovoltaické měniče energie pojednáme v odstavci 3.1.

Pro výpočet proudu  $J$  tekoucího ozářeným článkem je nutno řešit rovnici kontinuity se započtením generace a rekombinace nadbytečných nosičů vytvořených ozářením. Pro pochopení funkce článku je vhodné vycházet z náhradního schématu podle obr. 3, kde je ozářený přechod představován generátorem proudu  $J_G$  s paralelně připojenou diodou. U reálné struktury je nutno počítat s určitým sériovým ( $R_s$ ) i s paralelním



Obr. 3. Náhradní schéma osvětleného fotovoltaického článku.

odporem ( $R_{sh}$ ). Proud  $J_G$  se dělí na proud diodou  $D$ , paralelním odporem a zátěží  $R_L$ . Obecně zátěži protéká proud  $J$ , který se rovná [3]

$$(1) \quad J = \sum_i J_{oi} [\exp\{\alpha_i(U - JR_s)\} - 1] - J_G + J_{sh}.$$

První člen na pravé straně představuje volt-ampérovou (V-A) charakteristiku diody se sériovým odporem za tmy. Průchodem proudem  $J$  zátěží  $R_L$  vzniká spád napětí o velikosti  $U$ . V důsledku toho se dioda polarizuje do propustného směru napětím  $U - JR_s$ . Výsledný proud  $J_D$  ve V-A charakteristice diody je obecně součtem proudů, charakterizovaných parametry  $J_{oi}$ ,  $\alpha_i$ , které souvisí s různými mechanismy přenosu náboje (difúzní, termálně emisní, tunelový, rekombinační, nebo jejich kombinace). Vztah (1) lze odvodit za předpokladu, že  $J_{oi}$ ,  $\alpha_i$ ,  $R_s$  a  $R_{sh}$  se nemění s osvětlením, tj. nemění se mechanismus přenosu náboje a parazitní odpory diody.

Provedeme diskusi pro případ, že převládá jediný mechanismus a lze zanedbat proud  $J_{sh}$ . Namísto (1) lze psát jednodušeji

$$(1a) \quad J = J_0 \left( \exp \left[ \frac{e(U - JR_s)}{nkT} \right] - 1 \right) - J_G.$$

Zde  $n$  označuje faktor kvality diody a  $J_0$  velikost nasyceného proudu. Např. pro čistě difúzní mechanismus je  $n = 1$ ;  $n = 2$  obvykle ukazuje na rekombinaci v OPN.

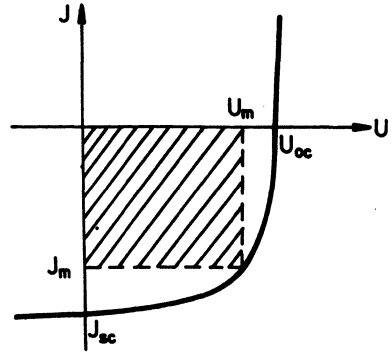
Z (1a) lze vypočítat napětí naprázdno  $U_{oc}$ , je-li obvod fotočlánku rozpojen, a tedy  $J = 0$ :

$$(2) \quad U_{oc} = \frac{nkT}{e} \lg \left( 1 + \frac{J_G}{J_0} \right).$$

Napětí na zátěži se mění od  $U = 0$  do  $U = U_{oc}$  a proud od určité hodnoty  $J_{sc}$  v režimu nakrátko ( $J_{sc} < J_G$ ) do  $J = 0$ .

V režimu naprázdno se napětí o velikosti  $V_D$  (obr. 2) snižuje na hodnotu  $V_D - U_{oc}$ . Z obrázku je současně vidět, že  $eV_D$  nemůže překročit hodnotu  $E_g$ . Vztahy (1a) a (2) ukazují na souvislost  $U_{oc}$  s faktorem kvality diody  $n$ . Vzrůst tohoto faktoru nad hodnotu  $n = 1$  by měl vést ke zvýšení  $U_{oc}$ . Změna mechanismu přenosu náboje např. z difúzního ( $n = 1$ ) na rekombinační ( $n = 2$ ) by však zároveň znamenala pokles proudu  $J_G$  vzhledem k rekombinaci nadbytečných nosičů proudu v OPN.

Charakteristika osvětleného článku je znázorněna na obr. 4. Podle vztahů (1), resp. (1a) se při osvětlení V-A charakteristika posune oproti charakteristice měřené za tmy



Obr. 4. Volt-ampérová charakteristika osvětleného článku.

dolů o hodnotu  $J_{sc}$ . Maximální výkon, který lze z článku odebrat, je dán plochou největšího vepsaného obdélníku, jak je znázorněno na uvedeném obrázku. Na základě toho se definuje tzv. faktor zaplnění  $FF$  pomocí vztahu

$$(3) \quad FF = \frac{U_m J_m}{U_{oc} J_{sc}}$$

Tento faktor spolu s  $U_{oc}$  a  $J_{sc}$  udává kvalitu fotovoltaického článku.  $FF$  je tím větší, čím je menší  $R_s$  a větší  $R_{sh}$ . Hodnotu  $U_{oc}$  lze zvýšit užitím polovodiče s větší šířkou zakázaného pásu. Polovodič však efektivně absorbuje ty fotony, jejichž energie je větší než  $E_g$ . Poklesne-li počet absorbovaných fotonů, sníží se proud nakrátko  $J_{sc}$ . Z toho plyne, že pro dané detekované spektrum (např. sluneční) existuje optimální šířka zakázaného pásu.

## 2.2 Účinnost a ztrátové mechanismy

V tomto odstavci se již budeme zabývat fotovoltaickými články pro konverzi slunečního záření — slunečními články. Nejzajímavějším parametrem slunečního článku je jeho účinnost. Definuje se vztahem [4]:

$$(4) \quad \eta = \frac{P_m}{P_0} = \frac{|U_m J_m|}{S \int_0^{\infty} F(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda}$$

kde  $P_0$  je výkon slunečního záření, které dopadá na článek o ploše  $S$ ,  $P_m$  je výkon získávaný z článku,  $F(\lambda)$  je spektrální hustota fotonového toku slunečního záření na jednotku plochy.

Celý proces přeměny zářivé energie na energii elektrickou lze rozdělit do několika fází. Každá z nich se vyznačuje určitým ztrátovým mechanismem, jemuž odpovídá příslušná parciální účinnost  $\eta_i$ . Výsledná účinnost je pak dána součinem jednotlivých položek  $\eta_i$ , tj. vztahem

$$(5) \quad \eta = \prod_i \eta_i$$

Za předpokladu, že odrazivost  $R(\lambda)$  nahradíme jistou střední hodnotou  $R$ , můžeme pravou stranu vztahu (4) s uvážením (3) rozepsat na součin pěti členů:

$$(6) \quad \eta = \frac{S_a(1-R)}{S} \frac{E_g \int_0^{\lambda_0} F(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} F(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda} \frac{\int_0^{\lambda_0} \eta_c(\lambda) F(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\lambda_0} F(\lambda) d\lambda} \frac{eU_{oc}}{E_g} F_t$$

Symbolem  $S_a$  je označena aktivní plocha, tj. plocha nezastíněná elektrodami, a  $\lambda_0 = \frac{hc}{E_g}$ .

Pro dopadu záření se jako první uplatní člen

$$(7) \quad \eta_1 = \frac{S_a(1-R)}{S},$$

kteřý vyjadřuje účinnost pronikání fotonů do polovodiče. Ztráty energie jsou v této fázi způsobeny reflexí a stínícím účinkem kontaktů.

Druhý činitel v rovnici (6) má tvar

$$(8) \quad \eta_2 = \frac{E_g \int_0^{\lambda_0} F(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} F(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda}$$

a představuje podíl energie využitelné materiálem o šířce zakázaného pásu  $E_g$ . Tento člen vyjadřuje jednak ztráty spojené s dlouhovlnnými fotony, které nemohou generovat páry nosičů, jednak ztráty způsobené absorpcí fotonů s energií větší než  $E_g$ , neboť přebytečná energie předaná nosičům se přemění v teplo. V polovodičích s menší šířkou zakázaného pásu je sice využít větší počet fotonů, ale z každého jen poměrně malá část energie. U materiálů s širším zakázaným pásem je tomu naopak.

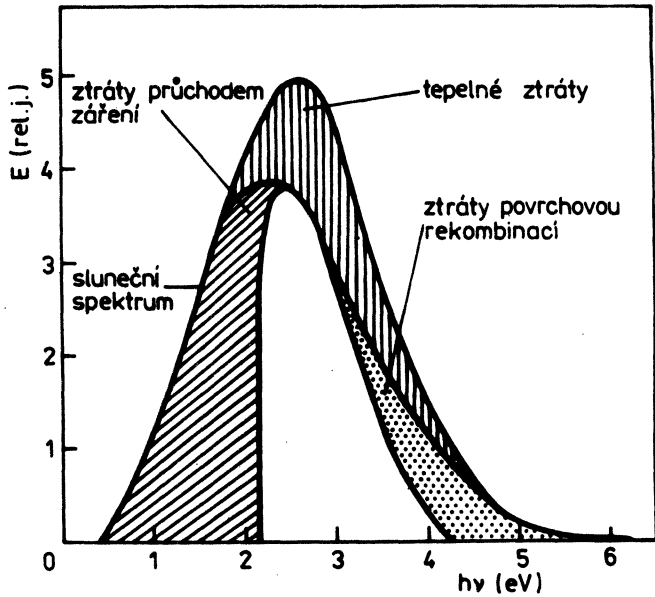
Ztráty v důsledku objemové a povrchové rekombinace popřípadě rekombinace na rozhraní, popisuje třetí člen v (6)

$$(9) \quad \eta_3 = \frac{\int_0^{\lambda_0} \eta_c(\lambda) F(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\lambda} F(\lambda) d\lambda},$$

kteřý má význam sběrné účinnosti nemonochromatického záření. Veličina  $\eta_c(\lambda)$  vyjadřuje, jaká část nosičů generovaných zářením o vlnové délce  $\lambda$  se skutečně podílí na tvorbě fotoproudu. Ztráty neúplnou absorpcí záření, ztráty energie fotonů s  $h\nu > E_g$  a ztráty povrchovou rekombinací jsou schematicky znázorněny na obr. 5.

Jako čtvrtý je v (6) uveden tzv. napěťový faktor

$$(10) \quad \eta_4 = \frac{eU_{oc}}{E_g}.$$



Obr. 5. Závislost spektrálního zářivého toku Slunce na energii fotonů se schematickým znázorněním některých ztrát ve slunečním článku (podle [5]).

Ten vyjadřuje skutečnost, že napětí naprázdno nedosahuje limitní teoretické hodnoty  $E_g$ .

Poslední člen je již dříve zavedený faktor zaplnění (viz vztah (3))

$$(11) \quad \eta_5 = FF.$$

Napěťový faktor a faktor zaplnění představují ztráty energie v závěrečné fázi přeměny.

Na obr. 6 je pro ilustraci uvedeno, jak jednotlivé ztrátové mechanismy ovlivňují výslednou účinnost křemíkového článku staršího typu [3]. Účinnosti dosahované v současné době (viz. tabulky I, II) jsou především důsledkem zvýšení sběrné účinnosti (snížení rekombinačních ztrát), faktoru zaplnění a napětí naprázdno.

#### Tabulka I

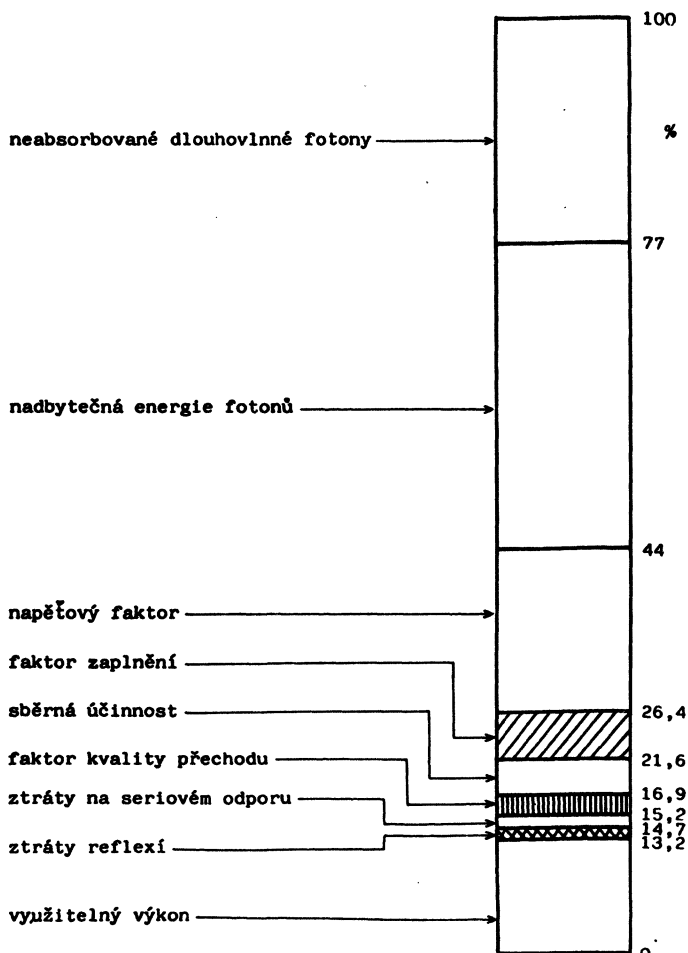
Přehled účinnosti některých slunečních článků na bázi monokrystalů  
Podmínky: spektrum AM 1,5, 100 mW/cm<sup>2</sup>, teplota 25° C.

článek	$\eta$ [%]	typ	firma (laboratoř)
Si	22,2	a	Stanford
GaAs	23,7	a	Kopin
	24,4	a	Varian
InP	20,3	a	SERI
	20,4	a	SPIRE
tandem $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs$	27,3	a/a	SERI
$Ga_xAl_{1-x}As-GaAs$	27,6	b	Varian

a — homogenní přechod

b — heteropřechod





Obr. 6. Rozdělení energetických ztrát záření AM 1 v křemkovém článku s přechodem P-N (převzato z [3]).

## Tabulka II

Přehled účinnosti některých polykrystalických a amorfních tenkovrstvových slunečních článků  
Podmínky: spektrum AM 1,5, 100 mW/cm<sup>2</sup>, teplota 25° C.

článek	$\eta$ [%]	typ	firma (laboratoř)
a-Si:H	12	a	Solarex
tandem a-Si:H/CdS-CuInSe <sub>2</sub>	14,6	a/b	Arco Solar
sklo/SnO <sub>2</sub> /CdS-CdTe	11,9	b	Photon Energy
CdS-CuInSe <sub>2</sub>	10,3	b	SERI
sklo/ITO/CdS-Cd <sub>x</sub> Hg <sub>1-x</sub> Te	10,6	b	ISET

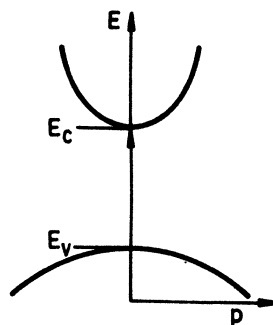
a — homogenní přechod

b — heteropřechod

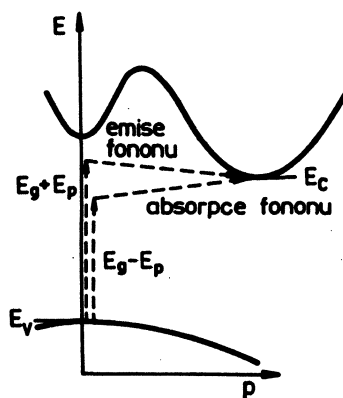
### 3. Materiály pro sluneční články

#### 3.1 Úvod

Homogenní přechody dosahují obvykle velkého napětí naprázdno, neboť mají nízký nasycený proud  $J_0$ . Takové přechody mívají například fotovoltaické články z krystalického křemíku, což je materiál s nepřímým zakázaným pásem (viz obr. 7b). Polovodiče tohoto typu se vyznačují malou absorpcí záření. Aby nedocházelo ke ztrátám, je nutné aby články byly dostatečně tlusté (minimálně  $100\ \mu\text{m}$ ). Přechod bývá lokalizován nepříliš hluboko pod povrchem, kde je generace zářením největší a kde pole přechodu může odsáváním nosičů snižovat vliv povrchové rekombinace. Protože záření generuje nosiče rovněž daleko od přechodu, je potřeba, aby měly dostatečně dlouhé difúzní délky. Těch je možno dosáhnout jen v polovodičích s vysokou čistotou základního materiálu, což klade velké nároky na technologii a znamená vysoké náklady.



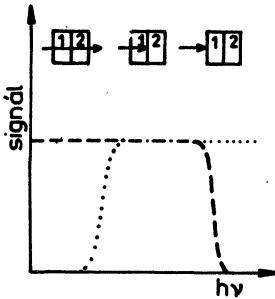
Obr. 7a. Diagram energie — hybnost pro polovodič s přímým zakázaným pásem znázorňující absorpci fotonu excitací elektronu z maxima valenčního do minima vodivostního pásu.



Obr. 7b. Diagram energie — hybnost pro polovodič s nepřímým zakázaným pásem znázorňující absorpci fotonu dvoustupňovým procesem doprovázeným absorpcí, resp. emisí fononu o energii  $E_p$ . (Interakce s fononem znamená menší pravděpodobnost procesu, což vede k nižším absorpčním koeficientům v porovnání s případem na obr. 7a.)

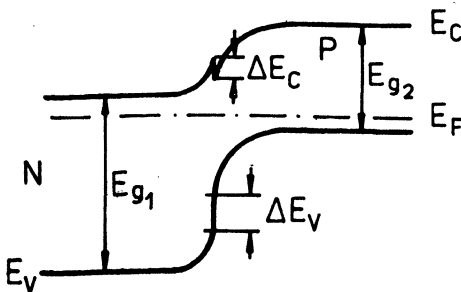
Naproti tomu polovodiče s přímým zakázaným pásmem (viz obr. 7a) se pro energie fotonů  $h\nu \geq E_g$  vyznačují vysokými absorpčními koeficienty. Záření se proto absorbuje

převážně poblíž povrchu a pro zamezení ztrátám je zde naprosto nutné, aby i přechod byl lokalizován v malé hloubce pod povrchem. Jak ukážeme v kap. 4, vede to ke vzrůstu sériového odporu  $R_s$ , a tím i ke snížení proudu obvodem. Tímto způsobem se navíc nedá negativní vliv povrchu zcela vyloučit. V tomto případě je řešením konstrukce heterogenního přechodu.



Obr. 8. „Okénkový“ jev způsobující rozšíření oboru spektrální citlivosti heterogenního přechodu.  
 --- propustnost materiálu (1), ... absorpce materiálu (2).

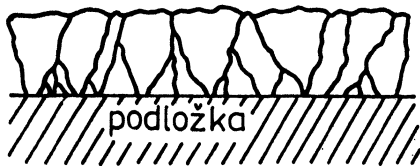
Heterogenní přechody poskytují větší variabilitu, pokud jde o volbu materiálů i vhodných technologií. Jejich výhodou je zejména existence tzv. „okénkového“ jevu. Výběrem materiálů lze totiž dosáhnout toho, že rozhodující část záření prochází materiálem s širším zakázaným pásem (1), který tvoří povrchovou vrstvu diody (viz obr. 8) a absorbuje se v polovodiči s užším zakázaným pásem (2). Přechod může být tentokrát uložen hluboko pod povrchem, protože povrchová vrstva v oboru energií záření  $h\nu$  daném nerovnostmi ( $E_{g2} < h\nu < E_{g1}$ ) neabsorbuje, a proto se v ní ani negenerují nosiče náboje. Navíc v případě, že polovodič (2) má přímou pásovou strukturu, fotony s energií v uvedeném intervalu generují volné náboje v úzké vrstvě materiálu (2) při rozhraní (1) a (2), tedy přímo v přechodu a v jeho blízkosti, kde jsou nejlepší podmínky na jejich rozdělení. K nevýhodám heteropřechodů patří zpravidla vysoká hustota stavů na rozhraní obou materiálů, způsobená zejména rozdílem mřížkových konstant, což vede k rekombinaci nosičů a snižuje fotoproud. Negativní roli hrají v některých případech rovněž nespojitosti energetických pásmů ( $\Delta E_c$ ,  $\Delta E_v$ ), které se projevují se vznikem bariér, jež brání toku nosičů. Např. na obr. 9 představuje  $\Delta E_c$  bariéru pro elektrony generované v oblasti typu P.



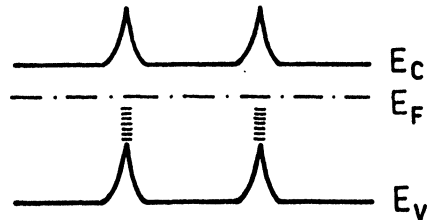
Obr. 9. Energetické pásové schéma heterogenního přechodu P-N ( $\Delta E_c$ ,  $\Delta E_v$  — nespojitosti ve vodivostním, resp. valenčním pásu).

### 3.2 Polykrystalické vrstvy

Z hlediska struktury se užívají pro sluneční články materiály monokrystalické, polykrystalické a amorfni. Snaha po snižování cen vedla k výrobě článků na bázi tenkých polykrystalických vrstev, které lze připravit i jednoduššími technologiemi. Následkem je však nižší dosahovaná účinnost, neboť hranice zrn ve vrstvách jsou místem silné rekombinace. Lokalizované stavy na těchto hranicích (obr. 10) jednak snižují koncentrace minoritních nosičů a tím i zářením generovaný proud, jednak ztěžují transport majoritních nosičů a zvyšují tak sériový odpor článku [6]. Aby účinnost neklesla pod únosnou mez, musí být zrna větší než difúzní délka minoritních nosičů. S polykrystalickými materiály souvisí i další problémy. Běžný způsob přípravy přechodů P-N založený na difúzi příměsí je u vrstev zpravidla nepoužitelný, neboť difúze probíhá přednostně po hranicích zrn, čímž se vytvářejí svody. Nejčastěji se proto volí heterostruktura nebo Schottkyho kontakt. Přes uvedené potíže, k nimž se někdy přidává i degradace (zhoršování parametrů s časem), jsou články na bázi polykrystalických polovodičů perspektivní.



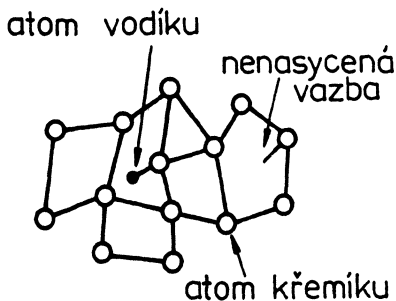
Obr. 10a. Schematické znázornění struktury polykrystalické vrstvy (příčný průřez).



Obr. 10b. Pásové energetické schéma polykrystalické vrstvy (čárkami vyznačeny stavy na hranicích zrn).

### 3.3 Amorfni vrstvy

Amorfni fáze pro účely fotovoltaické přeměny je omezena zatím pouze na křemík. Hlavní metodou přípravy amorfniho křemíku je přitom rozklad silanu ( $\text{SiH}_4$ ) v doutnavém výboji. Tato technologie je jednodušší než technologie pěstování monokrystalů nebo polykrystalických vrstev. Amorfni materiál se liší od krystalického tím, že v něm neexistuje uspořádání na velkou vzdálenost v uspořádání atomů [2]. Důsledkem toho je vznik nenasyčených (volných) vazeb některých atomů (obr. 11), což spolu s jejich neperiodickým uspořádáním vede k vytvoření velkého množství stavů v zakázaném pásu. To původně bránilo efektivnímu dopování amorfniho křemíku a předurčovalo nízkou difúzní délku nosičů náboje. Tento problém byl vyřešen zavedením vodíku do vrstev Si, o němž bylo dokázáno, že nasycuje zejména volné vazby křemíkových atomů, čímž klesá hustota stavů v zakázaném pásu a materiál lze účinně dopovat. Na bázi hydrogenizovaného amorfniho křemíku ( $\alpha\text{-Si:H}$ ) byly připraveny fotovoltaické články s homogenním přechodem P-N, popř. P-I-N (I — vrstva nedopovaného křemíku), články s Schottkyho diodou, resp. strukturou MIS (kov-izolátor-polovodič).

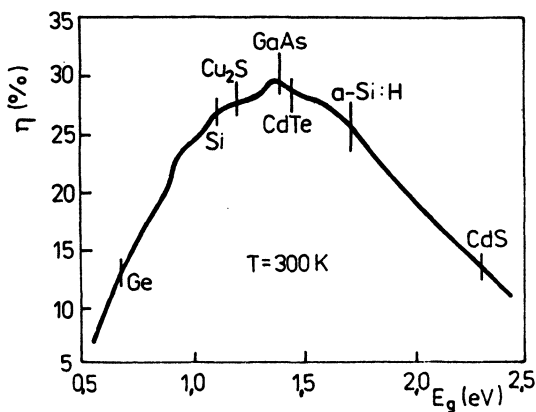


Obr.11. Schematické znázornění struktury amorfního křemíku s volnými vazbami a jejich nasycováním vodíkem.

Absorpční koeficienty má amorfni křemík vyšší než krystalický, takže pro vrstvu postačuje tloušťka  $\sim 1 \mu\text{m}$ . Změnou technologických parametrů lze v určitém rozmezí ovládat šířku zakázaného pásu, a tedy také spektrální závislost absorpčního koeficientu. Praktickým problémem je stárnutí těchto článků účinkem záření, což se označuje jako tzv. Staeblerův-Wronského efekt. Ten však lze vhodnou konstrukcí článku do značné míry snížit.

### 3.4. Polovodiče nejčastěji používané pro sluneční články

Pro výběr konkrétních polovodičů pro sluneční články má význam teoretická závislost účinnosti na šířce pásu zakázaných energií vynesena na obr. 12. V této závislosti je využito poznatku, že  $E_g$  určuje hodnotu proudu nakrátko i napětí naprázdno, což jsou dva podstatné parametry účinnosti.



Obr.12. Teoretická závislost maximální účinnosti fotovoltaické přeměny na šířce pásu zakázaných energií polovodiče pro záření AM 1,5 (podle [2]).

#### 3.4.1 Křemík

Z křivky na obr.12 lze odečíst teoretickou účinnost monokrystalického ( $\sim 27\%$ ) i amorfniho křemíku ( $\sim 26\%$ ). Protože krystalický křemík je polovodič s nepřímou

pásovou strukturou, vyplývají z toho všechny problémy, o nichž byla zmínka výše. Velkou výhodou je skutečnost, že se vyskytuje v zemské kůře ve velkém množství (20 %) a že jde o technologicky dobře zvládnutý materiál. Články z monokrystalického křemíku měly dlouho účinnost nižší než 17 % [7]. Teprve s využitím vysoce čistého křemíku připraveného metodou zonální tavby a konstrukcí článků nového typu (viz níže) se účinnost zvýšila až na 22 % a přiblížila se tak teoretické hodnotě. Snaha po zlevnění výroby článků z krystalického křemíku vedla k zavedení technologie přímého tažení monokrystalických pásků z taveniny a využívání polykrystalických vrstev. V posledních letech se podařilo metodou nanášení vrstev z kapalně fáze na vodivé keramické podložky získat vrstvy s velmi dobrými elektrickými parametry, na nichž lze vytvořit články o účinnosti vyšší než 15 % [7]. Je to nejvyšší známá účinnost, dosažená při využití vrstev. Stále důležitější postavení ve fotovoltaické přeměně sluneční energie zaujímá hydrogenizovaný amorfni křemík. Účinnost článků z a-Si:H se blíží již 12 %. Z hlediska výroby a trhu je příprava amorfniho křemíku a jeho slitin přední technologií pro fotovoltaické aplikace. Podíl výrobků z těchto materiálů činí dnes 1/3 všech fotovoltaických produktů ve světě [8].

### 3.4.2 Sloučeniny typu $A^{III} B^V$

Nejdůležitějším materiálem této skupiny je arzenid galitý. GaAs je materiál, jehož širka zakázaného pásu  $E_g = 1,43 \text{ eV}$  leží poblíž maxima křivky účinnosti na obr. 12. Jak je dobře známo, je to polovodič s přímým zakázaným pásem, velkou rychlostí rekombinace na povrchu a krátkou dobou života minoritních nosičů. Jeho využití pro sluneční články pomohla konstrukce heteropřechodů  $Ga_xAl_{1-x}As$ –GaAs na bázi monokrystalů, které dosahují nejvyšších účinností přeměny sluneční energie (téměř 24 % [1]). Protože jde o drahý materiál, využívá se hlavně ve spojení s koncentrátory záření. Při koncentraci na osmisetnásovek sluneční radiace byla změřena účinnost až 26 % [7], pramen [1] uvádí až 29 %. Ke skupině těchto materiálů náleží ještě fosfid inditý a trojné sloučeniny  $Ga_xAs_xP_{1-x}$  a  $Ga_xIn_{1-x}P$ . Příprava všech zde uvedených materiálů je drahá a lze je ekonomicky využívat pro přeměnu koncentrovaného slunečního záření a na umělých družicích, kde je rozhodující otázkou účinnost a odolnost proti ionizující radiaci.

### 3.4.3 Sloučeniny typu $A^{II} B^{VI}$

Jako první mezi polovodiči typu  $A^{II} B^{VI}$  se uplatnil sirič kademnatý — CdS, a to ve formě tenkých vrstev v kombinaci s  $Cu_2S$ . Fotovoltaické články s heteropřechodem  $Cu_2S$ –CdS byly vyvinuty pro kosmické aplikace vzhledem k jejich malé hmotnosti. Poměrně jednoduchou technologií se dosahovalo účinností přes 10 %, avšak v důsledku nízké stability se uvedené články nepovažují za perspektivní [9].

Nadějnější se jeví kombinace CdS s dalším polovodičem této skupiny — s teluridem kademnatým. Přitom se jedná o materiály ve formě monokrystalů i vrstev. Maximální účinností článků s heteropřechodem CdS–CdTe převyšují 10 % [10, 11], a to i v pří-

padě použití levných technologií [12]. Telurid kademnatý je odborníky považován za materiál budoucnosti. Výsledky s ním dosahované však zatím zdaleka neodpovídají jeho teoretickým možnostem. Bude nutno získat vrstvy s dostatečnou vodivostí, zvýšit difúzní délku minoritních nosičů a vytvořit nízkoodporové kontakty k vrstvám typu P.

#### 3.4.4 Chalkopyritové polovodiče

V posledních letech vzbudily zájem heteropřechody CdS s některými chalkopyritovými polovodiči, zejména s  $\text{CuInSe}_2$  ve formě vrstev. Jejich účinnost již přesáhla hranici 10% [13] a lze ji dále zvýšit náhradou CdS za trojnou sloučeninu  $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$  [14]. Výhodné elektrické a optické vlastnosti má také sloučenina  $\text{CuGa}_x\text{In}_{1-x}\text{Se}_2$ , která pro  $0 \leq x \leq 1$  mění šířku zakázaného pásu od 1,02 do 1,68 eV. Velkou předností článků tohoto typu je jejich stabilita. Daří se připravovat velkoplošné moduly ( $\sim 1\,000\text{ cm}^2$ ) se stejnou účinností jakou mají maloplošné ( $\sim 1\text{ cm}^2$ ) články. Není rozdíl mezi výsledky dosahovanými v laboratořích a na výrobních linkách; to je důležitý poznatek pro praxi a zároveň podnět pro další rozvoj tenkovrstvých slunečních článků. V poslední době se navíc získaly povzbudivé výsledky s přípravou vrstev  $\text{CuInSe}_2$  nevakuovými levnými metodami (naprašováním a elektrodepozicí).

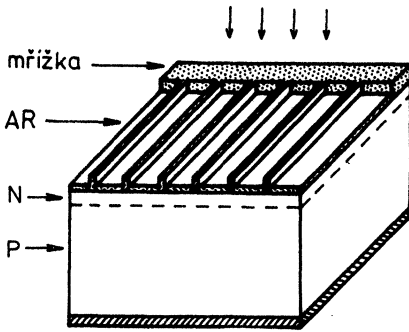
Uvedený výčet polovodičů a jejich kombinací v heteropřechodech jistě neobsahuje všechny možnosti, ale má vytvořit představu o nejdůležitějších a pro praktické využití perspektivních materiálech pro fotovoltaickou konverzi energie.

### 4. Konstrukce slunečních článků

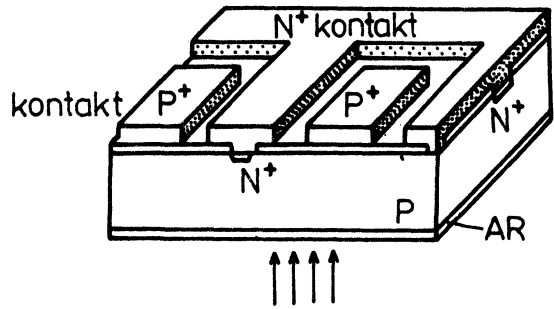
#### 4.1 Snižování optických a elektrických ztrát

Při konstrukci slunečních článků se snažíme o úsporu materiálu a o omezení optických a elektrických ztrát. K optickým ztrátám dochází následkem reflexe a neúplné absorpce záření. Průměrná odrazivost polovodičů ve viditelném oboru je poměrně vysoká (např. pro křemík přesahuje 30%), a proto se užívají různé antireflexní vrstvy, jimiž ji lze snížit pod 10%. Používají se buď anorganické antireflexní materiály jako např.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnS}$ , nebo organické látky, které se obvykle označují obchodními názvy jako Kapton, Mylar, Aclar. Jiný způsob snížení reflexe záleží ve vytvoření tzv. texturovaného povrchu. Užitím selektivního leptadla je možné vytvořit malé pyramidy na povrchu vzorku. Světlo po dopadu na jednu z nich je zčásti odraženo směrem dolů a dostává tak další možnost proniknout do článku.

Vrchní osvětlovaná část článku plní současně funkci kontaktu a odvádí fotoproud. Ke snížení ztrát způsobených odporem této povrchové vrstvy je nezbytné opatřit tuto plochu kovovou mřížkou nebo dostatečně vodivou průhlednou elektrodou (viz obr. 13a). Návrh mřížkové elektrody je třeba propočítat tak, aby ztráty způsobené stíněním mřížky a současně její elektrický odpor byly co nejnižší. Vliv tohoto stínění je vyjádřen



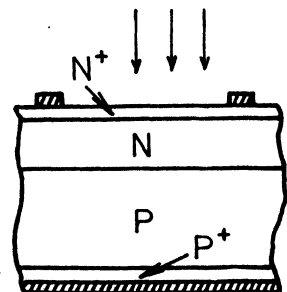
Obr. 13a. Klasická konstrukce slunečního článku s mřížkovou elektrodou a antireflekční vrstvou (AR).



Obr. 13b. Sluneční článek s oběma kontakty na neosvětlené straně.

poměrem ploch  $\frac{S_a}{S}$  ve vztahu (7). Někdy se aktivní přechod i kontakty konstruují na spodní neosvětlené straně (viz obr. 13b), takže stínění mřížkou odpadá. Článek však musí být natolik tenký, aby se generované nosiče mohly dostat až k přechodu. Jako průhledná a elektricky dobře vodivá elektroda se někdy používá sklo pokryté tenkou vrstvou oxidu cínu ( $\text{SnO}_2$ ) nebo směsí oxidů cínu a india (označené jako ITO). Při větších plochách se ovšem i přes tyto vrstvy přepařuje kovová mřížka.

Neméně důležitým úkolem je dosažení vysoké sběrné účinnosti ( $\eta_3$ ). Úspěšný sběr minoritních nosičů z neutrálních oblastí vyžaduje dlouhou efektivní délku, kterou mohou projít bez rekombinace — tzv. difúzní délku, která se zvyšuje s pohyblivostí a dobou života nosičů. Ta musí být dlouhá zvláště u polovodičů s malou absorpcí, protože ke generaci nadbytečných nosičů dochází i dosti daleko od hranice s OPN. Pohyblivost a dobu života lze kromě výběru polovodiče ovlivnit také čistotou a technologií přípravy článku. Rekombinaci na spodní neosvětlené straně vzorku lze zabránit vytvořením silně dopované vrstvy téhož typu vodivosti pod ohmickým kontaktem. Např. pole v přechodu  $\text{P}^+\text{P}$  na obr. 14 odpuzuje elektrony od kontaktu na spodní straně a napomáhá jejich sběru hlavním přechodem. Články konstruované s elektrickým polem u spodního kontaktu se označují jako články BSF. Podobným způsobem lze bránit také rekombinaci na osvětleném povrchu — viz obr. 14. Přechod v tomto případě může být uložen hlouběji a dopování základního materiálu nemusí být tak vysoké.



Obr. 14. Schematické znázornění článku s elektrickým polem u spodního i vrchního povrchu.



## 4.2 Snižování nákladů

### 4.2.1 Články s přechodem kov-polovodič (MS) a kov-izolátor-polovodič (MIS)

Poměrně snadnou konstrukcí se vyznačují články na bázi kontaktu kov-polovodič. Nanesením kovové vrstvy na polovodič (nejčastěji napařením) můžeme získat velmi jednoduchý sluneční článek. Pravidlem je, že polovodič typu N má mít nižší výstupní práci než příslušný kov, kdežto u polovodiče typu P je tomu naopak. V polovodiči pod kovovou vrstvou vzniká oblast prostorového náboje, která stejně jako v přechodu P-N odsává generované minoritní nosiče. Druhou funkcí této vrstvy je, že současně tvoří i přivodní elektrodu. OPN zasahuje až k povrchu polovodiče, což poněkud snižuje vliv povrchové rekombinace a vede k rozšíření oboru spektrální citlivosti do krátkovlnné oblasti. Účinnosti slunečních článků tohoto typu jsou však nižší než v článcích s přechodem P-N vzhledem k tomu, že kontaktem kov-polovodič tekou mnohem větší parazitní proudy obvykle mechanismem termální emise přes bariéru na kontaktu kovu s polovodičem.

Snížení velikosti parazitních proudů lze dosáhnout nanesením tenké izolační vrstvy mezi kovovou elektrodu a polovodič. Vznikne tak článek MIS. Je-li tato vrstva tenká  $\sim 2 - 3$  nm, mohou jí nosiče procházet kvantově mechanickým tunelováním. Termální emise je silně potlačena, takže parazitní proudy se sníží na úroveň proudů přechodem P-N a účinnost se oproti kontaktu kov-polovodič zvýší.

Výhodou článků MS a MIS je skutečnost, že odpadají technologicky náročné difúzní či implantační procesy potřebné k získání přechodů P-N. Původní vlastnosti polovodiče po vytvoření článku zůstávají proto zachovány. Problémem je však příprava tenké ( $2 - 3$  nm tlusté) homogenní izolační vrstvy.

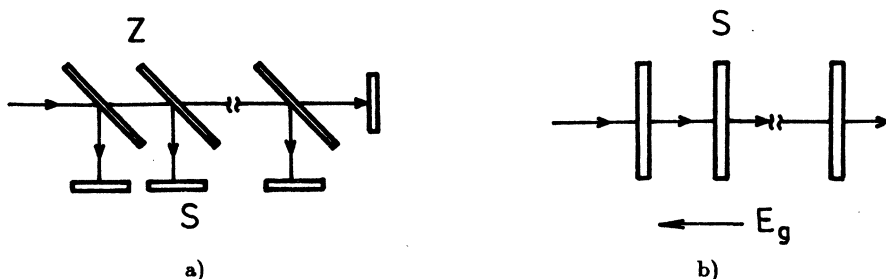
### 4.2.2 Články s koncentrátory záření

Jiným způsobem, který vede ke zlevnění získávané energie, je zmenšování plochy článků, potřebných k produkci určitého elektrického výkonu. Toho lze dosáhnout koncentrací slunečního záření. Solárních koncentrátorů se využívá zejména u konvertorů určených k produkci větších výkonů. Základním pojmem v teorii těchto zařízení je tzv. koncentrační poměr definovaný jako poměr aperturní plochy koncentrátoru k aktivní ploše článku. Z teorie [2] vyplývá, že maximální koncentrační poměr je asi 45 000. Čím je tento poměr větší, tím méně divergentní paprsky může systém zpracovat. Už v případě, že chceme mít koncentrační poměr větší než 10, musí být vytvořen samonaváděcí systém, který Slunce po jeho dráze sleduje. S koncentrací záření se také zvyšuje teplota článků, což může vést ke snižování účinnosti. Články se proto musí chladit. Pasivní chlazení postačuje až do koncentračního poměru 50, nad tuto hodnotu je nutné chlazení aktivní. Při konstantní teplotě účinnost ideálního článku narůstá s rostoucím koncentračním poměrem, neboť proud nakrátko roste lineárně a navíc se ještě logaritmičtě zvyšuje napětí naprázdno a zvětšuje se faktor zaplnění  $FF$  [2]. Ve

skutečnosti však při vyšších koncentračních poměrech po dosažení maxima účinnost klesá. Je to způsobeno ztrátami na sériovém odporu, které při velkých prouděch mohou být značné.

#### 4.2.3 Systémy s ultravysokou účinností

Z ekonomického hlediska je zřejmé, že pro zdroj elektrické energie vybavený koncentrátorem jsou vhodné jen systémy s vysokou účinností, které lze dosáhnout např. kombinací několika článků s různou šířkou zakázaného pásu absorbujícího materiálu. To umožní využít širší oblasti slunečního spektra. Jeden způsob je znázorněn na obr. 15a. Záření je pomocí spektrálně selektivních zrcadel  $Z$  rozštěpeno na několik složek a na každý článek  $S$  dopadá záření o těch vlnových délkách, na něž je nejvíce citlivý. Na obr. 15b je tzv. tandemové uspořádání, při kterém záření postupně prochází jednotlivými články. Absorbér\*) prvního má největší šířku zakázaného pásu  $E_g$ ; fotony s menší energií jím procházejí a absorbují se až v některém dalším článku s menší hodnotou  $E_g$ , kde generují proud. Nejvyšší dosažitelná účinnost závisí na počtu článků s různou šířkou zakázaného pásu (viz tab. III) [15].



Obr. 15. Kombinace článků s různými šířkami zakázaných pásů. a) metoda rozštěpení spektra b) tandemové uspořádání článků

Tabulka III

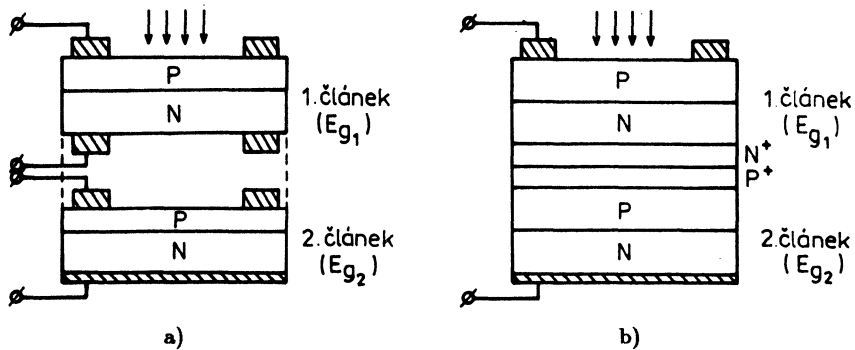
Optimální kombinace článků s různými šířkami zakázaných pásů absorbérů a výsledná účinnost systémů při koncentraci 1 000 x AM 1.

počet článků	$\eta$ [%]	šířky zakázaných pásů absorbérů		
		[eV]		
1	32,4	1,4		
2	44,3	1,0	1,8	
3	50,3	1,0	1,6	2,2

Tandemové uspořádání poskytuje několik možností. Každý článek má buď vlastní elektrický výstup, nebo mohou být články integrovány v jediném bloku. Uvažujme

\*) Absorbérem je někdy označován materiál, v němž se absorbuje podstatná část záření; tedy v heteropřechodu je to polovodič s menší šířkou zakázaného pásu.

tandem vytvořený dvěma články. U tzv. čtyřterminálových tandemů jsou články zcela odděleny (obr. 16a). Vrchní článek musí mít dostatečně transparentní horní i spodní elektrodu. Tříterminálové a dvouterminálové tandemy mají oba články integrované v jednom celku, což vyžaduje dobré přizpůsobení mřížkových parametrů jednotlivých elementů a omezuje tak výběr použitelných materiálů. Na obr. 16b je uveden dvouterminálový tandem s šířkami zakázaných pásů absorberů  $E_{g1}$  a  $E_{g2}$ . Hlavním problémem je přitom vytvoření vodivé a dostatečně propustné oblasti mezi články. Obvykle se pro tento účel volí vrstvy  $N^+$  a  $P^+$ , které představují sériové spojení mezi články, neboť přechod  $N^+ - P^+$  umožňuje snadné tunelování nosičů a kromě toho vytváří elektrické pole na spodní straně prvního článku a na vrchní straně druhého článku.



Obr. 16. Schematické uspořádání tandemových článků ( $E_{g1} > E_{g2}$ ). a) čtyřterminálový tandem; články spojeny opticky propustným tmelem b) dvouterminálový tandem

V tandemech se napětí jednotlivých sériově spojených článků sčítají, ale proud je určen tím článkem, který ho produkuje nejméně. Proto je vhodné, aby všechny články generovaly přibližně stejný proud.

Nejvyšší účinnosti dvouterminálových systémů (téměř 30 %) se dosáhlo při použití heteropřechodů  $GaAs-Ga_xAl_{1-x}As$  na bázi monokrystalů [16].

V poslední době byly vyvinuty tři- a čtyřterminálové tandemové systémy na bázi tenkých vrstev. Vrchní článek je tvořen např. heteropřechodem  $CdS-CdTe$  a spodní heteropřechodem  $CdS-CuInSe_2$  [17]. Sloučenina  $CuInSe_2$  se uplatňuje jako ideální absorbující polovodič spodního článku v kombinaci s amorfním  $Si:H$ , který je materiálem pro vrchní článek. Účinnost takových tandemů dosáhla hodnoty 14,6 % [7]. Dvojrstvé a trojvrstvé tandemy s vrchní aktivní vrstvou ze slitiny amorfního křemíku s uhlíkem ( $a-SiC:H$ ) a spodní aktivní vrstvou ze slitiny s germaniem ( $a-SiGe:H$ ) by mohly teoreticky dosáhnout účinnosti přes 20 % [8].

#### 4.2.4 Termofotovoltaické články

Další cestou při zvyšování účinnosti slunečních článků je přizpůsobení spektrálního složení dopadajícího záření k spektrální citlivosti určitého článku. To se děje v termofotovoltaických konvertorech. Sluneční záření je využito pro zahřátí absorbujícího

tělesa — radiátoru, který potom ozařuje sluneční článek. Spektrální složení záření vycházejícího z radiátoru závisí na jeho teplotě, která proto musí být vhodně volena. Reflektující plocha pod článkem odráží zpět na radiátor dlouhovlnné fotony, které nebyly absorbovány, čímž se radiátor znovu ohřívá. Tím se snižují i ztráty způsobené nízkou absorpcí.

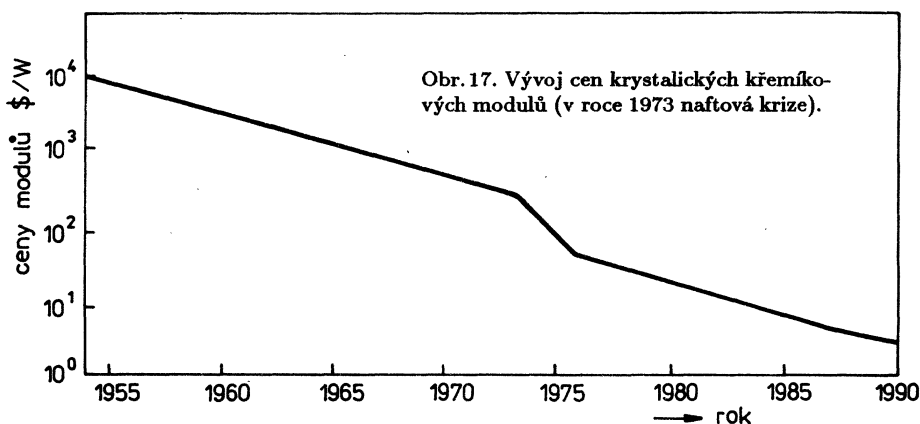
## 5. Aplikace fotovoltaických zdrojů elektrické energie

Využití fotovoltaických článků v praktických aplikacích je závislé na jejich ceně ve srovnání s klasickými zdroji energie. V slaboproudé elektrotechnice se již uplatnily např. pro napájení kalkulátorů (jen v r. 1987 jich bylo vyrobeno 100 miliónů). V místech, kde není elektrorozvodná síť, dokáží fotovoltaické generátory velmi dobře konkurovat dieselektrickým agregátům zejména nižšího výkonu. Jejich předností je nezávislost na přísunu paliva, jednoduchost obsluhy (žádné pohyblivé součásti) a nízká poruchovost. Malá zařízení o výkonech řádově od 10 W do několika kW se běžně vyrábějí a používají pro elektrifikaci vzdálených nebo nepřístupných objektů (meteorologických a retranslačních stanic, navigačních zařízení, zemědělských usedlostí v horách apod.). Rovněž je lze využít pro nabíjení akumulátorů a pohon klimatizačních zařízení.

Ve Švýcarsku zásobují slunečními generátory několik set horských chat a konají se pokusy s jejich využitím v zemědělských usedlostech. Byla již vyzkoušena elektrárna o výkonu 1,3 kW s plochou panelu 13 m<sup>2</sup>. Její příslušenství tvoří akumulátory s kapacitou 450 Ah. Při provozu v letních měsících kryje spotřebu 3,4 kWh denně [18], [19]. Nedostatek vhodné plochy pro umístění slunečních panelů ve městech je možno řešit využitím střech domů. Dům s těmito agregáty by využíval vlastní vyrobenou energii a dodával do sítě nespotřebovanou energii prostřednictvím měniče na střídavý proud a při nedostatečném slunečním svitu by naopak elektrinu ze sítě odebíral. (Tím by se vyřešil problém akumulace). Takovéto zařízení by tedy fungovalo jako špičková elektrárna, který by zlepšovala zásobování sítě v době zvýšeného odběru.

Z energetického hlediska jsou důležitá zařízení o výkonech větších než 0,1 MW. V Evropě již pracuje např. fotovoltaická elektrárna o výkonu 100 kW na ostrově Kythos v Řecku a 300 kW na poloostrově Pellworm v Severním moři. V USA byla poblíž Los Angeles v r. 1983 postavena elektrárna o výkonu 1 MW za 12 miliónů dolarů, produkující 3 · 10<sup>6</sup> kWh ročně. O rok později vybudovala firma Arco Solar v Kalifornii fotovoltaický zdroj o výkonu 6,5 MW. Zařízení dodává energii, která přesahuje spotřebu asi 2300 domácností. Úhrnný výkon slunečních článků vyrobených ve světě v r. 1988 byl 36 MW.

O budoucnosti fotovoltaických článků bude rozhodovat především jejich cena [20]. Cena článků se udává v nákladech, které připadají na výkon 1 W elektrického proudu produkovaného článkem, dopadá-li na něj sluneční zářivý tok o velikosti 100 mW/cm<sup>2</sup>. Minimální cena se od roku 1954, kdy byl vyroben první článek, do roku 1989 snížila z 10 000 \$/W na několik \$/W, jak je znázorněno na obr. 17. V r. 1987 činila 4 – 6 \$/W. Uvedená hodnota bude dále klesat buď z kvalitativním technologií, nebo pouhým zvyšováním objemu výroby. Udává se, že při zvýšení produkce o dva řády klesne



cena výrobku o 1 řád. Dosáhne-li se relace 1\$/W, potom náklady na výrobu 1 kWh klesnou na 0,1 – 1,12\$ a budou nižší než náklady na výrobu 1 kWh z jaderné elektrárny. Je nutné také uvážit, že cena elektrické energie z tepelných a jaderných elektráren je podhodnocena, protože nezahrnuje hodnotu škod vzniklých zdevastováním přírody, poškozením zdraví obyvatel ani výdaje na likvidaci jaderných elektráren s ukončenou životností. Z ekologického hlediska je sluneční energie (ať již transformovaná v energii větru, vodní nebo elektrickou ve slunečních člancích) jediným, v budoucnu akceptovatelným zdrojem energie.

## L i t e r a t u r a

- [1] VAN OVERSTRAETEN R.J.: Proc. 9<sup>th</sup> European Photovolt. Solar Energy Conf., Freiburg, 1989,1
- [2] GREEN M.A.: *Solar Cells*. N. J.: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs 1982.
- [3] ROTHWART A., BÖER K.W.: *Progress in Solid-State Chem. 10 part 2*. Pergamon Press Inc. Oxford (1975), 71.
- [4] HOVEL H.J.: *Semiconductors and Semimetals 11*, Academic Press, INC. New York (1975).
- [5] EHRENREICH H., MARTIN J.H.: *Physics Today 32* (1979), 25.
- [6] KAZMERSKI L.L.: *Polycrystalline and Amorphous Thin Films and Devices*. New York: Academic Press, INC. 1980, 84.
- [7] KAZMERSKI L.L., EMERY K.A.: *Proc. Applied Optics in Solar Energy Conf. Praha (1989)*, bude publikováno.
- [8] CATALANO A. et al.: *J.Non-Cryst. Sol. 115* (1989), 14.
- [9] SAVELLI M., BOUGNOT J.: *Topics in Applied Physics 31*, Springer-Verlag Berlin 1979, 213.
- [10] TYAN Y.S., PEREZ-ALBUERNE E.A.: *Proc. 16<sup>th</sup> IEEE Photovolt. Spec. Conf. San Diego (1982)*, 801.
- [11] CHU T.L., CHU S.S., ANG S.T., HAN K.D., LIU Y.Z., ZWEIBEL K., ULLAL H.S.: *Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Photovolt. Spec. Conf. New Orleans (1987)*, 1466.
- [12] MEYERS P.V.: *Proc. Polycryst. Thin Film Program Meeting, Solar Energy Res. Institute (1987)*, 9.
- [13] SCHOCK H.W., BLOSS W.H.: *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Photovolt. Solar Energy Conf. Tokio (1987)*.
- [14] DEVANEY W.E., MICKELSEN R.A., CHEN W.S.: *Proc. 18<sup>th</sup> IEEE Photovolt. Spec. Conf. Las Vegas (1985)*, 1733.
- [15] BENNET A., OLSEN L.C.: *Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Photovolt. Spec. Conf. Washington (1978)*, 868.
- [16] MOON R.C. et al.: *Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Photovolt. Spec. Conf. Washington (1978)*, 859.
- [17] PFISTERER F., BLOSS W.H.: Nепublikované materiály Ústavu fyzikální elektroniky, Univerzita Stuttgart.

- [18] BARBISCH CH., TOGGWEILER P.: Bulletin des Schweizerischen Electrotech. Vereins 6 (1987), 307.  
[19] KERLE W.: Bulletin des Schweizerischen Electrotech. Vereins 6 (1987), 320.  
[20] SABISKY E.S.: Solid State Technol. (1988), 149.

## Čeští geometři na sofijské univerzitě

*Stefka Hineva, Ivana Tzenova, Sofie*

Na základě berlínského kongresu z roku 1878 byly po osvobození Bulharska z pětisetletého tureckého útlaku vytvořeny dva státy: Bulharské knížectví a Východní Rumelie — základ dnešního Bulharska. Ministerstvo veřejného vzdělávání Bulharského knížectví a ředitelství veřejného vzdělávání Východní Rumelie v Plovdivu záhy po osvobození vytvářely ve všech oblastech řadu gymnázií a snažily se, aby úroveň výuky v těchto školách a celá organizace studia se vyrovnaly přednímu školství té doby. Tato snaha však narážela na nedostatek vyučujících, kteří nadto ne vždy měli kvalifikaci odpovídající představám státních orgánů řídících vzdělávací systém.

Proto byli hledáni vhodní učitelé gymnázií v jiných zemích. Na pozvání odpověděla celá řada kvalifikovaných mladých českých odborníků, kteří využili svých zkušeností i znalostí a energicky se pouštěli do organizace škol v osvobozeném Bulharsku. B. L. Petkančin — bulharský geometr — napsal v této souvislosti: „Tuto skutečnost je nutno nejen s díky vyzvednout, ale také prozkoumat. Stovky Čechů přicházely do Bulharska — do knížectví i do východní Rumelie a svými znalostmi a odborností podstatně přispěly k přerodu někdejší Otomanské provincie na moderní stát. Byli mezi nimi učitelé, lékaři, agronomové, inženýři, podnikatelé, umělci, fotografové i hudebníci.“

Z učitelů matematiky, kteří přijeli z Čech do Bulharska, hned od počátku vynikli Teodor Monin, Vladislav Šak a Antonín Šourek, kteří nejdříve pracovali jako učitelé matematiky na oblastních gymnáziích a pak od r. 1888 jako učitelé geometrie na právě otevřené Vyšší pedagogické škole (později nazývané jen Vyšší škola), tj. základu budoucí sofijské univerzity. Škola začínala jen s jednou katedrou, a to historie a filologie, ale už v následujícím studijním roce 1889–90 byla zřízena katedra fyziky a matematiky a na ní se stal od září 1889 Teodor Monin prvním řádným učitelem matematiky.

Teodor Monin se narodil 1. února 1858 v Kolíně, byl Čech a absolvoval v Kutné Hoře v roce 1874 reálné gymnázium. Následovala úspěšná studia na pražské c. k. České vysoké škole technické, ukončená v červnu 1878. Potom vyučoval na prvním pražském

---

*Czechs — lecturers in geometry at Sofia University.* Článek byl připraven na základě žádosti prof. D. KRUPKY (přírodovědecká fakulta MU v Brně), který byl v r. 1988 pozván na sofijskou univerzitu u příležitosti stého výročí jejího založení. Z angličtiny přeložila O. VLAŠINOVÁ.