

Literatura

- [1] *Lafferty, P.*: Síla a pohyb. Nakladatelský dům OP, Praha, 1995.
- [2] *Štoll, I.*: Dějiny fyziky. Prometheus, Praha, 2009.
- [3] *Bührke, T.*: Převratné objevy fyziky: Od Galileiho k Lise Meitnerové. Academia, Praha, 1999.
- [4] *Vondřejcová, K., Kabrhel, P.*: Rohová lišta ve výuce fyziky. Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 16 (Olomouc, 2.–4. září 2011), Univerzita Palackého v Olomouci, 2011.

Sluneční energie a fotovoltaika

JANA TOUŠKOVÁ, JIŘÍ TOUŠEK

Matematicko-fyzikální fakulta UK, Praha

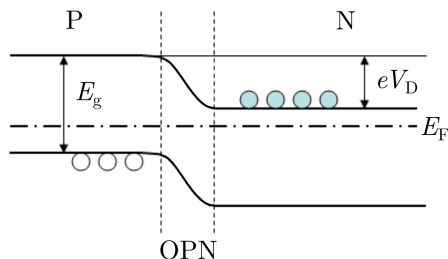
Jak řešit zásobování lidstva energií

Vzhledem k rostoucímu počtu obyvatelstva a se zvyšující se spotřebou energie vzniká otázka, jak řešit zásobování energií a při tom se vyhnout negativnímu vlivu na životní prostředí. Spalování fosilních paliv přináší řadu problémů se znečišťováním planety; roste zároveň koncentrace oxidu uhličitého a v důsledku skleníkového efektu se postupně atmosféra otepluje. K řešení už nyní přispívají obnovitelné zdroje, mezi nimi zaujímá důležité místo přímá přeměna energie slunečního záření na energii elektrickou. Slunce představuje prakticky nevyčerpatelný zdroj a jeho využití neznamena skleníkový efekt ani tepelné zamoření. Sluneční záření má však nízkou hustotu zářivého toku (v České republice přibližně 1 kW/m^2 na povrchu Země), jeho velikost závisí na počasí a je omezeno na denní dobu, s čímž souvisí nutnost akumulace energie. Zářivý tok, který Slunce vysílá na celou Zemi je $175\,000 \text{ TW}$ ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$), což je o mnoho řádů více než je spotřeba lidstva, jak vyplývá z výpočtu na základě údajů v [1]. Mezinárodní agentura pro energii (IEA) udává, že vloni byl výkon všech elektráren na světě $6\,650 \text{ GW}$, čili $6,65 \text{ TW}$. I z tohoto hlediska je využívání sluneční energie perspektivní.

Anorganické sluneční články – princip činnosti

Základem slunečních článků je nejčastěji přechod P-N. Pokud se jedná o jediný materiál, kde se jeho části liší jen typem vodivosti, jde o homogenní přechod, přechod mezi chemicky rozdílnými materiály s opačným, případně i stejným typem vodivosti je přechod heterogenní (heteropřechod). Příslušné materiály jsou buď anorganické, organické, nebo jejich kombinace (hybridní články).

V případě anorganických článků se typ vodivosti obvykle dosahuje difúzí nebo implantací dopantů-donorů pro N a akceptorů pro P část. Jako donory slouží prvky, které mají obvykle o jeden valenční elektron víc než základní materiál, akceptory naopak mívají o jeden valenční elektron méně. Obvykle stačí malé množství energie k tomu, aby se elektrony z donorů uvolnily do vodivostního pásu a zanechaly po sobě ionizované donory, nebo aby akceptory přijaly elektrony z valenčního pásu a vznikly tak ionizované akceptory. Ve valenčním pásu pak zůstávají tzv. díry. Jako příklad lze uvést přechod P-N na křemíku, kde P-typová oblast je vytvořena difúzí boru, jakožto akceptoru a N-oblast difúzí fosforu jako donoru. Vznik přechodu P-N je ilustrován na obr. 1.



Obr. 1 Schéma přechodu P-N. V_D je difúzní napětí, E_g značí šířku zakázaného pásu, barevné kroužky označují elektrony, nevybarvené kroužky označují díry.

Aby vznikl rovnovážný stav při spojení obou částí přechodu, musí být Fermiho hladina E_F všude stejná. To nastane tak, že v důsledku gradientu koncentrace, část elektronů přejde z N oblasti do P oblasti a část děr přejde z P oblasti do N oblasti. Dojde k narušení neutrality a po obou stranách přechodu vznikají oblasti prostorového náboje (OPN) tvořené ionizovanými donory, respektive akceptory a vnitřní elektrické pole, které pak brání dalšímu difúznímu toku nosičů náboje. Potenciálový schod (viz obr. 1) odpovídá tzv. difúznímu napětí. Přiložíme-li na N část záporné vnější napětí a na P část kladné napětí, jsou elektrony přitahovány do P

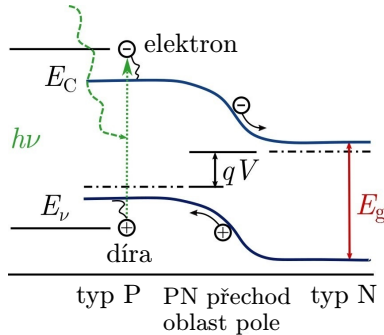
a díry do N oblasti a přes přechod teče propustný neboli přímý proud. Závislost proudu na vnějším napětí čili volt-ampérová charakteristika je dána touto rovnicí:

$$I = I_0 [\exp(eU/nkT) - 1], \tag{1}$$

kde U je vnější vložené napětí, T je absolutní teplota, k je Boltzmannova konstanta a n je faktor, který souvisí s mechanismem transportu náboje přechodem (nejčastěji má hodnotu mezi 1 a 2).

Při opačné polaritě napětí elektrony a díry jsou naopak od rozhraní obou částí přechodu oddalovány. Při tomto napětí, kdy exponenciála ve vztahu (1) je vůči jedné zanedbatelná, teče pouze nasycený proud I_0 .

Co se nyní stane, když P-N přechod osvětlíme? Situaci ukazují obr. 2.

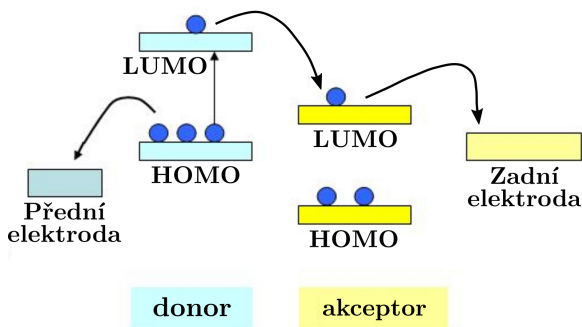


Obr. 2 Pásové energetické schéma osvětleného přechodu P-N. Elektrony a díry generované světlem difundují k oblasti prostorového náboje, kde je vnitřní pole rozdělí.

Světelná energie vybudí elektrony z valenčního pásu do vodivostního pásu a v obou částech se vytvoří páry elektron-díra. Ty pak difundují směrem k OPN, kde jsou vnitřním elektrickým polem rozdělány tak, že elektrony pronikají do N-oblasti a díry do P-oblasti. Oblast typu N se nabíjí záporně a oblast typu P kladně. Ve vnějším obvodu pak teče proud. Reálně však všechny generované nosiče náboje nedospějí do OPN, protože cestou dochází k rekombinaci elektronů s děrami. Rozhodující roli při tom hraje tzv. difúzní délka, která udává vzdálenost, na které klesne koncentrace generovaných nosičů náboje na $(1/e)$ původní hodnoty. Je zřejmé, že dostatečně velká hodnota difúzní délky příznivě ovlivňuje účinnost osvětleného článku. V anorganických materiálech jsou difúzní délky řádu mikrometrů.

Organické sluneční články – princip činnosti

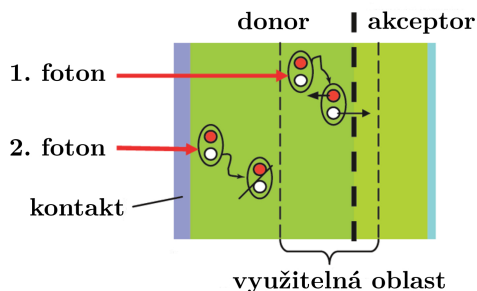
Činnost organických polovodičů je založena na molekulové bázi. Nejvyšší molekulová energetická hladina obsazená elektrony je tzv. HOMO hladina a nejnižší neobsazená hladina se nazývá LUMO hladina [2]. Základem článků je opět přechod mezi oblastí typu P, která působí jako dárce elektronů a typu N jako jejich příjemce. Vytvářejí se heterogenní přechody mezi dvěma polymery s opačným typem vodivosti (obr. 3), ale častěji mezi polymerem typu P a materiálem s malými molekulami, jako je fulleren, který vykazuje typ N.



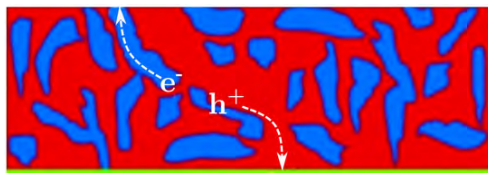
Obr. 3 Rozdělení excitonu na přechodu mezi dvěma polymery – šipkou je označen generovaný exciton.

Po osvětlení se tvoří tzv. excitony, což jsou páry elektron-díra vázané, vzhledem k nízké dielektrické permitivitě organických materiálů, značnou Coulombovskou silou [2]. Aby došlo k přenosu náboje, musí být tyto páry rozděleny elektrickým polem přechodu. Jsou-li generovány mimo oblast přechodu, musí k němu dospět difúzí. Situaci znázorňuje (obr. 4). Excitony však mohou difundovat jen na krátkou vzdálenost, obvykle maximálně do 10 až 20 nanometrů, pak anihilují. Přenosu náboje se tedy účastní jen excitony v části vyznačené na obrázku jako využitelná oblast.

Původní dvouvrstvé články proto nejsou příliš vhodné a nahrazují se jednou vrstvou, kde jsou materiály s opačným typem vodivosti promíchány, jak ukazuje obr. 5. Tím se zvětšuje plocha přechodu a pravděpodobnost rozdělení excitonů je daleko větší. Pak už zbývá dopravit rozdělené elektrony a díry k příslušným elektrodám. Tomu v poslední době napomáhají tzv. elektronové a děrové transportní vrstvy pod elektrodami.



Obr. 4 Sluneční článek s rovinným rozhraním mezi P (donor) a N (akceptor) polovodičem. Foton č. 1 generuje exciton ve střední části (využitelná oblast), kde difunduje, potom je disociován a jeho elektron a díra mohou přispívat k proudu. Exciton generovaný fotonem č. 2 je pro fotoproud ztracený.

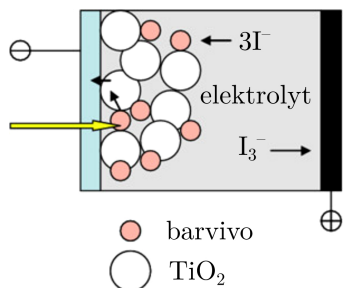


Obr. 5 Organický článek ze směsi P a N oblastí uvnitř objemu. Vzdálenost excitonů od míst přechodu je kratší. Plocha přechodu je zvětšená a možnost rozdělení excitonů je vyšší.

Fotochemické články (Graetzelovy cely) – princip činnosti

Princip činnosti těchto článků [3] je ilustrován na obr 6. Na skleněném substrátu pokrytém obvykle vodivou vrstvou směsi oxidu ciničitého a inditého (ITO) je nanesen oxid titaničitý (TiO_2) ve formě nanočástic. Ty představují velký povrch, ale málo absorbují světlo. Proto se pokrývají barvivem – nejlépe sloučeninami ruthenia. Světlo z barviva uvolňuje elektrony, které jsou přenášeny přes TiO_2 k elektrodě ITO. Do barviva se elektrony doplňují z druhé-grafitové, nebo platinové elektrody prostřednictvím elektrolytu, který obsahuje ionty jódu.

Tyto články již dosáhly účinnosti 10–13 %. Uvedené články lze jednoduše použít pro demonstraci jejich činnosti; stačí, když použijeme přírodní barvivo jako např. květ ibišku, maliny, třešně, nebo černý rybíz. Články si mohou tedy připravit i sami studenti [4].



Obr. 6 Elektrochemický článek (Graetzelova cela). Elektroda vlevo je ITO, vpravo je elektroda grafitová, nebo platinová. Princip činnosti je popsán v textu.

Materiály pro sluneční články

a) anorganické materiály

V praxi je stále nejvíce využíván křemík a to v podobě monokrystalické, polykrystalické, nebo amorfni. Výhodou je, že se ho v zemské kůře nachází dostatek, není toxický a technologie výroby článků i celých panelů je již zvládnutá. Na druhé straně krystalický křemík má nízkou absorpci slunečního záření, což vede k nutnosti použití alespoň 200 mikrometrů tlustých vrstev, a tedy k velké spotřebě materiálu, což se odráží i v ceně.

Jako určité řešení se jevil hydrogenizovaný amorfni křemík, který má velký absorpční koeficient, takže stačí jen několik mikrometrů tlustá vrstva k výrobě článků. Degradace vlivem slunečního záření je však vážnou překážkou a ke stabilizaci dochází až po roce provozu, po níž se účinnost ustaví na poměrně nízké hodnotě (10 %).

Články na základě heterogenního přechodu CdS/CdTe jsou stabilní. Technologie není náročná a spotřeba materiálu je poměrně nízká, neboť stačí jen asi 2 mikrometry tenké vrstvy. Námítkou je toxicita kadmia, která nevdá, pokud je článek zapouzdřený, ale problém může nastat při likvidaci. Nevýhodou jsou dále nízké zásoby teluru.

Kombinací Cu, In a Se, kde lze indium nahradit galiem a selen sírou, jsou připravovány tenkovrstvé články s nízkou toxicitou a nenáročnou technologií. Většímu rozšíření článků tohoto typu brání nedostatek india v zemské kůře.

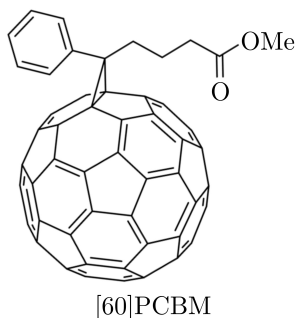
Monokrystalické články z GaAs se uplatňují hlavně v kosmu vzhledem k odolnosti vůči radiaci a vysoké ceně.

b) organické materiály

Sluneční články na bázi organických polovodičů, jejichž základem jsou

molekuly, mají řadu výhod. Technologie jejich přípravy je poměrně jednoduchá, i když v posledních letech pro dosažení dostatečně velké účinnosti je třeba volit poněkud složitější postupy. Organické materiály lze nanášet z roztoku, což je energeticky málo náročné, např. oproti vakuovému napařování. Nejčastěji používané je rotační nanášení na skleněný substrát pokrytý vodivou vrstvou, která tvoří jednu z elektrod k aktivní vrstvě. Vlastnosti vrstev je možno měnit volbou koncentrace roztoku, a tloušťku vrstvy rychlostí otáček. Protože se tyto materiály vyznačují velkou absorpcí, stačí vytvořit tenké vrstvy o tloušťce 100–150 nanometrů, což znamená velkou úsporu materiálu a představuje další výhodu. V posledních letech byla vyvinuta levná metoda tisku vrstev na ohebný substrát, takže články lze získat i v rolích.

Organické články se nejčastěji vyrábějí z polymerů jako je poly(3-hexylthiofen) zkráceně P3HT, nebo poly[(ethylhexyl-oxy)-benzodithiofen-(ethylhexyl)-thienothiogen] zkráceně PTB7 v kombinaci s deriváty fullerenu uváděnými jako PCBM, což jsou obvykle molekuly uhlíku C_{60} (obr. 7). V literatuře lze ovšem najít další organické polymery vhodné pro sluneční články [2, 5, 6].



Obr. 7 Typická struktura molekuly uhlíku (derivát fullerenu C_{60} označovaný jako PCBM). Vykazuje vodivost typu N a v organických slunečních článcích působí jako akceptor elektronů. Další typy fullerenu lze najít např. v práci [2]

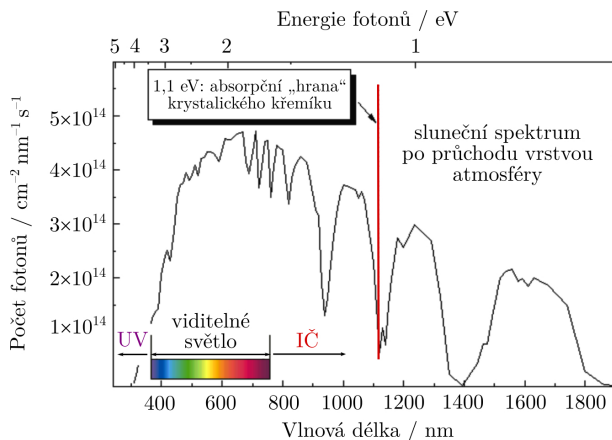
c) perovskity

V posledních letech se do popředí dostává materiál zvaný perovskit, který má krystalovou strukturu jako oxid titaničito-vápenatý ($CaTiO_3$). Ve fotovoltaických článcích se však používá chemicky jiná látka, která se popisuje jako organicko-anorganický perovskit. Práce [7] se např. zabývá vrstvami perovskitu $CH_3NH_3PbI_3$ s anorganickou mřížkou PbI_3^- obsahu-

jící uvnitř buněk organické molekuly CH_3NH_3^+ . Takové články byly již připraveny na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze a dosáhly účinnosti 19,1 %. Problémem je však nestabilita a obsah olova v článcích. Kombinací širokopásových a úzkopásových článků vyrobili čínští [8] a kanadští [9] výzkumníci výhradně perovskitové tandemové články s účinností téměř 25 %. Perspektivní jsou také tandemy s krystalickým křemíkem nebo např. s CuInSe_2 . Swansea University [10] již ohlásila tisk solárních modulů (systém několika pospojovaných článků) formátu A4 s účinností 6,3 %. Pokud by se podařilo vyrábět takové moduly ve velkém, mohly by konkurovat křemíkovým.

Účinnost slunečního článku

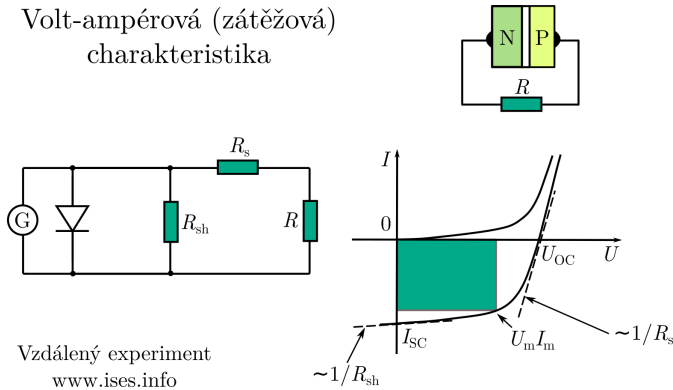
Účinnost článku ovlivňuje několik faktorů. Když se podíváme na sluneční spektrum (obr. 8), je zřejmé, že záleží na tom, jakou část z tohoto spektra je článek schopen využít. To závisí na šířce zakázaného pásu E_g daného materiálu, což je minimální energie potřebná k vytvoření páru elektron-díra, resp. excitonu. Článek tedy nemůže využít sluneční energii nižší než je energie E_g a nadbytek energie nad E_g je přeměněn na teplo.



Obr. 8 Sluneční spektrum po průchodu 1,5 násobkem tloušťky zemské atmosféry. Červená čára znázorňuje, které fotony ze spektra může ještě využít článek z krystalického křemíku (solarnielektrarny.webnode.cz)

Světlo, které dopadá na článek, je z části odraženo a z části absorbováno, při čemž poměr počtu párů elektron-díra nebo excitonů vytvoře-

ných fotony k počtu absorbovaných fotonů se nazývá vnitřní kvantovou účinností. Naproti tomu vnější kvantová účinnost vyjadřuje poměr počtu vytvořených párů, resp. excitonů, k počtu dopadajících fotonů a je ovlivněna reflexí od povrchu. Ve všech případech hraje významnou roli velikost difúzní délky, o které jsme se již zmiňovali. V souvislosti s tím se někdy zavádí tzv. sběrná účinnost, což je poměr počtu párů, resp. excitonů, které skutečně přispěly k proudu, (to znamená, že dospěly k OPN, byly rozděleny polem přechodu a dostaly se k elektrodám a odtud do elektrického obvodu) k počtu těch párů, resp. excitonů, které byly světlem vytvořeny.



Obr. 9 Vlevo je náhradní schéma osvětleného článku jako generátoru proudu s paralelně připojenou diodou. R_s je sériový odpor, R_{sh} je shuntující odpor a R je odpor zátěže. Vpravo v prvním kvadrantu je volt-ampérová charakteristika článku za tmy a ve čtvrtém kvadrantu při osvětlení. I_{SC} je proud nakrátko, U_{OC} je napětí naprázdno. Plocha největšího vepsaného obdélníku udává maximální výkon z článku. Tomu přísluší proud I_m a napětí U_m

Reálně mají oblasti N, P a kontakty dohromady odpor R_s , což snižuje velikost protékajícího proudu. Situaci je vidět na obr. 9 vlevo, znázorňujícím náhradní schéma osvětleného článku jako generátoru proudu I_L s paralelně připojenou diodou. Vedle sériového odporu R_s hraje roli také paralelní (shuntující) odpor R_{sh} , který obvykle souvisí se svody. Volt-ampérová charakteristika osvětleného článku, tj. závislost proudu zátěží R na napětí, má tvar:

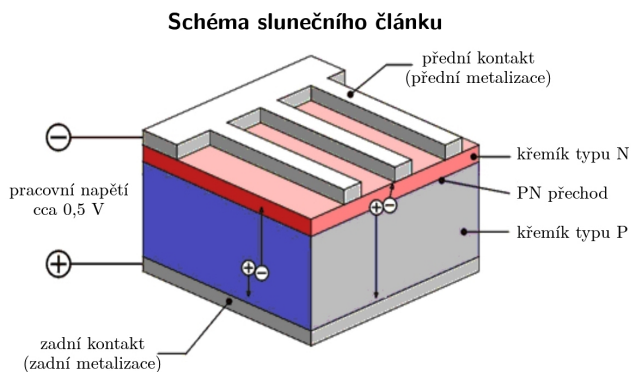
$$I = I_0 \left(\exp \left[\frac{e(U - IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right) + \frac{U - IR_s}{R_{sh}} - I_L. \quad (2)$$

Tuto závislost ukazuje obr. 9 vpravo ve čtvrtém kvadrantu; U_{OC} a I_{SC} jsou hodnoty napětí naprázdno a proudu nakrátko. Tyto hodnoty jsou ovlivněny právě parametry výše uvedenými. Plocha největšího vepsaného obdélníku udává největší výkon, který lze z článku získat ($U_m I_m$). Celková účinnost je pak poměr tohoto výkonu k příkonu, čili k výkonu dopadajícího světla. Na obrázku jsou tečnami znázorněny převrácené hodnoty sériového a paralelního odporu. Na adrese [11] je tzv. vzdálený experiment, kde je možno přímo z vaší místnosti změřit charakteristiku křemíkového článku při několika intenzitách osvětlení.

Konstrukce článků

a) anorganické články

Klasickou konstrukci křemíkového slunečního článku s hřebenovou horní elektrodou ukazuje obr. 10.



Obr. 10 Klasická konstrukce křemíkového článku zobrazující vytvořené elektrony (–) a díry (+) a jejich pohyb směrem k elektrodám. Přední elektroda má tvar hřebenu s takovou velikostí „prstů“, aby maximálně sbíraly náboje a přitom minimálně stínily světlo (L. A. Dobrzanski et al. J. Achievements in Mater. and Manufact. Engineering. 59 (2013), 67), upraveno.

Dokonalejší články jsou na povrchu opatřeny antireflexní vrstvou, která snižuje ztráty reflexí. Další pokrok představují texturované povrchy vytvořené leptáním [12]. Na povrchu jsou pak malé pyramidy; světlo odražené ze stran pyramid je využito tak, že je reflektováno dovnitř materiálu. Maximální účinnosti článků z anorganických materiálů jsou uvedeny v Tabulce 1.

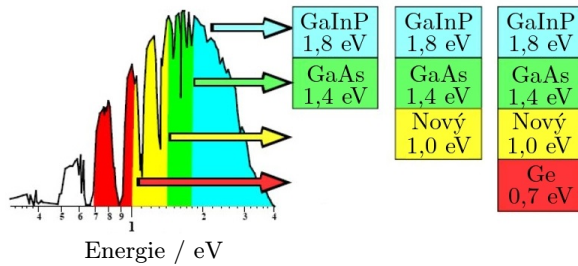
Tabulka 1: Účinnosti slunečních článků a modulů při osvětlení AM1,5 [13]

TYP ČLÁNKU	ÚČINNOST (%)	PLOCHA zkoumaného článku (cm ²)	VÝROBCE
křemík			
Si krystalický článek	26,7 ± 0.5	79	Kaneka, N-tyt
Si polykrystalický článek	22.3 ± 0.4	3.9	Fraunhofer ISE, N-tyt
články III-V			
GaAs tenká vrstva	29,1 ± 0.4	1	Alta devices
chalkogenidy			
CIGS	23,4± 0.5	1	Solar Frontier
CdTe	21,0± 0.4	1	First Solar
Amorfní/mikrokrystalický Si			
Si amorfní	10,2± 0.3	1	AIST
Si mikrokrystalický	11,9± 0.3	1	
perovskity			
článek z perovskitu	24,2± 0.8	0,1	KRICT, Korea
článek z perovskitu	20,9± 0.7	1	KRICT, Korea
modul	17,3± 0.6	703	Toshiba
články Graetzlova typu (barvivové)	10 -13		
článek	11,9± 0.4	1	Sharp
modul	8,8± 0.3	400	Sharp
organika			
organický článek	16,4± 0.2	0,04	SCUT, China
organický článek	16,4± 0.4	0,04	HKUST, Hong Kong
organický článek	11,2± 0.3	1	Toshiba
modul	9,7± 0.3	26	Toshiba

Pro lepší využití slunečního záření se konstruují tzv. tandemové články složené ze dvou nebo více jednotlivých článků s rozdílnými šířkami zakázaného pásu. Světlo dopadá na vrchní článek s nejširším zakázaným pásem a postupuje do dalšího článku s nižším pásem, kde jsou využity delší vlnové délky (obr. 11).

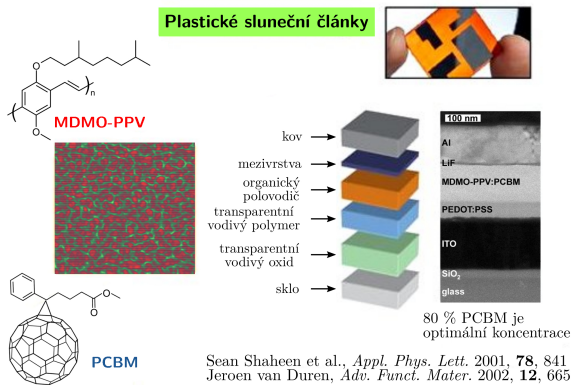
b) organické články

První organické články měly podobu dvou vrstev opačného typu vodivosti nanesených na sobě. Především vzhledem k nízkým difúzním délkám byla jejich účinnost velmi malá (< 1 %). Mnohem lepších výsledků se dosáhlo promícháním obou typů polovodičů v jedné vrstvě. Vznikl tak tzv.



Obr. 11 Využití sluneční energie v tandemovém článku. Účinnost dvouvrstvého tandemu je 31 %, třívrstvého tandemu 38 % a čtyřvrstvého tandemu 41 %. „Nový materiál“ může být např. GaInNAs.

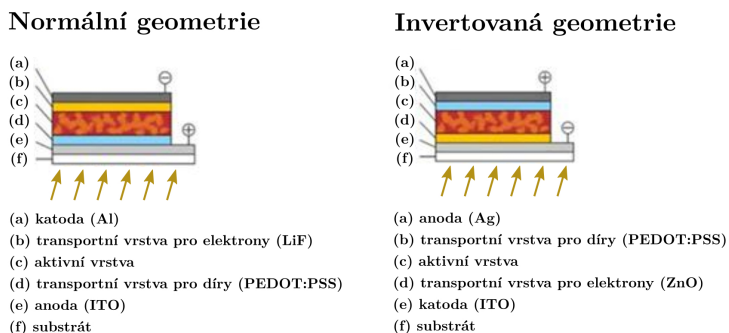
objemový článek. Materiálem typu P bývá polymer a materiálem typu N fulleren. Tím se zvýší plocha přechodu, na které se rozdělují excitony a současně klesne vzdálenost, kterou musí excitony urazit, aby se k přechodu dostaly (obr. 5). To vedlo k účinnostem postupně až nad 10 %. Na obr. 12 je struktura plastického článku s organickým polovodičem MDMO-PPV (derivát polyphenylenu vinilenu) ve směsi s fullerenem.



Obr. 12 Struktura plastického článku s organickým polovodičem MDMO-PPV (derivát polyphenylenu vinilenu) ve směsi s fullerenem. Tenké mezivrstvy LiF a PEDOT:PSS napomáhají přenosu nábojů k elektrodám.

V současnosti účinnost článků z organických materiálů překročila hranici 10 %, která se již považuje za ekonomicky zajímavou. Struktura článků je ovšem složitější. Pod elektrodami jsou tzv. transportní vrstvy, které

propouštějí ke katodě pouze elektrony, resp. k anodě pouze díry, aby nedocházelo ke ztrátám nábojů rekombinací. Situace je vidět na obr. 13 jak pro případ normální geometrie, tak pro geometrii invertovanou, kde je článek chráněn proti vlivu atmosféry (jedná se především o oxidaci hliníku) vrchní stříbrnou elektrodou.



Obr. 13 Sluneční článek s objemovým heteropřechodem opatřený vodivými vrstvami, které přenášejí elektrony a díry k příslušným elektrodám (transportní vrstvy pro elektrony a díry). Obrázek vlevo ilustruje normální geometrii, obrázek vpravo invertovanou geometrii (pv.sjtu.edu.cn/research.html).

Tabulka 2: Účinnosti slunečních článků a modulů při koncentraci záření (4. sloupec) [13]

TYP ČLÁNKU	ÚČINNOST (%)	PLOCHA (cm ²)	INTENZITA AM1.5	VÝROBCE
GaAs	29,3± 0,7	0,1	49,9	LG Electronics
Si	27,6 ± 1,2	1	92	Amonix
CIGS tenká vrstva	23,3± 1,2	0,1	15	NREL
AlGaInP/AlGaAs/GaAs/GaInAs	47,1± 2,6	0,1	143	NREL
GaInP/GaInAs/Ge;Si	40,6± 2,0	287	365	UNSW

Poznámka: AM1.5 je zářivý tok dopadající na Zemi po průchodu 1,5 násobkem tloušťky zemské atmosféry a o hustotě výkonu 930 W/m². Tato hodnota se používá nejčastěji.

Fotovoltaické systémy

Jednotlivé články se používají jen v aplikacích, jako jsou např. kalkulačky, hodinky, nabíječky, nebo drobné osvětlení. Spojením několika článků vznikají moduly o ploše desítek až stovek cm², kde se články spojují do sé-

rie i paralelně. V praxi se setkáváme s fotovoltaickými panely, které jsou na přední straně opatřeny sklem odolným proti nárazu a zapouzdřeny do plastického materiálu a obvykle mají kovový rám. Dalším stupněm je zapojení panelů do fotovoltaických systémů často doplněných akumulátory, které dodávají energii v noci, nebo při nedostatečném slunečním svitu. Stejnoseměrný proud z panelů je přeměněn na střídavý pomocí invertorů, aby mohl být použit pro síťové spotřebiče a pro dodání do rozvodné sítě. Panely většinou nevyžadují údržbu a životnost v případě křemíkového krystalického materiálu je 20 až 30 let. Jako ukázkou uvádíme fotovoltaický systém instalovaný v roce 2003 na střeše Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze v areálu Trója (obr. 14). Je to případ fotovoltaické (PV) elektrárny s výkonem 20 kW. Tato elektrárna vyrobí ročně přibližně 20 MWh elektrické energie. Podle údajů z roku 2017 je v ČR instalováno 28 315 PV elektráren s úhrnným výkonem 2 110 MW. Energetický regulační úřad ve zprávě o provozu elektrizační soustavy v České republice uvádí, že ve 4. čtvrtletí roku 2018 byl celkový instalovaný výkon PV elektráren 2 048,9 MW. V ČR je největší PV elektrárna v bývalém výcvikovém areálu Ralsko s výkonem 38,3 MW (obr. 15), následuje elektrárna Vepřek v Nové Vsi o výkonu 35,1 MW a Brno-letišť Tuřany s 21,2 MW.



Obr. 14 Sluneční elektrárna na střeše budovy Matematicko-fyzikální fakulty v Praze Tróji. Výkon elektrárny postavené v roce 2003 je 20 kW.

Většina elektráren byla spuštěna v roce 2010. V Evropě dosáhl roční instalovaný výkon maxima v roce 2011, a to asi 20 000 MW. V současnosti se uvádí, že největší PV elektrárna v Evropě je ve Španělsku s instalovanou kapacitou 300 MW. Na 2. a 3. místě jsou PV elektrárny na dvou místech



Obr. 15 Sluneční elektrárna v Ralsku o výkonu 38,3 MW (www.fotovoltaiickepanely.eu)



Obr. 16 Sluneční elektrárna ve Spojených arabských emirátech se současně nejvyšším výkonem 1,2 GW (www.pveurope.eu).

v Německu (54 MW a 53 MW), kde se jedná o tenkovrstvé panely. Při tom celkový instalovaný výkon v Německu je 45,9 GW. V roce 2019 byla uvedena do provozu největší elektrárna na světě. Je instalována ve Spojených arabských emirátech a má výkon 1,2 GW (obr. 16). Nabízí elektrinu velmi levně, údajně jen za 55 haléřů za 1 kWh. V roce 2017 bylo uvedeno, že celkové množství výkonu z PV zařízení je 227 GW a bylo vyrobeno hlavně v Číně, Japonsku a USA. Všechny tyto údaje jsou převzaty ze Serveru Google a z [14]. Organické PV panely bývají často zkonstruovány z článků tištěných na ohebnou folii. Pro lepší využití slunečního záření a pro zvýšení celkové účinnosti se počítá s tandemovými články. Obr. 17 ukazuje tištěné a srolovatelné organické moduly vyráběné v Dánsku [15]. Principiálně jimi lze pokrýt i střechy, nebo fasády domů.



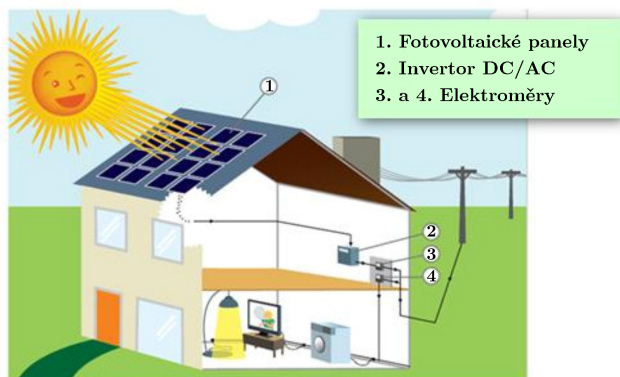
Obr. 17 Srolovatelný modul z organických článků tištěný na ohebné folii vyráběný v Dánsku (infinitypv.com).

Střešní panely

Velký praktický význam mají panely umístěné na střechách obytných nebo veřejných budov. Zajímavostí je např. instalace solárních panelů na střeše provozní budovy Národního divadla v Praze, nebo střešní elektrárna v Ostrožné Lhotě postavená v neužívané průmyslové zóně. Na střechách obytných domů se podle rozsahu spotřeby uplatňují panely s výkonem 3 kW_p až 5 kW_p (W_p je tzv. špičkový výkon při dopadu zářivého toku 1 kW/m^2) jakožto vlastní zdroje doplněné baterií (obr. 18).



Obr. 18 Obytné domy se střešní elektrárnou v kombinaci s baterií (www.solarenavi.cz).



Obr. 19 Ilustrace sluneční elektrárny v kombinaci s rozvodnou sítí.

Hybridní systémy využívají kombinace střešní elektrárny a rozvodné sítě. Situaci ukazuje schematicky obr. 19, kde jsou na střeše umístěny moduly, větší střechy bývají rovněž pokryty fotovoltaickými panely. V případě nedostatku slunečního svitu je možno odebírat energii ze sítě a naopak při jeho přebytku energii do sítě dodávat.

Literatura

- [1] *Lorenzo, E. et al.*: Solar Electricity. Engineering of Photovoltaic System. Earthscan Publications Ltd. & PROGENSA, 1994.
- [2] *Brabec, Ch., Scherf, U., Dyakonov, V. (Eds.)*: Organic Photovoltaics. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- [3] *Smestad, G. P., Graetzel, M.*: Demonstrating electron transfer and nanotechnology: A natural dye-sensitized nanocrystalline energy converter. *J. Chem. Educ.* 75(6) (1998), 752–756.
- [4] Man Solar 2006. www.mansolar.nl/
- [5] *Lüssem, B., Riede, M., Leo, K.*: Doping of organic semiconductors. *Physica Status Solidi A* 210 (2013), 9–43.
- [6] *Li, W. et al.*: Polymer solar cells with diketopyrrolopyrrole conjugated polymers as the electron donor and electron acceptor. *Advanced Materials* 26(20) (2014), 3304–3309.
- [7] *Holovský, J. et al.*: Photocurrent spectroscopy of perovskite layers and solar cells: A sensitive probe of material degradation. *J. Phys. Chem. Letters* 8(4) (2017), 838–843.
- [8] Nanjing University. www.nju.edu.cn/en/main.psp
- [9] University of Toronto. www.utoronto.ca/
- [10] Swansea University. www.swansea.ac.uk/
- [11] iSES – Internet School Experimental System. www.ises.info
- [12] *Green, M. A.*: Solar Cells: operating principles, technology, and system applications. Prentice–Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1982.
- [13] *Green, M. et al.*: Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics* 27(7) (2019), 565–575.
- [14] oEnergetice.cz – denní zpravodajství z energetiky. oenergetice.cz/
- [15] *Krebs, F. C., Fyenbo, J., Jørgensen, M.*: Product integration of compact roll-to-roll processed polymer solar cell modules: methods and manufacture using flexographic printing, slot-die coating and rotary screen printing. *J. Mater. Chem.* 20(41) (2010), 8994–9001.