

Polymery ve fotovoltaice

Patrik Novák

Bakalářská práce
2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav fyziky a mater. inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Patrik Novák**
Osobní číslo: **T16404**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Polymery ve fotovoltaice**

Zásady pro vypracování:

Bakalářská práce je zamýšlena jako teoretická studie zabývající se vodivými polymery aplikovatelnými ve fotovoltaice. Smyslem práce je provést ucelenou rešerši na téma vývoje použití polymerů ve fotovoltaice, dále pak rozvinout, jaké přinášejí výhody, kde leží jejich nevýhody, jaké jsou nejnovější výzvy v této oblasti.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. A. Alekseev, G.J. Hedley, A. Al-Afeef, O.A. Ageev, I.D.W. Samuel, Morphology and local electrical properties of PTB7:PC71BM blends, *Journal of Materials Chemistry A* 3(16) (2015) 8706–8714.
2. L.Y. Lu, L.P. Yu, Understanding Low Bandgap Polymer PTB7 and Optimizing Polymer Solar Cells Based on It, *Advanced Materials* 26(26) (2014) 4413–4430

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Urbánek, PhD.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **1. února 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 22. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Novák Patrik.....

Obor: Matematické
inženýrství.....

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17.5.2019.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato teoretická práce pojednává o problematice materiálů používaných ve fotovoltaice se zaměřením na polymerní materiály a také na materiály v dnešní době hojně studované, tzn. perovskity. V první kapitole jsou popsány základní principy, jak funguje fotovoltaický článek. Kapitola 2 udává přehled o historickém vývoji fotovoltaických zařízení od křemíku po dnešní dobu. Kapitola 3 popisuje polymerní solární systémy a polymerní materiály v nich používané. Kapitola 4 pak navazuje popisem nejnovějších trendů v této oblasti.

Klíčová slova: Fotovoltaika, solární články, polymery, perovskity,

ABSTRACT

This theoretical work deals with materials used in photovoltaics systems, with special regard on polymers and today hardly studied Perovskites. In Chapter I, basic principles of photovoltaics systems are described. Chapter 2 shows an overview of historical development of PV cells, from Silicon cells to the newest systems. Chapter 3 describes polymer solar cells systems and polymers used there. Chapter 4 follows with description of newest trend in this research field.

Keywords: Photovoltaic, solar cells, polymers, Perovskites

Rád bych poděkoval Ing. Pavlu Urbánkovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce. Další obrovské poděkování patří rodině, především mamince za maximální možnou podporu a důvěru při studiu a také přítelkyni a všem blízkým přátelům.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY VE FOTOVOLTAICE.....	10
1.1 FOTOVOLTAICKÁ PŘEMĚNA ENERGIE	12
1.1.1 Polovodiče.....	13
1.1.1.1 Typu N.....	13
1.1.1.2 Typu P	13
1.1.1.3 Přejchod P-N	14
1.2 FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY	15
2 HISTORICKÝ VÝVOJ FOTOVOLTAICKÝCH ZAŘÍZENÍ	16
2.1 KŘEMÍKOVÉ (PRVNÍ A DRUHÁ GENERACE)	16
2.1.1 První generace	17
2.1.1.1 Monokrystalické články	17
2.1.1.2 Polykrystalické články	18
2.1.2 Druhá generace.....	18
2.1.2.1 Amorfni křemík.....	19
2.1.2.2 Materiály bez použití křemíku-technologie tenkých vrstev	19
2.2 TŘETÍ GENERACE SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	20
2.3 ORGANICKÉ.....	21
2.4 POLYMERNÍ.....	23
2.5 PEROVSKITOVÉ SOLÁRNÍ ČLÁNKY PSC	24
2.5.1 Perovskit.....	25
2.5.2 Historie perovskityckých solárních článků	26
2.5.3 Rozdělení perovskitů.....	26
2.5.4 Charakteristické vlastnosti PSC	27
2.6 OBECNÉ SROVNÁNÍ FOTOVOLTAICKÝCH ZAŘÍZENÍ	28
2.6.1 Výhody a nevýhody polymerních materiálů ve srovnání s perovskity	29
2.7 POLYMERY PRO POUŽITÍ VE FOTOVOLTAICE	31
2.7.1 Historický vývoj.....	32
2.8 VLASTNOSTI FOTOVOLTAICKÝCH ZAŘÍZENÍ	34
2.8.1 Příprava	34
2.8.2 Zpracovatelnost	34
2.8.2.1 Potahování odstřed'ováním - Spincoating	34
2.8.2.2 Síto tisk - Screen Printing.....	35
2.8.2.3 Inkoustový tisk - Ink-jet printing.....	36
2.8.2.4 Štěrbinový nátěr - Slot-die coating.....	37
2.8.2.5 Sprejový nátěr - Spray coating	37
2.8.3 Životnost	37
2.8.3.1 Degradace struktury	38
3 POLYMERNÍ FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY	39

3.1	NEJSTARŠÍ TYPY POLYMERŮ PRO SOLÁRNÍ SYSTÉMY.....	39
3.2	NEJNOVĚJŠÍ TYPY POLYMERŮ.....	41
3.2.1	Donor-akceptorové systémy.....	41
4	MODERNÍ TRENDY PRO POUŽITÍ POLYMERŮ VE FOTOVOLTAICE.....	42
4.1	OPTIMÁLNÍ POŽADAVKY PRO VYSOCE ÚČINNÉ POLYMERNÍ DONORY.....	42
4.2	ROZPUSTNOST	43
4.3	ABSORPČNÍ SPEKTRUM.....	43
4.4	ENERGETICKÁ HLADINA	43
4.5	POHYBLIVOST	44
4.6	MORFOLOGIE	44
	ZÁVĚR	46
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	48
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	53
	SEZNAM OBRÁZKŮ	56
	SEZNAM TABULEK.....	57
	SEZNAM PŘÍLOH.....	58
	PŘÍLOHA A: PŘEHLED NEJÚČINNĚJŠÍCH VYZKOUMANÝCH SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	59

ÚVOD

Lidstvo se potýká se třemi globálními problémy- znečištěné ovzduší, ubývání přírodních zdrojů a energetická bezpečnost. Neobnovitelné zdroje, především fosilní paliva mají největší podíl na celosvětových problémech. Řešením těchto problémů je vyrobení elektřiny pomocí obnovitelných zdrojů pomocí větrných, přílivových, vodních, geotermálních a solárních elektráren. V roce 2016 vzrostla globální kapacita solární energie výrazně strměji, než u jakéhokoliv jiného paliva. Odhaduje se, že 50% celosvětových kapacit má nainstalovaná Čína [1,2].

Předpověď rostoucí globální spotřeby elektrické energie z aktuálních 17 TW ročně se do roku 2040 předpokládá na 27 TW ročně. Energie ze slunce dopadající do horních vrstev atmosféry je přibližně 174000 TW, přitom se třetina odráží zpět do vesmíru a zbytek absorbují mraky, oceány a zemský povrch. Solární energie nám tedy poskytuje až 120000 TW a při jejím dostatečném využití pokryje celkové světové energetické nároky. Mnohdy se uvádí, že jedna hodina slunečního záření bude schopna pokrýt celkové roční globální potřeby. Využití co největšího množství dopadajícího slunečního záření je omezeno potřebou pokrýt velké plochy půdy [1].

Moderní výzkum chemie materiálů, který během ropných krizí od sedmdesátých let směřuje výzkum a výrobu elektřiny pomocí fotovoltaických a elektrochemických procesů, za použití prvních anorganických polovodičových technologií, články na bázi křemíku získaly největší komerční úspěch. Po celém světě existuje mnoho komerčních fotovoltaických elektráren, nejrozsáhlejší solární elektrárna s instalovaným výkonem 850 MW se nachází v Číně, ovšem jsou plány i s většími elektrárnami s výkonem přes 1 GW po celém světě [1,3].

Solární články jsou používány i v menších měřítkách pro různé aplikace. Používají se např. na hračkách, mobilních zařízeních, osvětleních, pro čerpání a úpravu vody, přenosné a nouzové zdroje, v letectví a kosmonautice a družicích [1].

Náplní této práce je vytvoření uceleného přehledu používaných fotovoltaických materiálů s důrazem kladeným na nejnovější trendy a využití dobře zpracovatelných polymerů a také slibných materiálů na bázi perovskitů. Práce má předložit náhled výchozích materiálů, vlastnosti použitých materiálů, jejich zpracování a přehled dosahovaných účinností.

1 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY VE FOTOVOLTAICE

Slunce z hlediska zdroje energie je koule intenzivně horké plynné hmoty. Průměr slunce je $1,39 \cdot 10^9$ m a vzdálenost slunce od země je $1,5 \cdot 10^{11}$ m. Slunce má teplotu černého tělesa 5777 K. Teplota v centru slunce je podle odhadů $8 \cdot 10^6$ až $40 \cdot 10^6$ K a hustota sluneční hmoty zhruba odpovídá 100 násobku hustoty vody. Energie vytvořená v jádru slunce při teplotě mnoha milionů stupňů se musí nejprve dostat na povrch a poté dojde k vyzáření do prostoru. Sluneční záření a běžné záření na zemi (tepelné záření a elektromagnetické vlny) nemají žádný významný rozdíl s výjimkou frekvence. Záření ze slunce v sobě skrývá obrovské množství energie, které je poměrně málo využívané a skrývá v sobě do budoucna obrovský potenciál pro její získávání, a poptávka po alternativních zdrojích energie udává směr zkoumání dalších technologií a postupů jak ji úspěšněji a efektivněji získávat [4].

Sluneční světlo před interakcí s materiály je převážně energií fotonovou ve formě záření. Po interakci s materiály se energie skrytá v záření přemění primárně na tepelnou energii, zbytek se přemění na elektrické, magnetické a jiné formy energie. Sluneční světlo má různá spektra a tím i různá procenta konverze záření, což vede ke koncepci rozdělení sluneční energie. Pro lidstvo je sluneční záření nejjasnějším slunečním zdrojem. Stanovená hodnota ozáření země je $2,5 \cdot 10^{27}$ cd/m² (20% oslabení atmosférou). Mimo atmosféru je hodnota $3 \cdot 10^{27}$ cd/m² [4].

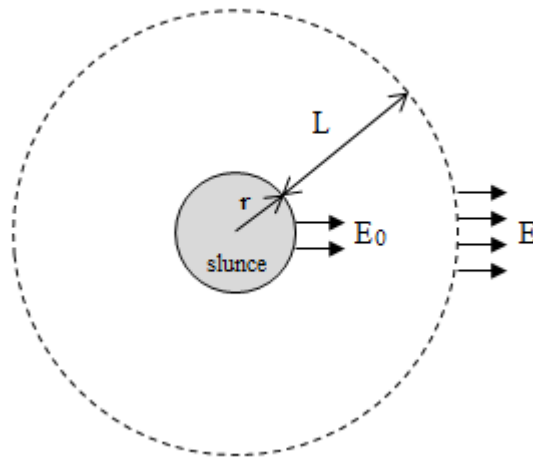
Hustota energie slunečního záření klesá se zvyšující se vzdáleností od slunce v prostoru, tzv. stává se řidší.

$$e_0 = \frac{E_0}{\frac{4}{3}\pi r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

Pokud předpokládáme, že poloměr slunce je r , vzdálenost mezi pozorovaným bodem a povrchem slunce je L a celkový energetický výkon slunečního záření je E_0 , můžeme získat hustotu toku energie:

$$e_0 = \frac{E_0}{\frac{4}{3}\pi(r+L)^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

Vyzařování celkové energie slunce můžeme rozdělit podél plochy, tím získáme tok hustoty energie slunečního povrchu $6,15 \cdot 10^7$ W/m² což je asi 45 000krát víc než na povrchu země. [4]



Obrázek 1 Šíření slunečního záření vesmírem [4]

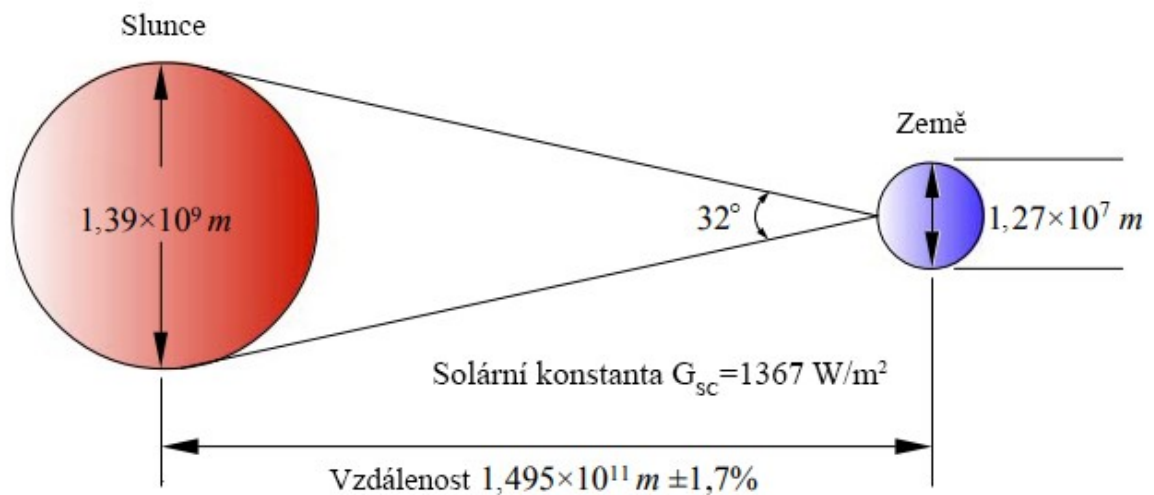
Sluneční záření se vesmírem šíří procesem proudění z izotermického objektu o teplotě 5700 K do chladnějšího objektu o teplotě 2,7 K. Budeme-li předpokládat, že pozadí kosmu a povrch slunce budou mít teploty černého tělesa a neexistuje žádný zářivý přenos tepla z kosmického pozadí na slunce, zákon o přenosu energie lze vyjádřit jako:

$$E_0 = \frac{4}{3} \pi r^2 \sigma T_s^4 [W] \quad (3)$$

Uvedený vztah je Stefan-Boltzmannův zákon popisující intenzitu záření absolutně černého tělesa, kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta a $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

Solární konstanta

Excentricita oběžné dráhy slunce-země mění vzdálenost o 1,7 %. Ve vzdálenosti jedné astronomické jednotky tj. $1,45 \cdot 10^{11} \text{ m}$, střední sluneční vzdálenosti, slunce podléhá úhlu 32° . Záření vyzařované sluncem a jeho prostorová vazba k zemi udává konstantní intenzitu slunečního záření mimo atmosféru země. Sluneční konstanta G_{SC} je energie ze slunce za jednotku času přijatá na jednotkovou plochu a kolmá ke směru šíření ve střední vzdálenosti mimo atmosféru. [4,5]



Obrázek 2 Schéma stanovení solární konstanty [4]

Světové radiální centrum (WRC) přijalo hodnotu 1367 Wm^{-2} .

1.1 Fotovoltaická přeměna energie

K fotovoltaické přeměně energie elektromagnetického záření na energii elektrickou dochází v polovodičových materiálech, které jsou použity ve fotovoltaických (PV) článcích. Transformace energie záření se skládá ze dvou kroků. Za prvé, absorpce světla a vytvoření páru elektron-díra. Za druhé, separace elektronu a díry působením struktury článku [7].

Záření dopadající na polovodičové materiály dokáže excitovat elektron a tento jev dokáže významně zvýšit vodivost vytvářením excitovaných stavů, při kterých se pak může elektron dostat do vodivostního pásu. Samotné excitované elektrony nejsou schopny volného pohybu, pokud dále nejsou potlačeny vnější působením. Síla potlačující pohyb elektronů vzniká z přítomnosti gradientu elektrického potenciálu, který se objeví na p-n přechodu dopovaných polovodičových materiálů [7].

Tím dojde k usměrnění toku částic a generování elektrického proudu.

Nejdostupnějším materiálem na výrobu PV článků je krystalický křemík. Při použití odlišných materiálů, organických, polymerních je fyzikální princip přeměny obdobný.

1.1.1 Polovodiče

Vlastní – (intrinzické) mají stejné zaplnění energetických pásů jako izolanty. Valenční pás mají zcela obsazený a vodivostní zcela prázdný (uvažujeme při teplotě 0 K). Rozdíl tvoří šířka zakázaného pásu ΔE . Např. $\Delta E(\text{Ge}) = 0,66 \text{ eV}$, $\Delta E(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV}$, $\Delta E(\text{GaSb}) = 0,8 \text{ eV}$. Vlivem teploty ($T > 0\text{K}$) nebo vnějšího působení může elektron získat potřebnou energii (min. ΔE) a přejít tak do vodivostního pásu. Pokud na polovodič nepůsobí žádné elektrické pole, je směr pohybu elektronu ve vodivostním pásu zcela nahodilý. Vznik elektrického proudu v krystalu polovodiče je možný až po připojení elektrického pole, při němž dojde k potřebnému usměrnění toku elektronů. Přechody elektronů do vodivostního pásu po sobě zanechávají ve valenčním pásu neobsazené kvantové stavy – díry. Proces přestupu elektronů a vytváření děr se nazývá generování párů elektron – díra [7].

Nevlastní – jsou to materiály dopované atomy cizích prvků. Vzrůst vodivosti způsobuje i minimální množství obohacujících atomů (tisíciny procent). Příměsové atomy jsou substitučně vloženy do krystalové mřížky a tím významně ovlivňují elektronovou nebo děrovou vodivost [8].

1.1.1.1 Typu N

Polovodiče typu N lze obecně charakterizovat jako materiál, který má ve své struktuře navázanou příměs s vyšším počtem elektronů. V případě čtyřmocného prvku např. Si, Ge, je v krystalové struktuře navázán pětimocný prvek např. P, As, Sb. Tento příspěvek způsobí, že čtyři valenční elektrony jsou navázány na atomy kovalentními vazbami a pátý je ke svému vazebnému atomu přitahován velmi slabě a po přijetí malé aktivační energie se může odtrhnout a podílet se na vedení elektrického proudu. Pětimocné příměsi se označují donory – dodávají elektrony do vodivostního pásu. Nosičem proudu v polovodiči typu N jsou tedy elektrony – majoritní nosiče, které způsobují tzv. elektronovou vodivost [8].

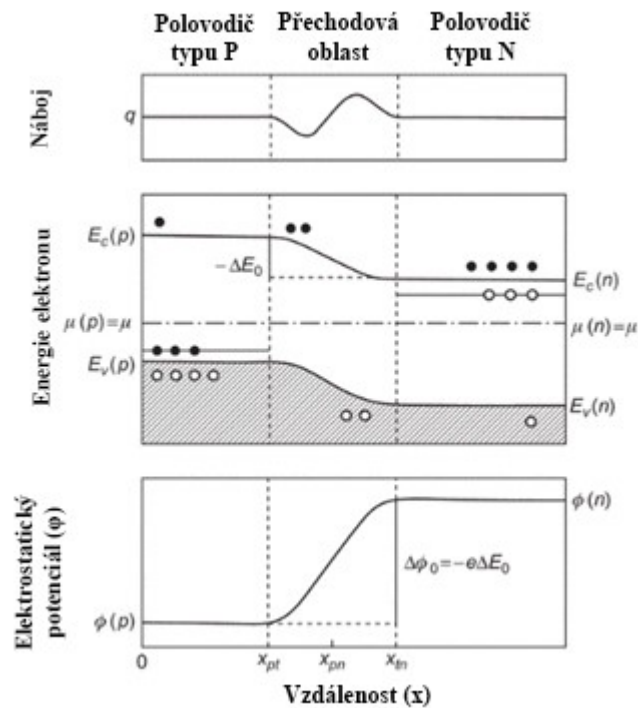
1.1.1.2 Typu P

Jsou polovodiče, kterým ve své struktuře schází elektron a tak atomy obsahují neúplnou vazbu. Pokud v krystalové mřížce zaměníme čtyřmocný prvek prvem trojmocným např. B, Al, Ga, In, jsou tři valenční elektrony plně vázány a čtvrtá vazba zůstane neúplná. Tento neobsazený kvantový stav má chování jako díra. Opět stačí velmi malá energie pro přeskoky elektronů z horní hladiny valenčního pásu, což má za výsledek zaplnění vazby

trojmocného prvku. Generovaná díra vzniklá ve valenčním pásu se může pohybovat a působením vnějšího elektrického pole je schopná vést proud. Příměsí s menším počtem elektronů se nazývají akceptory – přijímají elektrony z valenčního pásu a způsobují tzv. děrovou vodivost [8].

1.1.1.3 Přechod P-N

Přechod p-n je místem, kde se v těsné blízkosti dotýkají odlišné polovodičové materiály typu P a typu N, které mají rozdílné nosiče náboje. Na rozhraní p-n přechodu vzniká elektrické pole, které způsobuje, že elektrony excitované slunečním zářením se dostanou do pohybu ve směru od typu P k materiálu typu N. Tento pohyb vyvolá, že volné díry, které zůstaly po excitovaném elektronu, se dají do pohybu opačným směrem. Pokud se elektrony a díry dostaví na hrany polovodičových materiálů je zařízení schopno dodávat elektrickou energii do externího obvodu. Pohyb elektronů a děr je však omezen vlastními rekombinačními procesy (elektrony jsou zachyceny na volná místa). V okolí p-n přechodu dojde k vytvoření přebytečného náboje, který vytváří elektrostatický rozdíl potenciálů, který brání k elektronovému toku, až se dostaví rovnováha, při které nedochází k žádnému přenosu elektronů [9].



Obrázek 3 Schéma přenosu elektrického náboje [9]

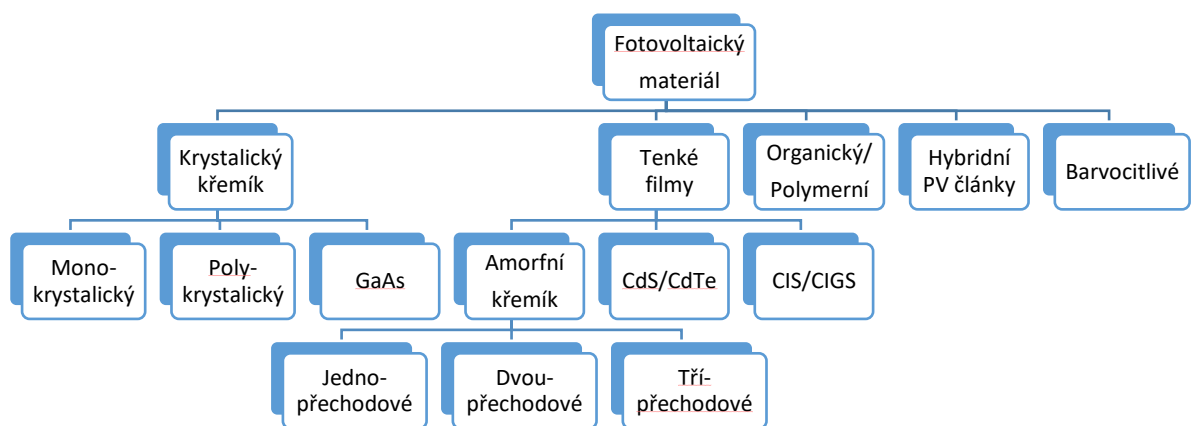
1.2 Fotovoltaické články

Fotovoltaické články jsou postaveny tak, aby absorbovali co nejvíce dopadajícího slunečního záření (dopadající energie) z celé šířky světelného spektra a co nejefektivněji je přeměnily na elektrickou energii pomocí různých optimalizovaných typů polovodičových struktur. Nejdůležitějším parametrem polovodičových materiálů je šířka zakázaného pásu (tzv. band gap). Což je energetický parametr (bariéra) daného polovodičového materiálu pro přechod elektronu z valenčního do vodivostního pásu, který se významně liší svou šířkou udávanou v elektrovoltech (zkr. eV). Band gap je tedy energetický rozdíl mezi horní částí valenčního pásu (vnější elektrony) a spodní částí vodivostního pásu (volný tok elektronů). Pokud materiál absorbuje dostatečnou energii (min. energii zakázaného pásu) můžou elektrony excitovat do vyššího vodivostního pásu. Hodnoty zakázaných energií jsou specifické pro každý polovodič [1].

Celé spektrum světla od infračerveného až po ultrafialové energeticky pokrývá rozsah 0,5- 3,4 eV. Materiál určený pro fotovoltaický článek by tedy měl absorbovat co nejširší část spektra [1].

2 HISTORICKÝ VÝVOJ FOTOVOLTAICKÝCH ZAŘÍZENÍ

První solární články byly sestaveny v Bellových laboratořích v roce 1954. Podmínkou k vytvoření byla obava z energetické krize kvůli omezenému množství fosilních paliv. Zajištění nových zdrojů energie měly poskytnout obnovitelné zdroje energie, mezi které se konverze slunečního záření řadí. První generace zaštiťuje krystalický křemík - monokrystalický a polykrystalický. V roce 2004 zaujímaly celkem 86 % světového trhu. Nevýhodou těchto článků byly vysoké náklady, vysoká spotřeba materiálu, vysoké energetické nároky na zpracování. Hnací silou využití solární energie ve větším měřítku bylo snížení vysokých nákladů, snížení spotřeby materiálu i při snížení účinnosti a tím vznikly články druhé generace, které byly z tenkých vrstev. Solární články druhé generace byly vytvořeny nanášením velmi tenkého filmu, který nabízel až 100x větší plochu než u článků první generace. Výhodou byla menší spotřeba materiálu, snadnější výroba, která významně snížila výrobní náklady. Materiály použitelné v druhé generaci byli omezené, významní zástupci byly a-Si, p-Si, CdTe, CIS. Nejúčinnější panel druhé generace byl z polykrystalického křemíku. Současnou třetí generací solárních článků je vize zlepšovat účinnost, snížit výrobní náklady. Optimalizace vlastností spočívá ve snižování ztrát energie – přeměna na teplo, zlepšení absorpce fotonu a snižování vnitřního odporu fotovoltaického materiálu [10].



Obrázek 4 Schéma technologických příprav fotovoltaických materiálů [32]

2.1 Křemíkové (První a druhá generace)

První generace fotovoltaických zařízení měla jako výchozí surovinu různě modifikovanou strukturu křemíku – monokrystalickou, polykrystalickou, amorfnní na bázi tenkých

vrstev. Křemík nabízel vysoký potenciál, ať už od samotného získávání až po zpracování, a slušnou efektivitu transformace energie. Je jako druhý nejrozšířenější chemický prvek v zemské kůře. Relativně snadno dostupný materiál a nejvíce používaný a nejprobádanější polovodič [10].

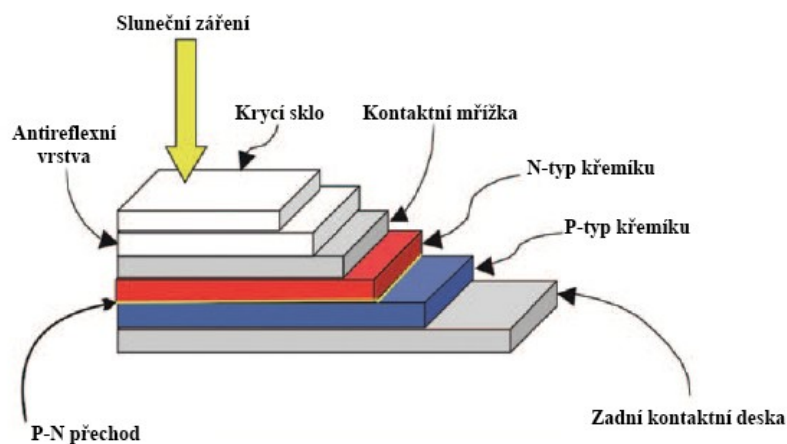
2.1.1 První generace

Fotovoltaické články patřící do první generace jsou monokrystalické a polykrystalické křemíkové desky. Dělí se podle výroby a zpracování a struktury použitého křemíku. Jejich účinnost se pohybuje okolo 20 % a jejich největší nevýhodou byla vysoká cena (300-500 USD/m²). Vysokou cenu způsobovala náročnost na zpracování a výrobu a v neposlední řadě na vysokou spotřebu krystalického křemíku. Obecně se uvádí, že 50% nákladů bylo v nákladech na křemíkové desky. Tloušťka desek se pohybovala 200-250 μm [4,7].

Solární články první generace v roce 2007 představovali více než 85% komerční výroby. Složení modulu bylo z 36 článků v sérii. Každý článek generoval maximální napětí 0,6 V, takže celkové výstupní napětí panelu bylo 20 V, což dostačovalo na dobíjení 12 V olověné baterie [7].

2.1.1.1 Monokrystalické články

Monokrystalické články jsou vyrobeny z ingotu vysoce čistého monokrystalického křemíku (c-Si). Tyto PV články byly vytvořeny již v 50 letech. Monokrystalické PV články používají destičky křemíku o tloušťce 0,3 mm, které jsou řezány z křemíkového ingotu. Monokrystalické buňky jsou dražší na výrobu a nabízejí účinnost o 15 – 22% vyšší než polykrystalické buňky. Vypočtená maximální konverze energie při nekoncentrovaném záření je 31% (Shockley a Queisser 1961). Teoretická účinnost monokrystalických PV článků se blíží rozsahem pásů od 1,25 až 1,45 eV. Běžně vyráběné solární články dosahují pouze 10% účinnosti [13].



Obrázek 5 Struktura vrstev krystalického solárního článku [1]

2.1.1.2 Polykrystalické články

Polykrystalické PV články patří do druhé oblasti struktur první generace křemíkových článků. Polykrystalické články jsou řezané z bloku křemíku a obsahující několik křemíkových krystalů. Toto zpracování nabízí snadnější úpravu a zpracování křemíku z formy než z monokrystalu a tento fakt snižuje i náklady na samotnou výrobu. Jak již bylo uvedeno výše, prvotní polykrystalické články vykazovaly nižší účinnost. Dlouhá léta výzkumu však dokázala polykrystalický křemík s jeho účinností dostat až na konkurenceschopnost monokrystalické buňky. Polykrystalické PV články nabízejí účinnost 13 – 15 %. Polykrystalické moduly bývají zpravidla větších rozměrů kvůli větším jednotlivým buňkám [13].

2.1.2 Druhá generace

Druhá generace křemíkových PV článků sahá na počátek 90 let. Podstatou výroby byla snaha snížit vysoké náklady na krystalický křemík, který činil až 40-50% nákladů na hotový výrobek. Druhá generace PV článků je postavena na bázi tenkých vrstev polovodičů. Technologie tenkých vrstev nabízí 100 až 1000 x tenčí aktivní vrstvu a tím významně snižují spotřebu křemíku a konečnou cenu produktu. Technologie druhé generace používá pouze 1-10 μm aktivního materiálu a mnohem efektivněji absorbuje sluneční záření. Náklady na jednotku instalovaného výkonu se od první generace téměř neliší. Primární neduhem je nutnost vakuových technologií výroby, které při daných objemech výroby zaostávají a prodražují celý proces. Ovšem účinnost článků výrazně klesá - pod 10 %. Použití tenkých vrstev poskytuje využití CIS struktur – použití směsných polovodičů jako Cu, In, S, Ga nebo Se.

Použití různorodých podkladových substrátů (organické, kovové, textilní folie) poskytuje rozmanité použití – např. ohebné materiály [4,13].

2.1.2.1 Amorfni křemík

Amorfni křemík (a-Si) je nekystalická forma křemíku. Amorfni křemík poskytuje větší absorpční koeficient kvůli kvazi-směrovému band gapu a tím vykazuje nutnost tenkých vrstev (tenkého filmu), které se pohybují v rozsahu 1 μm . Výhodou jsou nižší materiálové náklady než na krystalický křemík. Výroba amorfni PV buněk je pouze nanosení tenkého filmu nebo vrstvy polovodičů na materiál substrátu – sklo, plast, kov. Amorfni PV buňky s band gapem $\approx 1,7$ eV mohou být dopovány jako krystalické. Buňky na bázi amorfniho křemíku však tíží životnost. Buňky trpí světelnou indukovanou nestabilitou což má za následek snižování účinnosti [13].

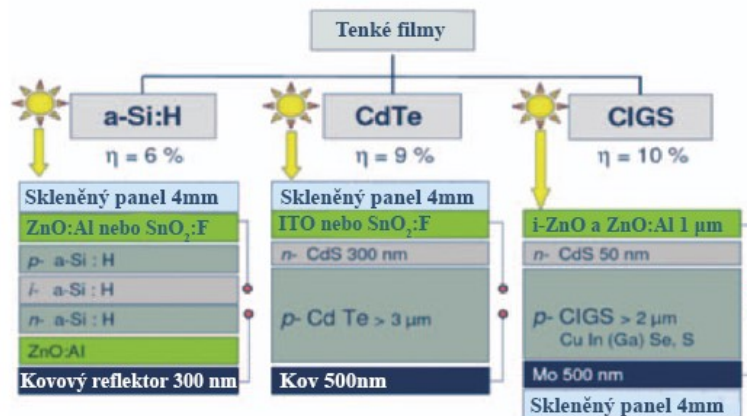
2.1.2.2 Materiály bez použití křemíku-technologie tenkých vrstev

Měď-indium-galium-diSelenid (CIGS) a telurid kadmia (CdTe) jsou technologie pro technologie tenkých vrstev, které jsou konstruovány na složených polovodičích. CIGS nebo $\text{Cu}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Se}_2$ mají modifikovatelné band gapy od 1,04 eV do cca 1,68 eV a byly vyvinuty v 80. letech jako náhrada amorfniho křemíku a tyto nové materiály měly vyplnit jeho nedostatky. Výroba je velmi snadná, články se vyrábějí v jednom kroku při nízké teplotě nanesením tenkého filmu nebo vrstvy polovodičového materiálu na substrát jako je sklo, kov nebo plast [13].

CIGS (band gap 1,38 eV) má vysoký absorpční koeficient a poskytuje 99% absorpci dopadajícího záření na první mikron materiálu, který transformuje energii. Výzkum článku potvrdil v roce 2014 účinnost více než 20%. Silným nedostatkem zařízení je rychlý rozklad vlivem vlhkosti. V roce 2016 byl dosažen nejvyšší výkon článku 22,6% [1,13,14].

CdTe (band gap 1,45 eV) byl vyvinut v 90. letech. Má vysokou absorpci a je výborně optimalizovaný pro dopadající záření a jeho přeměnu. Konverze záření probíhá na jednom přechodu (single junction článek). Klasický PV článek CdTe má strukturu z jednoduchého p-n přechodu. P-dopovaná CdTe vrstva s n-dopovanou vrstvou sulfidu kadmia, které působí jako skleněná vrstva. Samotná technologie výroby CdTe článků je nízkonákladová. Opět materiál je levnější než krystalický křemík. Průměrná účinnost modulu na trhu je 14,7% (Společnost First Solar v r. 2014 na CdTe PV modulu dosáhla účinnosti 21,5%). Negativem

rozšířenějšího použití CdTe je kadmium – nejznámější a nejnebezpečnější toxický materiál [1,13].



Obrázek 6 Struktura solárních článků na bázi tenkých vrstev včetně účinnosti [1]

2.2 Třetí generace solárních článků

Třetí generace PV článků využívají stále křemík, ale především nové inovativní materiály- organické, polymerní, vodivé plasty, solární barvy, kvantové tečky a solární inkousty pro tiskové technologie. Cílem této generace je získat co nejvyšší účinnost a zajistit co nejnižší náklady na watt vyrobené elektřiny PV článku. Výkon je stále značně omezený avšak se srovnáním první a druhé generace článků nabízejí velký potenciál na snižování nákladů na efektivitu článků. Třetí generace PV článků zaštiťuje více přechodové články, které mají vysokou účinnost a jejich primární využití je pro kosmické a vojenské aplikace, kde se klade důraz právě na vysokou účinnost a faktor výrobních nákladů je zde zanedbán [13].

Vícevrstvé solární články dosahují vyšší konverze při použití dvou a více různých buněk (materiálu) s více zakázanými pásy než s jedním přechodem generujícím elektrickou energii. Použité polovodičové materiály jsou vybrány z prvků III-V skupiny periodické soustavy prvků. Rozdílnost použitých polovodičových materiálů způsobuje různorodou absorpci a přeměnu dopadajícího slunečního záření ze specifické vlnové délky pohlcené materiálem z dopadajícího spektra. Vícevrstvé (mnoho přechodové, multi-junction) články se skládají z vrstev v sestupném pořadí podle šířky band gapů tak, aby dopadající záření zasáhlo nejdříve svrchní buňku nejvyšší fotonové energie. S cílem snížit vysoké náklady na výrobu vícevrstvé buňky se využívá optického koncentrátoru – plastové čočky nebo zrcadla,

který usměrňuje záření na malou plochu vícevrstvé buňky. Využití koncentrátoru jako nízkonákladové součástky enormně zvyšuje efektivitu průmyslové aplikace – snižuje významně rozměr článku a tím i potřebné množství použitého fotovoltaického materiálu. V roce 2014 bylo dosaženo světového rekordu s 46% účinností článku o 4 přechodech. Každá z vrstev transformuje 25 % dopadajících fotonů [13].

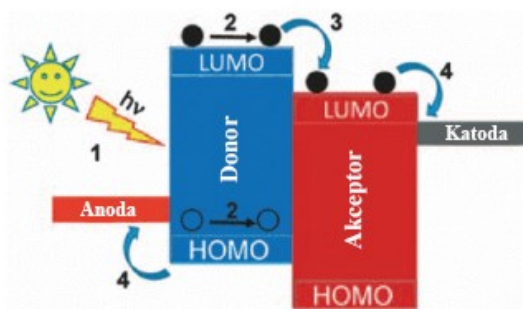
Tabulka 1 Přehled šířky band gapů různých materiálů [1]

Skupina	Materiál	Symbol	Band gap [eV]
IV	Křemík	Si	1,11
IV	Germánium	Ge	0,67
III-V	Nitrid gália	GaN	3,40
II-V	Fosfát gália	GaP	2,26
III-V	Arsenid gália	GaAs	1,43
III-V	Fosfid india	InP	1,34
III-V	Fosfid gália india	GaInP	1,80
IV-VI	Sulfid olova	PbS	0,37
I-VI	Telurid kadmia	CdTe	1,50

2.3 Organické

Anorganické solární články mají jednoduchou a přímou konverzi záření na elektrickou energii přímým vytvářením párů elektron-díra v celém objemu článku. U organických PV článků dochází k interakci polovodiče se slunečním zářením, čímž vzniká exciton, který je těsně spjatý s párem elektron-díra. Organické články bývají někdy označovány jako excitované PV články [1,15].

Princip absorpce záření: Kvantum energie procházející polymerním polovodičem difunduje exciton v aktivní vrstvě. Exciton se pohybuje na rozhraní mezi materiálem donoru (D) a akceptoru (A), kde disociuje na volné nosiče náboje. Elektrony jsou separovány do LUMO (Lowest unoccupied molecular orbital) akceptoru a volné díry do HOMO (Highest occupied molecular orbital) donoru. Z toho plyne, že elektrony a díry jsou transportovány prostřednictvím akceptorové a donorové fáze k elektrodám zařízení [1,15].



Obrázek 7 Schéma separace náboje [1].

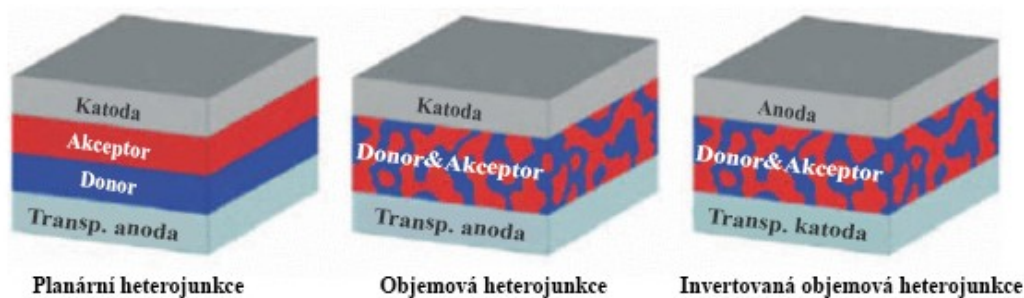
Články z organických molekul PV mohou být děleny na:

- čistě organické solární články (OSC),
- hybridní solární články (HSC),
- pigmentem dopované solární články (DSSC).

Rozdíl ve výše uvedených typech organických PV článků je v aplikaci polovodičových materiálů. Organické články jsou zkonstruovány pouze z organických polovodičů. Zbylé dva typy jsou kombinacemi organických a anorganických polovodičů [1].

První formování OSC vycházelo z výroby dvouvrstvé p-n hetero-přechodové buňky tvořené perylentetrakarboxylovou kyselinou jako akceptoru malých molekul a derivátem měďnatého ftalokyaninu jako donorem mezi dvěma elektrodami -cínem dopovaného oxidu india (ITO) a stříbra. Vytvořená buňka byla průlomovou technologií, avšak její účinnost dosahovala okolo 1%. Dalšími použitými organickými materiály byly α -Cu-ftalocyanin (CuPc) jako donor a 3,4,9,10-perylentetrakarboxylová kyselina jako akceptor, která se vysráží na poklad substrátu ITO, který je samostatně pokrytý vrstvou poly(etylendioxythiofen) kyseliny polystyrensulfony (PEDOT:PSS), který tvoří anodu. Konverze energie těchto planárních heterogenních buněk je malá, dosahuje intervalu 0,2- 1,9% účinnosti. Zlepšení vlastností nabízí začlenění více buněk do tandemu. Přetrvávajícím problémem buněk (i u vícevrstevných struktur) je p-n přechod. Na rozhraní nedochází k účinné interakci mezi elektronem-donorem a elektronem-akceptorem což je limitováno plochým geometrickým rozhraním, takže získáme nízké hodnoty proudu na krátko. Alternativou planárních (diskrétních) vrstev tvořících p-n přechod jsou heteroskupiny rozprostřené v nosném médiu – polymer nebo směs polymerů v objemu. Tyto směsná media se nazývají objemové hetero-přechody (BHJ – bulk hetero-junction). Objemové hetero-přechodové buňky (BHJ) a další, in-

vertované BHJ a tandemové buňky se staly hnací silou výzkumu vytvářející moduly s účinností dosahující více než 11 %. Materiály použité pro donory i akceptory v OSC jsou zpravidla malé molekuly nebo konjugované polymery. Principiálně se kombinují heteropřechody na bázi směsí barvivo-barvivo, vodivý polymer-polymer, barvivo-fullereny a deriváty [1,15].



Obrázek 8 Struktura heteropřechodů [7]

2.4 Polymerní

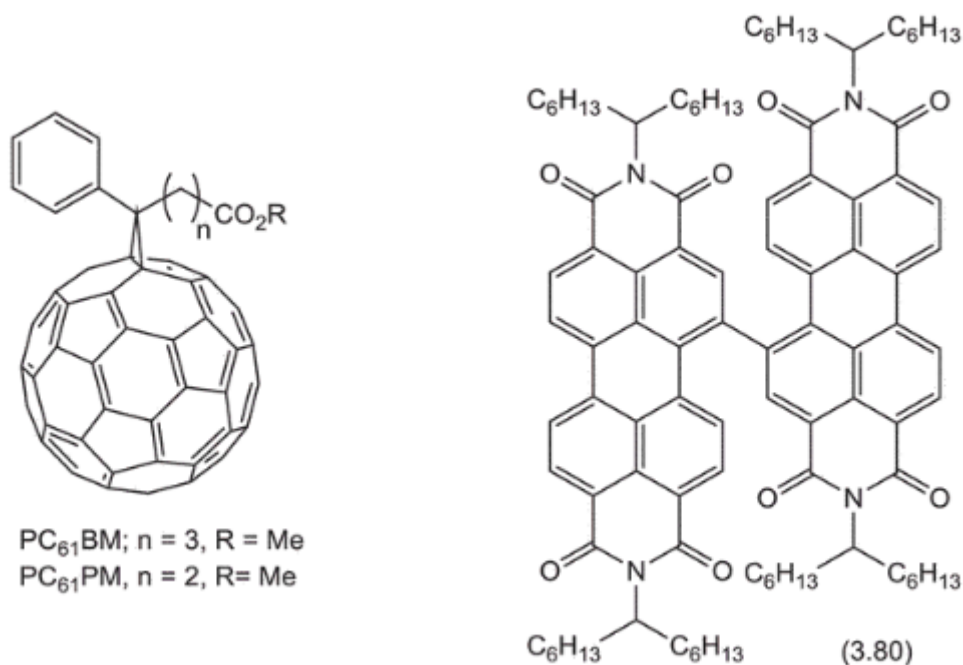
Solární články na bázi polymerních materiálů v současnosti nabízejí největší potenciál a nejširší spektrum uplatnění pro rozsáhlé komerční využití organických PV zařízení. Materiály lze syntetizovat běžně využívanými metodami, hlavní výhodou polymerních buněk je levná a rychlá výroba s využitím vysoce výkonných metod válcového tisku nebo nanášení (potahování) [1,16].

Polymerní buňky jsou dvojího typu:

- malá molekula donor-polymer akceptor
- polymer donor-polymer akceptor

Nejprobádanější polymerní buňky jsou na bázi konjugovaných systémů působících jako donor p-typu a derivát fullerenu jako malá molekula n-typu elektronového akceptoru v BHJ struktuře. Fullereny poskytují rychlou separaci náboje a dlouho difúzní délku excitonu a mají malou energii na strukturální úpravy pro konfigurace potřebné pro přenos elektronu. Z toho plyne, že mají výbornou afinitu elektronů - nejvhodnější akceptory elektronů. Fullereny používané jako akceptory: metylester[6,6]-fenyl C_{61} butyrová kyselina $PC_{61}BM$ (Obrázek 9). $PC_{71}BM$ a jejich deriváty. Fullereny mají však velkou nevýhodu – velmi drahé na syntetizování, obtížné na modifikování a především citlivé na vzduch, což znemožňuje

jejich rozsáhlý potenciál použitelnosti a samotné výroby. Jsou zde vhodné alternativy založené na perylendiimidu a jeho dimerech (Obrázek 10) a dalších ne-fulerenových akceptorů [1,16].

Obrázek 9 Struktura PC₆₁BM [16]

Obrázek 10 dimery perylendiimidu [16]

Výzkumem použitelných polymerů p-typu v organických polymerních buňkách byly definovány podmínky ideálních konjugovaných polymerů [1,17,18].

- dostatečná rozpustnost pro zajištění zpracovatelnosti a mísitelnosti roztoku s materiálem n-typu
- nízká optická propustnost pásma pro široké absorpční spektrum zachycující více sluneční energie
- vysoká pohyblivost děr pro urychlení náboje kvůli snížení rekombinace náboje a sériová odolnost
- vhodné energie HOMO a LUMO pro zajištění velkého posunu U_{oc} (napětí naprázdno) a snížení energetické kompenzace pro disociaci excitonu

2.5 Perovskitové solární články PSC

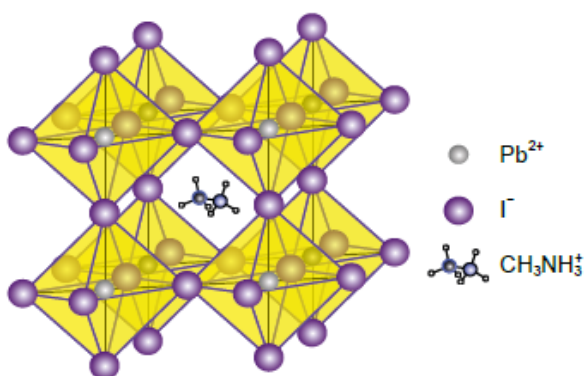
Solární článek má jako aktivní vrstvu strukturou perovskitovou sloučeninu, která leží na podkladu roztoku zpracovaného olovem, cínem nebo halogenidem. Perovskity nabízejí

výhodný potenciál pro komerční použití, protože nabízejí nenáročný zpracování do velkých ploch. Samotná účinnost solárního článku je velmi příznivá. Nabízí flexibilitu, nízkou hmotnost a poloprůhlednost, což významně přidává na hodnotě [1,19].

2.5.1 Perovskit

Perovskit představuje minerál, který krystalickou strukturou odpovídá oxidu vápenato-titaničitému (CaTiO_3). Tento minerál byl objeven v roce 1839 a pojmenován ruským diplomatem a mineralogem Lvem Alexejevičem Perovským. Obecně lze sloučeninu perovskitu vyjádřit ABX_3 , kde A představuje velký vnitřní kation (např. CH_3NH_3^+ , $\text{HN}=\text{CHNH}_3^+$, Cs^+), B malý kation, který je obsažen v krystalové mřížce minerálu (např. Sn^{2+} , Pb^{2+}), a X je halogenidový anion (I^- , Br^- , Cl^-). Pro absorpci slunečního záření používá perovskitovská struktura sloučeniny a stechiometrii. Významným pozitivem struktury perovskitu je dobrý transport nábojů vzniklých fotoexcitací na odpovídající elektrody.[1,19]

Perovskit má schopnost absorbovat světlo a význačnou předností minerálu při tomto jevu je potřeba velmi nízké absorpční vrstvy, které stačí méně než $1 \mu\text{m}$ k zachycení podobného množství záření ve srovnání s jinými solárními články. Tento jev dal za výsledek použití perovskitu jako náhradu za tenkovrstvé solární články. Buňka s krystalovou strukturou perovskitu se obvykle skládá z organické skupiny cínu nebo olova a halogenu se označuje PSC. Princip fungování PSC je podobný principu tenkovrstvého článku. Nejvíce používaným materiálem pro výrobu PSC buněk je metylamonium halogenid olova [1,19].



Obrázek 11 Krystalová struktura perovskitu [19]

V prvních člancích byla struktura PSC založena na citlivém barvivu, kde byla vrstva TiO_2 a organické materiály kladené ve vrstvách. Ve struktuře je perovskit jako absorbent světla a později bude také použit k transportu nosičů náboje [1,19].

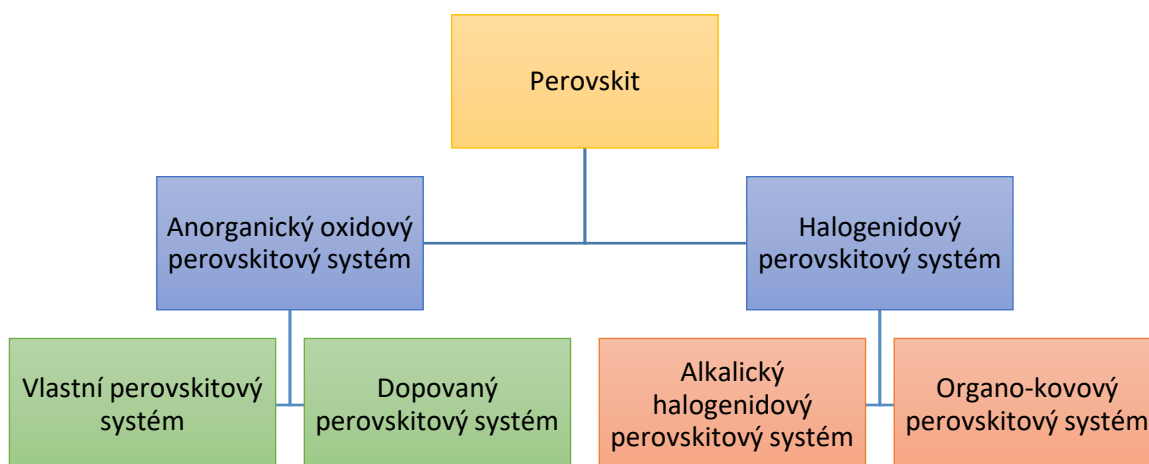
2.5.2 Historie perovskityckých solárních článků

Historicky první solární článek na bázi perovskitového minerálu sahá do roku 2009 (Miyasaka). Článek byl vytvořen architekturou DSSC s tenkou vrstvou perovskitové buňky na oxidu titaničitém (TiO_2). Účinnost panelu byla pouze 3,8% a stabilita článku byla nízká z důvodu přítomnosti kapalného elektrolytu. Při zdokonalování panelu citlivého na barvivo byla v roce 2011 získána účinnost konverze energie 6,5% s využitím technologie kvantových teček pro nanokrystalický materiál. V roce 2012 došlo k objevu a použití sloučeniny spiro-OMeTAD k lepšímu transportu elektronů v pevném stavu (namísto TiO_2) a tím došlo ke zvýšení stability a účinnosti na více než 10% [19].

V dalším roce 2013 byl zaznamenán širší rozvoj ve fotocitlivých i planárních architekturách. Použitím vícestupňových řešení zvyšující efektivitu fotocitlivé architektury dosáhly více než 15% účinnosti technikou vrstvení, které dokázal Burscha. V odvětví planární struktury článku byla konverze vyšší než 15% možná pouze tepelným odpařováním. Pomocí potlačení rekombinace nosičů injektováním do transportní vrstvy pomocí planární architektury se dosáhlo účinnosti 19,1% (Yang Yang z univerzity v Kalifornii). V průběhu dalšího výzkumu se dosahovalo vyšší účinnosti až na 21% účinnost do roku 2015. Konverze záření dosáhla v roce 2016 hodnoty 22,1% [19].

2.5.3 Rozdělení perovskitů

Důvodem pro rozčlenění perovskitů na různé skupiny způsobuje použití určitého oxidického systému, který vykazuje určitý rozdíl ve vlastnostech/struktuře. Uspořádání perovskitů se dělí do dvou rozlehlých kategorií a každá kategorie se dále dělí podle modifikace perovskitového systému [19].



2.5.4 Charakteristické vlastnosti PSC

Perovskitové solární články získávají významné fyzikální chování podle použitého oxidu uvnitř perovskitové struktury. Deformace a poškození materiálu vyskytující se v perovskitovské struktuře se dá shrnout do čtyř mechanismů [19]:

- Naklonění oktaedrických komplexů
- Nesoustředné oktaedrálně koordinované kationty
- Zakřivení oktaedrické mřížky
- Rozcentrování mřížky do 12 koordinátových stran.

Výše uvedené deformace vedou ke strukturálním defektům spojeným s fázovým přechodem, pomalému kinetickému chování, které přispívá ke vzniku pseudoskel a polaronického přenosu. Kovové halogenidové perovskitové solární buňky zaznamenaly rychlý nárůst konverze energie z nízkých 4% v roce 2010 až po účinnost 22% v roce 2016. V důsledku vysokého retenčního koeficientu se předpokládá, že tloušťka potřebná k absorbování solární energie je jen kolem 500 nm. Při výzkumech v červenci 2015 na největších PSC člancích o velikosti nehtu byly zpozorovány komplikace s vysokou vlhkostí, která je rychle znehodnocovala. Halogenidové perovskity ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$, $\text{X} = \text{I}, \text{Cl}, \text{Br}$) s methylamoniovým olovem nabízely přednosti k použití jako koeficient vysoké absorpce záření a vysoké pohyblivosti náboje. Dosažitelnost levných a výkonných solárních buněk na bázi perovskitických struktur nabízí možnost kombinací vhodných příměsí. Strukturu tvořící kostru buňky perovskitů tvoří tzv. mezoporezní oxidy, to jsou oxidy tvořící ve struktuře póry o určité velikosti (2 nm až 50 nm). Výrobní proces PSC s mezoporezními oxidy vyžaduje zpracování při vysoké teplotě kolem 500°C a toto zpracování znemožňuje vytvoření flexibilních článků. Proces výroby orientovaných článků za nízké teploty poskytuje možnost právě vyrábět pružné fotovoltaické buňky [19].

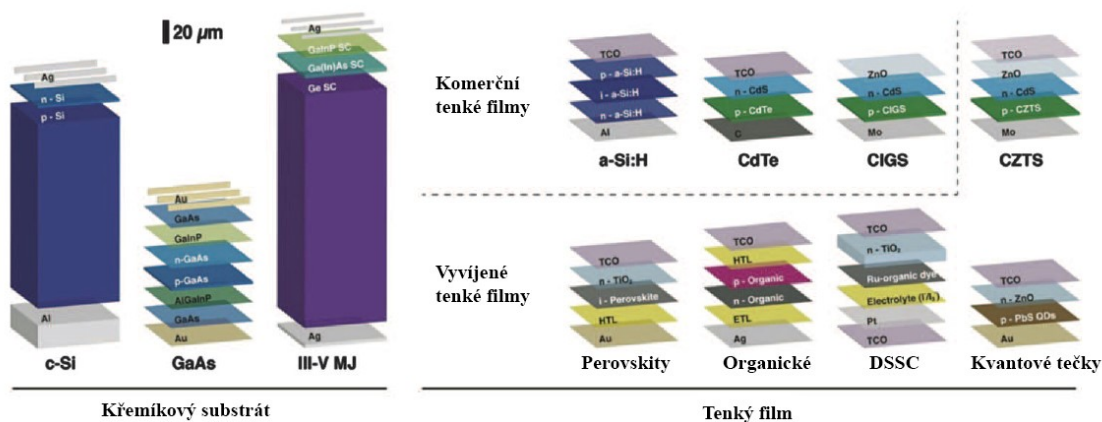
2.6 Obecné srovnání fotovoltaických zařízení

Křemíkové solární články první generace poskytují stabilitu, dlouhou životnost až 25 let s dosaženou účinností až 20 %. Bohužel nevýhodou jsou energeticky nákladné a složité výrobní procesy. Významné rozdíly fotovoltaických zařízení jsou zobrazeny Tabulka 2.

Tabulka 2 Přehled vybraných vlastností solárních článků [4]

Charakteristické vlastnosti	CdTe	CIGS	c-Si	Perovskity
Náklady na suroviny	Nízké	Střední	Nízké	Nízké
Náklady na hotový materiál	Nízké	Vysoké	Vysoké	Nízké
Náklady na výrobu	Střední	Střední	Vysoké	Nízké
Doba návratnosti energie	Střední	Vysoké	Vysoké	Nízké
Náklady na elektřinu	Střední	Vysoké	Vysoké	Nízké
Účinnost	Střední	Střední	Vysoké	Vysoké

Na obrázku níže (Obrázek 12) lze demonstrovat rozdíl struktur, vrstev, jejich tloušťky a lze vyvodit závěry týkající se spotřeby materiálu na výrobu fotovoltaických zařízení. Lze vidět ve srovnání, jak velké množství krystalického křemíku je nutno použít například ve srovnání s technologií tenkých vrstev tj. CdTe, CIGS a nebo s perovskity.



Obrázek 12 Srovnání vrstev a typů fotovoltaických panelů [7]

2.6.1 Výhody a nevýhody polymerních materiálů ve srovnání s perovskity

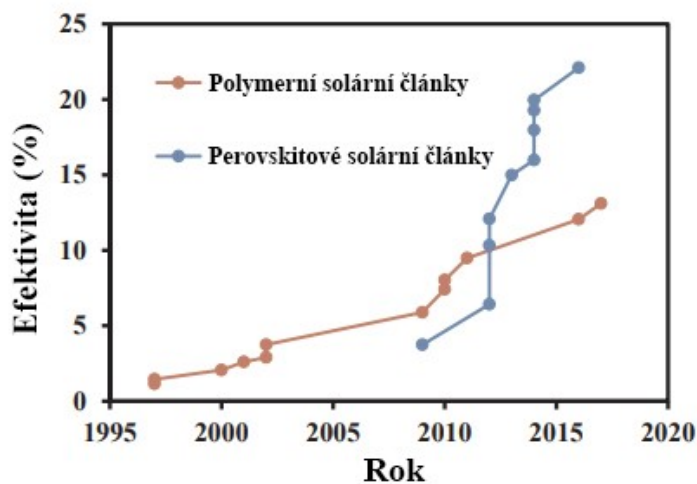
Polymerní i perovskitové solární články nabízejí udržitelné technologie pro fotovoltaický průmysl z hlediska jejich velkých výhod:

- Nízká hmotnost a výroba flexibilního článku
- Nízké výrobní náklady
- Kontinuální výroba – roll-to-roll tisk

V polymerních článcích se dbá na zvýšení trvanlivosti a efektivity použitím nových organických, anorganických, a organicko-anorganických hybridních materiálů. Cílem je vytvoření lepších bez-fullerenových akceptorů s vyšší účinností [23].

Polymerní články jsou omezeny problémy s relativně nízkým výkonem a krátkou životností. Stabilita struktury je nekontrolovatelná. Omezená životnost je připisována degradaci vrstev článku - aktivní, vrstva blokující elektrony a díry a elektrody. Výkon ideálního solárního článku by se měl časem ustálit na určitý výkon [23].

Perovskitové polymerní články na bázi olova mají komplikaci v oblasti toxicity, což řeší výzkum náhradních materiálů. Mezi další nevýhody patří vyšší citlivost na vlhkost [23].



Obrázek 13 Srovnání účinnosti polymerních a perovskitových článků [23]

Tabulka 3 Srovnání fyzikálních vlastností polymerních a perovskitových materiálů [23].

Heteropřechod, Donor:Akceptor	HOMO [eV]	LUMO [eV]	U _{oc} [V]	FF [%]
Perovskitické solární buňky				
CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /PCBM	-5,43	-4,2	0,97	70
CH ₃ NH ₃ PbI ₃ -xCl _x /Y:TiO ₂	-5,30	-4,0	1,13	75
CH ₃ NH ₃ PbI ₃ :IPH	-5,43	...	1,11	79
CH ₃ NH ₃ PbI ₃ :PCBM	-5,43	-4,2	1,09	80
Polymerní solární články				
PFDTBT:PCBM	-5,65	-4,20	1,04	46
PBDTTT-CF/PC70BM	-5,22	-4,30	0,76	66
PCDTBT/PC70BM	-5,40	-4,30	0,88	66
PTB7/PC71BM	-5,15	-3,91	0,74	60
P3HT:ICBA	-5,00	-3,74	0,87	70
PNOz4T:PCBM	-5,48	-3,77	0,96	64
P3HT:TPE-DPP	-4,76	-3,64	1,16	47
P3HT:D4	-5,20	-3,81	1,18	64
P3HT:N7	-5,20	-3,74	1,17	62

Tabulka 4 Srovnání nejdůležitějších paramaterů solárních článků na bázi perovskitů a polymerních solárních článků [23].

Typ zařízení	U _{oc} [V]	J _{sc} [mA.cm ⁻²]	FF [%]	PCE [%]
Perovskitové solární články				
ITO/PEIE/TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ -xCl _x /Spiro/Au	1,13	22,75	75,01	19,3
FTO/TiO ₂ /FAPbI ₃ /PTAA/Au	1,06	24,7	77,5	20,2
FTO/PEDOT:PSS/CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /PCBM/Al	0,92	22,4	82,0	18,0
ITO/C-TiO ₂ /meso-TiO ₂ /RbCsMAFAPbI ₃ /Spiro/Au	1,18	22,8	81,0	21,8
ITO/PTAA/CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /C60/BCP/Cu	1,11	24,0	78,0	20,7
FTO/SnO ₂ /C60-SAM/Cs _{0,2} FA _{0,8} PbI ₃ /Spiro-OMeTAD/Au	1,09	22,2	80,8	19,6

FTO/bl-TiO ₂ /mp-TiO ₂ / Cs _{0,05} (MA _{0,17} FA _{0,83}) _{0,95} Pb(I _{0,83} Br _{0,17}) ₃ /PTAA/Au	1,15	23,5	78,5	21,1
ITO/C-TiO ₂ /meso-TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /P3HT/Au	1,024	23,19	68,0	16,2
Polymerní solární články				
ITO/PFEN-Hg/PTB7:PCBM/MoO ₃ /Al	0,74	17,37	71,2	9,11
ITO/ZnO/2-ME+EA/PTB7:PC71BM/MoO ₃ /Ag	0,71	16,76	73,0	8,69
ITO/FTBTF-N/PTB7:PC71BM/MoO ₃ /Al	0,74	17,30	69,58	9,22
ITO/PEDOT:PSS/PTB7:PCBM/MSAPBS/Al	0,76	19,25	68,08	10,02
ITO/ZnO/PNOz4T:PCBM/MoO _x /Ag	0,96	14,50	64,0	8,90
ITO/PEIE/PTB7:PCBM/MoO ₃ /Ag	0,719	18,58	61,9	8,22
ITO/PEDOT:PSS/PBDT-TS1:PC71BM/Mg/Al	0,79	19,52	70,0	9,67
ITO/ZnO/PBDB-T:ITIC/MoO ₃ /Al	0,899	16,81	74,2	11,21
ITO/ZnO/PffBT4T-C9C13:PC71BM/V2O ₅ /Al	0,78	19,80	73,0	11,30
ITO/PEDOT:PSS/J61:m-ITIC/PDINO/Al	0,90	18,3	70,0	11,77
ITO/ZnO/PBDB-T:IT-M/MoO _x /Al	0,94	17,44	73,5	12,05
ITO/ZnO/PBDB-T:IT-DM/MoO _x /Al	0,97	16,48	70,6	11,29
ITO/ZnO/PBDB-T-SF:IT-4F/MoO ₃ /Al	0,88	20,88	71,3	13,10
ITO/PEDOT:PSS/PTQ10:IDIC/PDINO/Al	0,96	17,81	73,0	12,7

2.7 Polymery pro použití ve fotovoltaice

Prvotní polymerní solární články byly na bázi dvojitých konjugovaných polymerů založených na kyanovaných poly(fenylvinylénových) strukturách (zkr. PPV) v BHJ rozprostření. Dosahovaly nízké efektivity a časem se přešlo na fullerénové polymery taktéž v BHJ. Polymery vhodné pro použití v solárních člancích je možné vhodně modifikovat a přizpůsobit tak finální vlastnosti. Dají se z nich připravit kvalitní tenké vrstvy, které jsou mechanicky odolné a pružné [1].

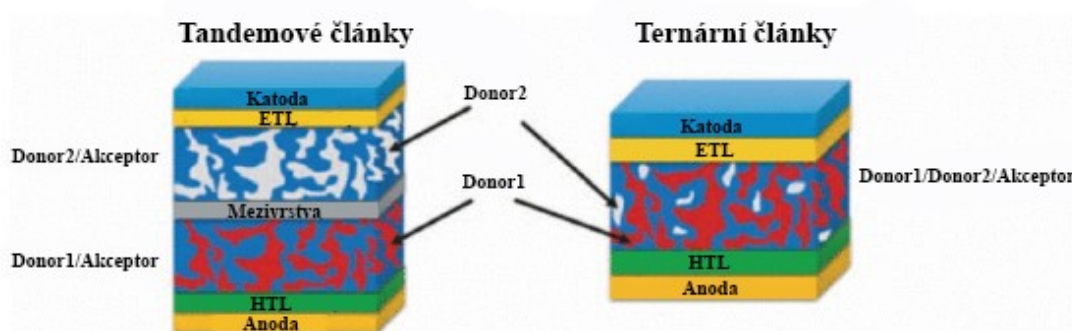
2.7.1 Historický vývoj

Prvními potencionálně vhodnými polymery pro použití se zdály být polythiofeny, nejvýznamnější derivát P3HT (3-hexylový derivát), který nabízel snadné syntetizování, dobrou zpracovatelnost a především vysokou mobilitu nosičů náboje. V další snaze o získání vyšší účinnosti se musel derivát P3HT upravit. Optimalizací morfologie aktivní vrstvy tepelným nebo rozpouštědlovým žiháním s přidavkem fullerenu byl vytvořen P3HT:PC₆₁BM, který vykazoval účinnost 4-5 %. Nedostatky polymerů jako je P3HT, jsou relativně vysoké hodnoty band gapu, což znemožňuje použití v jednoduchých solárních článcích. Optimalizace polythiofenů s lepšími vlastnostmi spočívala dále ve strukturních modifikacích, v kombinování různých postranních řetězců, vložením konjugovaných distančních jednotek a syntézou regionregulárních derivátů [1,16].

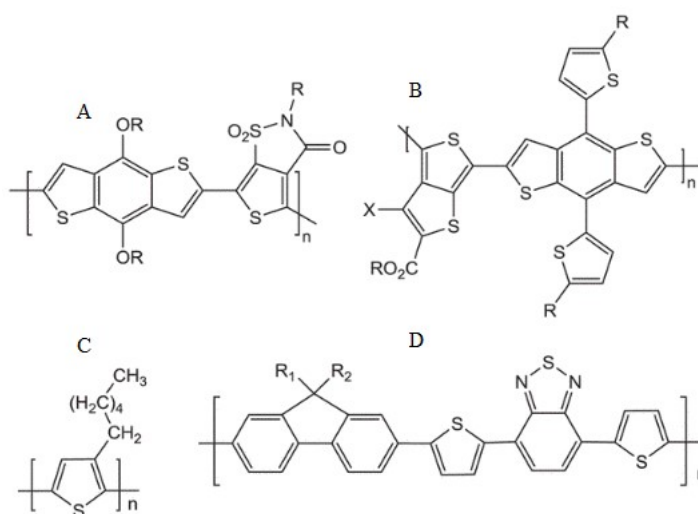
Inovativním a průlomovým krokem v polymerních fotovoltaických článcích bylo použití kopolymerů na bázi donor-akceptor (D-A). Například opakující se jednotky flourenu a benzothiadiazolu známé jako PFDTBT, které vykazují relativně dobrou účinnost v BHJ článcích. Výhodné vlastnosti D-A kopolymerů dospěly k primárnímu použití pro konstruování organických PV článků. Jsou přizpůsobeny pro syntetickou kombinaci začleňující části bohaté na elektrony (donor) a části s nedostatkem elektronů (akceptor). Uzpůsobení D-A kopolymerů tak přímo nabízí produkty s nízkou hodnotou band gapu. Energetické hladiny HOMO-LUMO donor-akceptorových polymerů jsou dány energetickou hladinou HOMO pro donor a hladinou LUMO pro akceptor. Energetické hladiny lze přímo optimalizovat D-A jednotkami polymeru. K dosažení potřebné energetické optimalizace existují postupy, které obsahují kondenzované heterocykly pro usnadnění toku π -elektronů podél polymerního řetězce. Skupiny nebo atomy dokáží přemostit přilehlé kruhy pro udržení vysoké rovinnosti. Tento proces probíhá zavedením jednotky pro odvádění elektronů a tím dochází ke snižování hodnoty band gapu a dvourozměrná konjugace rozšířenou absorpcí a lepší mobilitu děr [1,16,21-24].

Jedno-přechodové BHJ polymerní solární články dosahují v dnešní době účinnosti 10 %. Výjimkou je invertovaná technologie BHJ od společnosti Toshiba, která je v současnosti špičkou s nejvyšší účinností 11 % (2017). Zlepšení nabízejí konstrukce tandemových článků postavených ze dvou a více samostatných strukturních jednotek článku (*Obrázek 14*). Tandemové články jsou složité struktury s vysokými náklady na výrobu. V dnešní době je

již známo 5 možných technologií pro komercializaci. Alternativou je kombinace dvou doplnkových donorových buněk do 1 aktivní vrstvy s akceptorem, čímž se získají ternární buňky (Obrázek 14). Směs PC₇₁BM se dvěma D-A polymery s účinností 9,2 %. Poslední pokroky ternárních buněk poskytují systémy s účinností vyšší než 12 %. V poslední době se lpělo na odbourání fulerenů, což se podařilo jejich náhradou za akceptorové polymery na bázi naftalen diimidu se směsí derivátů, které produkují efektivitu konverze nad 8 % [1,16,21-24].



Obrázek 14 Struktura tandemových a ternárních buněk [1]



Obrázek 15 Chemické vzorce polymerních struktur; A,B – donor-akceptorové polymery, C-struktura P3HT; D- struktura PFDTBT [16]

2.8 Vlastnosti fotovoltaických zařízení

2.8.1 Příprava

Pro zachování flexibility organických článků pro jejich použití a pro jejich velkovýrobu procesem roll-to-roll (R2R) je potřeba ohebných materiálů. Vhodným a nejpoužívanějším materiálem je PET (polyetylentereftlát) potažený vrstvou ITO. V současnosti je průhledným vodičem jako podkladem ITO. Bohužel jeho nedostatkem je omezený přenos viditelného světla, vysoký odpor ($10\text{-}100\ \Omega\text{cm}^2$) a tendence mechanického namáhání, které omezuje flexibilitu při výrobě. Použití indium znemožňuje snížení nákladů organických článků a tak se hledají náhradní materiály. Jednou z alternativních látek je fluorem dopovaný oxid cínu (FTO), který je mnohem levnější, ale nelze jej aplikovat na plastový substrát. Organické vodivé povrchy např. PEDOT:PSS nebo v plynné fázi polymerovaný PEDOT (VPP-PEDOT) s jednostěnnými karbonovými nanotrubicemi a kovovými elektrodami v obrácené geometrii byli testováni jako náhrada ITO. V posledních letech je používána hybridní transparentní elektroda substrátu na bázi PET/Ag-mřížka/PH1000, která nabízí vysokou vodivost a dobrou flexibilitu. Zkratka PH1000 je označení pro vysoce vodivý PEDOT:PSS [25].

2.8.2 Zpracovatelnost

Zpracování se provádí většinou roztokově, jak pro polymery tak pro perovskitové folie. Mezi nejpoužívanější metody patří potahování odstřediváním (spin-coating), tisk (printing), sprejový nátěr (spray coating). Výchozí látky se smísí a rozpustí v rozpouštědle a aplikují na substrát, na kterém vznikne film. Polymerní akceptor a donor se spolu rozpustí ve společném rozpouštědle (např. chlorbenzen) a ukládány jednostupňovým procesem [23].

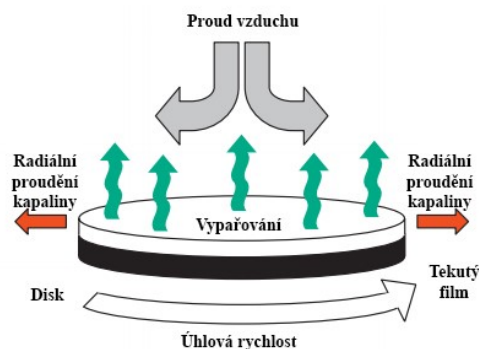
2.8.2.1 Potahování odstřediváním - Spincoating

Mezi technologické postupy formování filmu a nejdůležitější technikou pro vývoj polymerních solárních článků je spincoating. Tato metoda poskytuje vysokou reprodukovatelnost tvorby filmů a má jisté výhody během sušení. Materiál lze zpracovat vytvořením velmi homogenních filmů na velké ploše- průměr substrátu může být až 30 cm. Potahování odstřediváním probíhá nanášením kapaliny na rotující substrát při určitých otáčkách. Otáčející substrát vlivem odstředivé síly odstraní většinu aplikované kapaliny a tím vznikne na

povrchu substrátu velmi tenký film. Tloušťka, morfologie a topografie povrchu z konkrétního materiálu v daném rozpouštědle při dané koncentraci je snadno reprodukovatelná. Tloušťka vrstvy závisí na rychlosti rotace a viskozitě roztoku. Polymerní solární články výrazně ovlivňuje tloušťka filmu, homogenita a koncentrace defektů (díry způsobují zkrat) [26-28].

Vhodným příkladem spincoatingu je směs P3HT-PCBM z roztoku dichlorbenzenu buď pomocí pomalého schnutí, nebo ponechání v prostředí nasyceného rozpouštědlem.

Potahování odstředováním je výborná jako experimentální laboratorní technika, ovšem naskýtá se technologický problém do velkoobjemové výroby. Jedná se o cyklickou techniku, kde se se substráty pracuje individuálně, což není vhodné pro R2R zpracování [26,27].

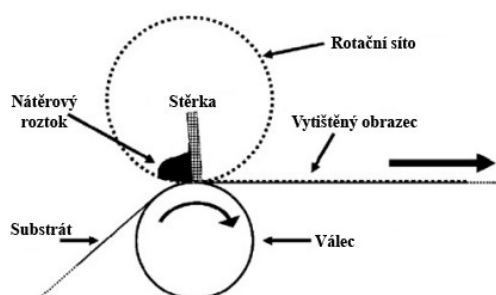


Obrázek 16 Schéma potahování tenkých filmů odstředováním [26]

2.8.2.2 Síto tisk - Screen Printing

Síto tisk je velmi univerzální tisková metoda, která se používá od začátku 20. století. Nabízí plně dvojrozměrné modelování tištěné vrstvy. Při tisku vzniká velká tloušťka mokrého filmu a to je hlavní rozdíl od ostatních technik tisku a potahování. Dále je potřeba relativně vysoké viskozity a nízké těkavosti potahovacího roztoku. Vzorek se získá vyplněním síta emulzí, která je nepropustná pro nátěrový roztok v oblastech kde nemá být tisk. Plocha tištěného vzoru je udržována otevřená (bez emulze). Síto se naplní potahovacím materiálem a přiloží do blízkosti substrátu. Stěrkou se lineárně rozmísťuje přes síto nátěrový roztok otevřenými plochami na substrát a tím se vytvoří obrazec. Přítlačnou silou stěrky, viskozitou roztoku se dá regulovat tloušťka vrstvy [26,27].

Velká tloušťka za mokra, vysoká viskozita a nízká těkavost je omezujícím faktorem a nejvhodnějším polymerem pro tisk je MEHPPV, který má vhodnou reologii (vysoká viskozita při nízké koncentraci). Dále jsou patentované metody na sítotisk P3HT směsí a velkoplošné průmyslové výroby polymerních článků, kde jsou všechny vrstvy zpracovány sítotiskem [26-28].

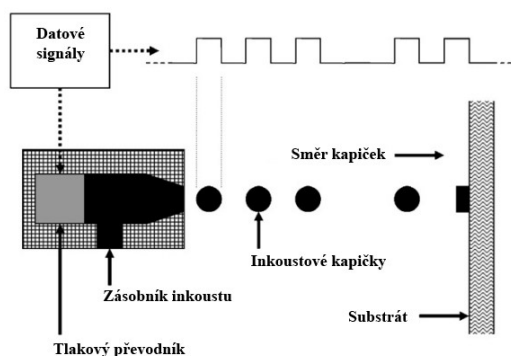


Obrázek 17 Schéma sítotisku [26]

Sítotisk je plně vhodný pro R2R technologie v rotačním sítotisku (Obrázek 17). Pro rozsáhlé tiskové použití je sítotisk pravděpodobně nejvhodnější technologií zpracování polymerních solárních článků. Vhodné sítotiskové materiály a komerčně dostupné jsou transparentní vodiče jako PEDOT:PSS, kovové vodivé pasty – stříbro nebo stříbro hliník ve formě inkoustu. Náklady na zpracování polymerních solárních článků sítotiskem prokázali, že je tato technologie výhodná a rentabilní [26-28].

2.8.2.3 Inkoustový tisk - Ink-jet printing

Inkoustový tisk je z hlediska průmyslového tisku novějším procesem. Inkoustový tisk má poměrně vysoké rozlišení od 300 dpi až 1200 dpi bez komplikací. V porovnání s jinými tiskovými metodami polymerních solárních článků je výhodou digitální zdrojový obraz, který se má tisknout a tím odpadá potřeba složitěho masteru. Nevýhodou se může jevit rychlost tisku tj. plocha potažená v m^2/s , která se odvíjí od počtu dodaných kapiček na povrch, objemem kapiček a koncentrace materiálu na povrchu. V současnosti je otázkou, zda bude inkoustový tisk zařazen do velkoobjemové výroby polymerních solárních článků. Potenciální použití může být pro vytváření složitých vzorů a zařízení s malým obrysem aktivní vrstvy nebo pro tzv. „customizované“ řešení [26-30].



Obrázek 18 Schéma inkoustového tisku [26]

2.8.2.4 Štěrbínový nátěr - Slot-die coating

Potahovaná tekutina se vytlačuje gravitací nebo tlakem otvorem formy na substrát. Toto zpracování nabízí spoustu výhod. Potažení velmi vysokou rychlostí. Výborná kontrola tloušťky vrstvy- snadná regulace čerpaní ku rychlosti linky. Matrice pro nanášení jsou specifické pro určitý nátěrový materiál, což umožňuje rovnoměrnou distribuci potažené tekutiny na základě její reologie [26,27].

2.8.2.5 Sprejový nátěr - Spray coating

Sprejový nátěr tvoří tenký film při nástřiku milionů mikrokapek (vznikne jemný aerosol) na povrch substrátu. Rozstříkovaná kapalina se přivádí do trysky, kde je rozprašována ultrazvukem nebo tlakově i s možností řízení směru pomocí elektrického pole. Postřík, jako kapičky dopadají na substrát náhodně. Tloušťka vrstvy se odvíjí od množství aplikované kapaliny na danou plochu. Sušení postříku je velmi rychlé, dochází k velkému změně povrchu ku objemu kapičky. Technologie nástřiku nabízí menší spotřebu materiálu než potahování odstředováním, ale účinnost této metody je omezená použitím materiálů na nátěr. Výhodou je pouze možnost nátěru libovolných substrátů, kde nele použit standartní nátěr [26,28].

2.8.3 Životnost

Organické solární články jsou velmi omezeny životností. Působením urychlených degradačních testů se dosáhlo životnosti několika tisíců hodin (odpovídá to několika letům v severních zeměpisných šířkách). Tato nežádoucí vlastnost článků omezila rozsah výroby na malé spotřební výrobky. Životnost článku ovlivňují jak vnitřní struktury, tak vnější vlivy.

Vnitřní životnost materiálu určuje chemická stabilita fotovoltaiických donor-akceptorových materiálů při slunečním ozařování, morfologická stabilita aktivní vrstvy donor/akceptor a z vnější strany odolnost vůči kyslíku a vlhkosti v atmosféře. Degradaci článků způsobuje většinou pronikání vody a kyslíku do článku nebo reakce na elektrodách [25].

Podstatou degradace aktivní vrstvy jsou fotochemické a fotolytické reakce vlivem záření za přítomnosti kyslíku a vody. Místa degradace byla zjištěna na kontaktních elektrodách (Al, Ca), které oxidovali a také poškození způsobené vrstvou PEDOT:PSS kvůli svým kyselým vlastnostem. Kvůli složitosti zařízení se zatím nedá jednoznačně stanovit přesný mechanismus degradace. Polymerní zařízení musí být nutně zapouzdřena, což zvyšuje životnost. Nejdelší dosažená životnost zařízení PCPDTBT: CdSe je 180 dnů. Nejdelší dosaženou životností polymerního solárního zařízení je sedm let, které bylo dosaženo u zapouzdřeného PCDTBT/PCBM [23].

2.8.3.1 Degradace struktury

Při výrobě u většiny typů BHJ článků je optimalizovaná morfologie pro výkon zařízení, která má za následek nerovnovážnou „zamrzlou“ strukturu, která je způsobena rychlým odpařením rozpouštědla během nanášení. V průběhu času se může struktura vyvinout do stabilnějšího uspořádání a může tím dojít k poklesu výkonu zařízení. Zlepšení udržitelnosti je vytvoření termodynamicky stabilní morfologie. Toho lze docílit použitím zesítovatelných polymerů, které omezují v průběhu času snižování výkonu zařízení [25].

3 POLYMERNÍ FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY

Použití organických (malých molekul, polymerů) a organicko-anorganických materiálů v optoelektrických zařízeních (PV článcích, diodách) zasáhl velký rozmach díky jejich kladným vlastnostem, mezi které patří nízká hmotnost, nízké náklady a dostupné technologie na výrobu [23].

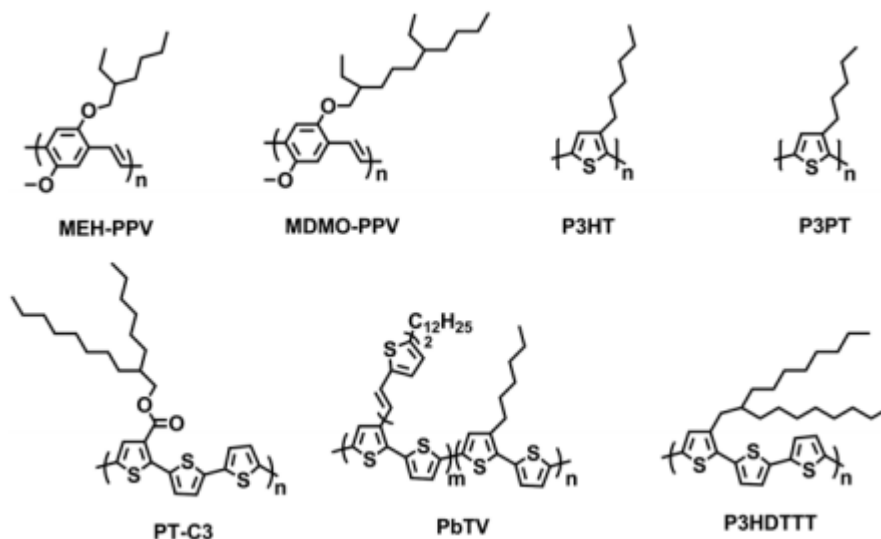
Polymerní solární články (oPSC) jsou v rozsáhlém měřítku zkoumány kvůli jejich příznivým možnostem výroby, vysoké flexibilitě a především nízké hmotnosti ve srovnání s jinými fotovoltaickými technologiemi. V posledních deseti letech byl vývoj upřen v hledání nových inovativních materiálů s aktivní vrstvou s širokými absorpčními pásy, vhodnou úrovní molekulární energie a vysokou mobilitou energetických částic. Zvýšení efektivity oPSC bylo předmětem zkoumání rozhraní, morfologie a v neposlední řadě zdokonalením architektury přístrojů. Výsledkem bylo zaměření se na konjugované fotovoltaické polymery, které mají za následek vyšší efektivitu přeměny energie. Obrovskou hnací silou ve výzkumu a vývoji oPSC jsou nové technologické pokroky a polymerní materiály poskytující vynikající vlastnosti [18].

3.1 Nejstarší typy polymerů pro solární systémy

Prvním vyrobeným polymerním solárním článkem sestaveným strukturou heteropřechodu na bázi (MEH-PPV/C60) vyrobil v roce 1993 Sariciftci s kolektivem. Zařízení se skládalo ze dvou vrstev: MEH-PPV jako donor a C60 jako akceptor. Výkon prvotního článku ničil pouhých 0,04%. Zlepšení výkonu smícháním polymeru MEH-PPV s C60 poskytl solární článek na bázi BHJ sestavený Yu a kolektivem v roce 1995 a byla tak představena obecně struktura BHJ jednoduchým smícháním polymeru a fullerenu jako aktivních materiálů, což je považováno za nejlepší architekturu PSC. V celkovém rozsahu hledání vhodných materiálů byly syntetizovány a aplikovány tisíce donorových polymerů s různými základními řetězci a postranními skupinami. Obecně jdou donorové polymery rozdělit podle struktury do dvou skupin – klasické a nové [13,23,24].

Prvními třemi typy použitého klasického donorového homopolymeru jsou deriváty poly(1,4-fenylenvinylenu) zkráceně (PPV), které měly band gap větší než 2 eV. Dále polythiofenu (PT) s band gapem ≤ 2 eV, což zastupuje široce používanou skupinu polymerů, zejména P3HT s bandgapem 1,9 eV. Polymerní solární články na bázi PT dosahují účinnosti

okolo 13%. Třetí skupinou jsou deriváty polyfluorenu (PF), které poskytují vysokou tepelnou stabilitu. Nevýhodou je velký band gap, což na druhou stranu poskytuje dosažení vysokého U_{OC} vzhledem k nízkému HOMO pásu poly(thienylvinylenu) (PTV) [23,24]. Viz (Obrázek 19).



Obrázek 19: Molekulární struktura standartních donorových polymerů [24]

Mezi klasické donorové polymery patří taky regioregulární poly(3-hexyl)thiofen (P3HT), který se řadí mezi nejrozšířenější PSC polymery.

Fotovoltaický článek na bázi P3HT/PCBM byl podrobně zkoumán mnoha skupinami. Fotovoltaické vlastnosti článku silně závisí na molekulové hmotnosti a regioregularitě P3HT a na způsobu výroby zařízení. Pro použití těchto materiálů s hledáním potenciálu vysoké konverze byly vyvinuty různé strategie pro optimalizaci výkonu. Průlom výkonu PSC modulu P3HT/PCBM byl v roce 2005, kdy byla představena metoda pomalého růstu pro optimalizaci morfologie a byla dosažena účinnost 4,4%, což byla v té době nejvyšší dosažená hodnota v posledním desetiletí výzkumu v oboru PSC modulů. S využitím technologie post-annealing (žihání, nevím jak správně uvést) lze získat účinnost přes 5%. V roce 2009 byl použit nový fullerénový akceptor Indene-C60 bisadduct (ICBA) s vysokou hladinou LUMO, která výrazně zvýšila výkon P3HT. Zvýšení účinnosti nových zařízení na bázi P3HT/ICBA byly modifikovány přidáním rozpouštědel a technologického zpracování zařízení a hodnota účinnosti sahala nad 6%. Obdobné P3HT polymery např. PbTV, poly(3-pentylthiofen) (P3PT), P3HD TTT, PT-C3 atp. byly zkoumány ve výrobních zařízeních

kvůli jejich optimalizované molekulární energii a absorpčním schopnostem. Panely s účinností dosahující 7% představují úzký výčet, klasické donorové polymery zde narážejí na omezení absorpčního rozsahu a molekulární energii [24].

3.2 Nejnovější typy polymerů

3.2.1 Donor-akceptorové systémy

Polymerní články, které jsou konstruovány formou heteropřechodu používají dva typy elektronových akceptorů – organické a anorganické. Organické deriváty jsou deriváty fullerenu: PCBM a indeneC70 bisaddukt (IC70BA), molekuly bez použití fullerenu zahrnují malé molekuly např. ITIC, TPE-DPP, D4, N7 a konjugované polymery kyano-PPV a HP-PDI. Anorganické akceptory zastupují kvantové nanotečky např. CdSe a PbS a nanostruktury oxidů kovů jako ZnO a TiO₂. Rozdíl v organických a anorganických akceptorech je rozdíl v procesu a shromažďování náboje v polymeru/PCBM, polymeru/bezfullerenový derivát, polymer/nanokrystal, které řídí optoelektrické vlastnosti [23].

N7: 6,6'-((9-(heptadekan-9-yl)-9*H*-karbazol-2,7-diyl)bis(thiofen-5,2-diyl))bis(2,5-bis(2-ethylhexyl)-3-(thiofen-2-yl)-2,5-dihydropyrrolo[3,4-*c*]pyrrol-1,4-dion)

4 MODERNÍ TRENDY PRO POUŽITÍ POLYMERŮ VE FOTOVOLTAICE

Optimalizace účinnosti přeměny solárního článku stojí za třemi nejdůležitějšími parametry, prvním je hodnota zkratového proudu J_{SC} , druhý je napětí na prázdno U_{OC} a třetí je faktor plnění FF . V_{oc} je jednou z hlavních fotovoltaických vlastností solárních článků pro stanovení PCE. Od toho se odvíjí potřeba efektivní absorpce slunečního záření, účinná přeměna fotogenerované potenciální energie na fotovoltaické napětí na elektrodách a vysoký faktor plnění. Zkratová proudová hustota udává počet náboje vycházející z článku za jednotku času a plochy a je prokázáno, že souvisí se ziskem generovaných nábojů, pokud je mobilita náboje vyšší než $1025 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Hlavními parametry většiny organických polovodičů ovlivňující J_{SC} jsou funkce absorpčního profilu materiálu, tloušťka filmu, optické účinky, mikrostruktura a účinnost tvorby náboje na D-A heteropřechodu. Energetické hladiny D-A heteropřechodu a bimolekulární rekombinace udávají velikost fotovoltaické energie. Bimolekulární rekombinace má vliv na plnicí faktor a způsobuje parazitický odpor v zařízení (sériový odpor a shuntové dráhy), je silně závislá na hustotě nosiče náboje a energetické poruše a morfologii směsi [23,24].

4.1 Optimální požadavky pro vysoce účinné polymerní donory

Účinnost polymerního solárního článku je definována jako $PCE = \frac{J_{SC} \times V_{OC} \times FF}{P_{in}}$, kde J_{SC} je zkratová proudová hustota, U_{OC} je napětí na prázdno, FF je faktor plnění, P_{in} je vstupní výkon slunečního záření. Pro získání maximálního PCE je nutná optimalizace všech parametrů. U_{OC} v PSC modulech se může aproximovat rozdílem hladin HOMO a LUMO akceptoru na heteropřechodu polymerních zařízení i při různých faktorech. Hodnota faktoru plnění udává rozložení aktivní vrstvy a přenos náboje napříč objemem. Zkratová proudová hustota J_{SC} je součinem spektrální absorpční šířky a intenzity absorpce aktivní vrstvy. Fotoelektrickou konverzi PSC článku lze rozdělit do pěti fyzikálních procesů: 1) Absorpce světla a generace excitonu, 2) difúze excitonu na rozhraní donoru a akceptoru, 3) separace náboje, 4) transport náboje, 5) shromáždění náboje. Z hlediska fyzikálního procesu zařízení jsou důležitými faktory při vývoji vysoce výkonných donorových polymerů kladeny nároky na jeho rozpustnost, absorpci, energetickou hladinu, pohyblivost náboje a samotnou morfologii materiálu. [24]

4.2 Rozpustnost

Rozpustnost je významným faktorem ovlivňující jak už samotné zpracování polymeru tak i výkon PSC článku. Dobrá zpracovatelnost roztoku může významně ovlivňovat základní vlastnosti při tvoření filmu a žádoucí vytváření pronikající sítě což je užitečné pro dosažení vysoké hodnoty zkratové proudové hustoty J_{SC} , ale především pro nejvyšší hodnotu faktoru plnění FF. Stupeň rozpustnosti daného polymeru závisí na několika strukturních faktorech – stupeň polymerace, délka řetězců aromatických skupin, polarita připojených substituentů, pevnost hlavního řetězce, regioregularity polymeru a intermolekulárních interakcích. Rozpustnost se dá zařadit jako primární parametr pro vytváření nových struktur konjugovaných polymerů. [24]

4.3 Absorpční spektrum

Velkým a hlavním omezením výkonu PSC článku je malé využití dopadajícího slunečního záření. Konjugované polymerní materiály mají velmi úzké rozpětí absorpčního pásma v porovnání s šířkou spektra dopadajícího slunečního záření. Cílem dosažení co největší J_{SC} nového polymerního materiálu je pojmout co největší rozsah odpovídající slunečnímu záření. Schopnost donorového polymeru absorbovat dopadající foton určuje šířka a intenzita absorpce s co nejvyšším koeficientem extinkce ϵ . Optimální hodnota extinkce by se měla pohybovat řádově 10^5 cm^{-1} , aby se maximalizovala absorpce dopadajících fotonů. Obecně se parametr extinkce filmu nebo roztoku vyhodnocuje pro předpověď účinnosti nových fotovoltaických polymerních materiálů. Zvýšení J_{SC} se dá získat zúžením šířky bandgapu, což způsobí, že polymerní materiál absorbuje větší objem slunečního záření. Aplikace zužování bandgapu přispělo k hledání a vývoji speciálních úzkopásmových (LBG) polymerů. [24]

4.4 Energetická hladina

Pro vyjádření napětí na prázdno U_{OC} polymerního článku je stanovena empirická rovnice pro jednoduchý výpočet: $U_{OC} = \frac{(E_{HOMO(D)} - E_{LUMO(A)} - 0,3 \text{ eV})}{e}$, kde e je elementární náboj, $E_{HOMO(D)}$ energie donoru, $E_{LUMO(A)}$ energie akceptoru a 0,3 eV je empirická hodnota pro efektivní separaci náboje.

Nejnižší neobsazený molekulární orbital LUMO [6,6]-fenyl-C₆₁(nebo -C₇₁)-mety-lesteru kyseliny máselné (PCBM) je stanoven přibližně -3,9 eV. Pro překonání vazebné energie excitonu ($\approx 0,3$ eV), by měla být energie LUMO (ne homo?) polymerů -3,6 eV. Od roku 2006 je znám vztah pro obecnou korelaci band gapu hladiny HOMO s výkonem zařízení (VOC, PCE) fotovoltaických polymerů, které mohou být demonstrativní pro budoucí výběr a návrh nových vysoce výkonných donorových polymerů s účinností okolo 10%. Vhodné snížení hladiny HOMO a snížení ztrát napětí může být řešením k dosažení vysokých U_{oc} a J_{sc} . [24]

4.5 Pohyblivost

Další parametry ovlivňující J_{sc} jsou mobilita nosiče náboje, intermolekulární interakce a molekulární rozložení polymeru (packing). Pohyblivost děr (μ_h) je opět významným způsobem ovlivňuje fotovoltaické vlastnosti polymeru. Důležité je mít polymerní materiál (směs?) nastavený na rovnoměrný transport děr i elektronů. Náležitou váhu má faktor plnění (FF), který do značné míry určuje poměr mobility děr a elektronů směsi donoru a akceptoru. Typická pohyblivost elektronů PCBM je $\approx 10^{-4}$ cm²V⁻¹s⁻¹, minimální hodnota mobility μ_h pro výkonné donorové polymery je 10^{-4} cm²V⁻¹s⁻¹. [24]

4.6 Morfologie

Mimo vnitřní vlastnosti fotovoltaických polymerů jako band gap, hladiny molekulární energie, mají morfologické vlastnosti polymeru/PCBM směsi včetně krystalinity, velikosti domén, čistoty domén zásadní význam fotovoltaických vlastností polymerních materiálů. Na rozložení objemové a nanoúrovňové morfologii aktivní vrstvy silně závisí přenos náboje, transport i absorpce. Optimalizování morfologie je rozhodujícím parametrem účinnosti zařízení ve formování objemových heteropřechodů (BHJ) polymerních buněk. Řešením dosažení ideální morfologie mohou být filmy směsi (blend films) zpracovány tepelným žiháním nebo procesem žiháním rozpouštědlem. Pro vysoce výkonné směsi polymeru fullere-
renu je morfologie účinně ovlivňována za použití smíšených rozpouštědlových systémů. Jako příklad lze uvést poly(diketopyr poly(diketopyrrolopyrrole-terthiophene) PDPP3T, který má malý band gap. V novém ternárním systému jsou použita tři funkční rozpouštědla, která přispívají k získání účinnosti až 6,71%. Výčtem všech výše uvedených parametrů lze

konstatovat, že pro získání optimálního donorového polymeru je zapotřebí široká a vysoká absorpce, vysoká mobilita děr, vhodná morfologie jakož i vhodná energetická hladina. [24]

ZÁVĚR

Cílem práce bylo zpracovat obecný přehled používaných materiálů pro fotovoltaické aplikace se zaměřením na nejnovější trendy, tzn. polymerní a perovskitové struktury. Bylo třeba analyzovat důležité technické parametry pro zvolení výchozích materiálů – band gap, schopnost vést a separovat náboj, napětí na prázdno, zkratový proud, faktor plnění a účinnost. Dále je potřeba vyhodnotit technologie zpracování a životnost jak z hlediska vnitřní struktury použitých materiálů, který je spojen s vývojem struktury působením času, ale taky působením okolního prostředí.

Z hlediska komerčního zastoupení fotovoltaických systémů jsou pozitiva na straně vyrobených zařízení na bázi modifikovaného křemíku a materiálů na bázi tenkých vrstev. Tyto materiály stále nabízejí v rámci aplikovatelnosti nejlepší a nejdůležitější faktory pro rozsáhlé velkoplošné použití. Těmito faktory jsou jasně daná a minimálně se měnící účinnost vlivem stáří materiálu/panelu. Účinnost by mohla být tedy označena jako „dobrá, průměrná, uspokojivá“ a druhým faktorem je samotná životnost panelu. V porovnání s moderními trendy inovativních struktur mají mnohonásobně delší životnost, která může být i více než 20 let. Bohužel jsou tyto aspekty znevýhodňovány energetickými nároky a vysokými náklady na výrobu, kdy je potřeba složitých technologií na zpracování a taky spotřeba primárního materiálu, což ve výsledku zvyšuje neúměrně rentabilitu.

Organické polymerní materiály oplývají vhodnými vlastnostmi z hlediska dostupných a modifikovatelných látek pro výrobu. Materiály jsou velmi levné, dostupné, rychle a snadno zpracovatelné a především mohou být flexibilní. Rychlost zpracování polymerních materiálů technologií roll-to-roll je jednou z největších výhod. Kontinuální zpracování výrazně snižuje cenu, snižuje množství spotřebovaného aktivního materiálu, minimalizuje odpadní materiál, nabízí vysoké množství zpracovaných hotových panelů různé velikosti. Špatnými vlastnostmi je nízká účinnost a životnost. Polymerní solární články nabízejí poměrně nízkou účinnost, která se pohybuje okolo 10 %, predikce maximální účinnosti při precizní přípravě a volbě ideálních materiálů je okolo 26 %. Když to porovnáme s první generací solárních článků, tak by mohla být účinnost téměř stejná. Životnost článku se v průběhu zapojení výrazně snižuje. Ovlivnění výkonu a životnosti článku ovlivňuje i samotné sluneční záření dopadající na materiál a expozice okolní vlhkosti a prostředí, od kterého se

musí izolovat zapouzdřením. Polymerní solární články tedy nabízejí použití jako levné, kompatibilní, flexibilní solární články, které jsou vhodné pouze pro krátkodobé použití v malých zařízeních.

Perovskitové krystalické struktury jsou materiály v poslední době velmi atraktivní a rychle se rozvíjející v oblasti solární energetiky. Největším kladem je vysoká absorpce záření velmi tenkou aktivní vrstvou materiálu (500 nm). Konverze slunečního záření je poměrně vysoká, účinnost přesahuje 20%, navíc predikce maximální účinnosti perovskitových článků je okolo 46 %. Perovskitové solární články mají velmi podobné vlastnosti jako polymerní solární články jak z hlediska různorodosti a modifikace výchozích materiálů tak zpracování stejnými technologiemi.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1.] BAMFIELD, P. AND M. HUTCHINGS. Chromic Phenomena - Technological Applications of Colour Chemistry (3rd Edition) [online]. Royal Society of Chemistry, 2018 [Citováno 5.5 2019]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCPTACC01/chromic-phenomena-technological/chromic-phenomena-technological>.
- [2.] JACOBSON, M. Z. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy Environ. Sci.* [Type of Work]. 2009, vol. 2, no. 2 [Citováno 9.5 2019], stránky 148-173. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1039/b809990c> . ISSN 1754-5692
- [3.] List of photovoltaic power stations - Wikipedia. [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_photovoltaic_power_stations
- [4.] ZHENG, H. 2.1.1 The Sun and its Energy [online]. Elsevier, 2017 [citováno 12.5 2019]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CX8FW3/solar-energy-desalination/sun-its-energy>.
- [5.] JOHNSON, F. S. THE SOLAR CONSTANT. *Journal of Meteorology* [Type of Work]. 1954, vol. 11, no. 6 [Citováno 6.6 2019], stránky 431-439. Dostupné z: <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%281954%29011%3C0431%3ATSC%3E2.0.CO%3B2> .
- [6.] WILLSON, R. C., S. GULKIS, M. JANSSEN, H. S. HUDSON, et al. Observations of solar irradiance variability. *Science* [Type of Work]. 1981, vol. 211, no. 4483 [Citováno 6.5 2019], stránky 700-702. ISSN 0036-8075 (Print)
- [7.] AGRAWAL, B. AND G. N. TIWARI. Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems - For Sustainable Developments [online]. Royal Society of Chemistry, 2011 [Citováno 5.5 2019]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBIPT-SFSJ/building-integrated-photovoltaic/building-integrated-photovoltaic> .
- [8.] KRAUS, Ivo a Jaroslav FIALA. Elementární fyzika pevných látek. 2. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016, 320 s. ISBN 978-80-01-05942-5.

- [9.] SØRENSEN, B. 4. The Energy Conversion Processes [online]. Elsevier, 2017 [Citováno 3.5 2019]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011FKRI1/renewable-energy-physics/renewable--energy-conversion> .
- [10.] ZHAO, B., C. WANG AND X. ZHANG. 2.2 Photovoltaic Cells [online]. John Wiley & Sons, 2018 [Citováno 3.5 2019]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011I5BI5/grid-integrated-standalone/photovoltaic-cells> .
- [11.] GOETZBERGER, A. AND V. U. HOFFMANN. Photovoltaic Solar Energy Generation [online]. Springer Berlin Heidelberg, 2005 [Citováno 6.5 2019]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=UuUFCAAAQBAJ>
- [12.] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. 2., dopl. vyd. Praha: Ilsa, 2010, 165 s. ISBN 978-80-904311-5-7
- [13.] QAZI, S. 2. Fundamentals of Standalone Photovoltaic Systems [online]. Elsevier, 2017 [Citováno 9.5 2019]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt01130911/standalone-photovoltaic/fundamentals-standalone>
- [14.] New CIGS Solar Cell Record -- 21.7% CIGS Cell Conversion Efficiency Achieved At ZSW | CleanTechnica. Cleantech News — #1 In EV, Solar, Wind, Tesla News | CleanTechnica [online]. Copyright © 2018 [cit. 06.05.2019]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2014/09/27/new-cigs-solar-cell-record-21-7-cigs-cell-conversion-efficiency-achieved-zsw/>
- [15.] KUMARESAN, P., S. VEGIRAJU, Y. EZHUMALAI, S. YAU, et al. Fused-Thiophene Based Materials for Organic Photovoltaics and Dye-Sensitized Solar Cells. *Polymers* [Type of Work]. 2014, vol. 6, no. 10 [Citováno 7.5 2019], stránky 2645-2669. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.3390/polym6102645> . ISSN 2073-4360.
- [16.] LIU, C., K. WANG, X. GONG AND A. J. HEEGER. Low bandgap semiconducting polymers for polymeric photovoltaics. *Chemical Society Reviews* [Type of Work]. 2016, vol. 45, no. 17 [citováno 12.5 2019], stránky 4825-4846. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1039/c5cs00650c>. ISSN 0306-0012, 1460-4744

- [17.] DOU, L., J. YOU, Z. HONG, Z. XU, et al. 25th Anniversary Article: A Decade of Organic/Polymeric Photovoltaic Research. *Advanced Materials* [Type of Work]. 2013, vol. 25, no. 46 [citováno 12.5 2019], stránky 6642-6671. Dostupné z:<http://dx.doi.org/10.1002/adma.201302563>. ISSN 0935-9648.
- [18.] WU, J.-S., S.-W. CHENG, Y.-J. CHENG AND C.-S. HSU. Donor–acceptor conjugated polymers based on multifused ladder-type arenes for organic solar cells. *Chemical Society Reviews* [Type of Work]. 2015, vol. 44, no. 5 [citováno 12.5 2019], stránky 1113-1154. Dostupné z:<http://dx.doi.org/10.1039/c4cs00250d>. ISSN 0306-0012, 1460-4744.
- [19.] THOMAS, S. AND A. THANKAPPAN. 1.3 Perovskite [online]. Elsevier, 2018 [Citováno 3.5 2019]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011PVDBD/perovskite-photovoltaics/perovskite> .
- [20.] WANG, H.-J., C.-P. CHEN AND R.-J. JENG. Polythiophenes Comprising Conjugated Pendants for Polymer Solar Cells: A Review. *Materials* [Type of Work]. 2014, vol. 7, no. 4 [Citováno 12.5 2019], stránka 2411-2439. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.3390/ma7042411>. ISSN 1996-1944.
- [21.] SVENSSON, M., F. ZHANG, S. C. VEENSTRA, W. J. H. VERHEES, et al. High-Performance Polymer Solar Cells of an Alternating Polyfluorene Copolymer and a Fullerene Derivative. *Advanced Materials* [Type of Work]. 2003, vol. 15, no. 12 [Citováno 12.5 2019], pp. 988-991. Available from Internet:<<http://dx.doi.org/10.1002/adma.200304150>>. ISSN 0935-9648, 1521-4095.
- [22.] ZHANG, Z. G. AND J. WANG. Structures and properties of conjugated Donor–Acceptor copolymers for solar cell applications. *Journal of Materials Chemistry* [Type of Work]. 2012, vol. 22, no. 10 [Citováno 12.5 2019], pp. 4178. Available from Internet:<<http://dx.doi.org/10.1039/c2jm14951f>>. ISSN 0959-9428, 1364-5501.
- [23.] ARABPOUR ROGHABADI, F., N. AHMADI, V. AHMADI, A. DI CARLO, et al. Bulk heterojunction polymer solar cell and perovskite solar cell: Concepts, materials, current status, and opto-electronic properties. *Solar Energy* [Type of Work]. 2018, vol. 173, [Citováno 5.5 2019], stránky 407-424. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18307229> . ISSN 0038-092X
- [24.] HUANG, F., H.-L. YIP AND Y. CAO. Polymer Photovoltaics - Materials, Physics, and Device Engineering [online]. Royal Society of Chemistry, 2016 [Citováno 30.4

- 2019]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kppPMPDE01/polymer-photovoltaics/polymer-photovoltaics>
- [25.] KALOGIROU, S. A. 5. Production Issues [online]. Elsevier, 2018 [Citováno 3.5 2019]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CX6G91/mcevoys-handbook-photovoltaics/production-issues> .
- [26.] KREBS, F. C. Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [Type of Work]. 2009, vol. 93, no. 4 [Citováno 12.5 2019], stránky 394-412. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024808003486>>. ISSN 0927-0248.
- [27.] KUDRA, T. A review of “MODERN COATING AND DRYING TECHNOLOGY” Edward Cohen and Edgar Gutoff VCH Publishers, Inc New York NY 1992, 310 p. *Drying Technology* [Type of Work]. 1994, vol. 12, no. 3 [Citováno 9.5 2019], stránky. 705-706. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1080/07373939408959988> . ISSN 0737-3937
- [28.] GREENER, J., G. PEARSON AND M. CAKMAK. 11. Flexible Solar Cells [online]. John Wiley & Sons, 2018 [Citováno 3.5 2019]. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011N7DK4/roll-roll-manufacturing/flexible-solar-cells>.
- [29.] KREBS, F. C., M. JØRGENSEN, K. NORRMAN, O. HAGEMANN, et al. A complete process for production of flexible large area polymer solar cells entirely using screen printing—First public demonstration. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [Type of Work]. 2009, vol. 93, no. 4 [Citováno 9.5 2019], stránky. 422-441. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2008.12.001> . ISSN 0927-0248.
- [30.] AERNOUTS, T., T. ALEKSANDROV, C. GIROTTO, J. GENOE, et al. Polymer based organic solar cells using ink-jet printed active layers. *Astránkylied Physics Letters* [Type of Work]. 2008, vol. 92, no. 3 [Citováno 8.5 2019], stránky. 033306. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2833185> . ISSN 0003-6951, 1077-3118.

- [31.] HOTH, C. N., S. A. CHOULIS, P. SCHILINSKY AND C. J. BRABEC. High Photovoltaic Performance of Inkjet Printed Polymer:Fullerene Blends. *Advanced Materials* [Type of Work]. 2007, vol. 19, no. 22 [Citováno 9.5 2019], stránky. 3973-3978. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.200700911> . ISSN 0935-9648, 1521-4095.
- [32.] TYAGI, V. V., N. A. A. RAHIM, N. A. RAHIM AND J. A. L. SELVARAJ. Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Type of Work]. 2013, vol. 20, [Citováno 11.4 2019], stránky 443-461. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112005291>. ISSN 1364-0321.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Akceptor
a-Si	Amorfní křemík
BHJ	Bulk heterojunction – objemový heteropřechod
cd	Kandela
CdTe	Telurid kadmia
CIGS	Cín-Indium-Galium-diSelenid
CIS	Struktura
c-Si	Krystalický křemík
D	Donor
DSSC	Senzibilizované solární články
ETL	Elektron Transport Layer – vrstva pro transport elektronu
eV	elektronvolt
FF	Faktor plnění
Ge	Germanium
G _{sc}	Solární konstanta
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital – nejvyšší obsazený molekulový orbital
HSC	Hybridní solární články
HTL	Hole Transport Layer – vrstva pro transport děr
In	Indium
ITO	Oxid india
ITIC	3,9-bis(2-metylen-(3-(1,1-dikyanometylen)-indanon))-5,5,11,11-tetrakis(4-hexylfenyl)-dithieno[2,3-d:2',3'-d']-s-indaceno[1,2-b:5,6-b']dithiofen

J _{sc}	Zkratová proudová hustota
K	Kelvin
LUMO	Lowest Unoccupied Molecular Orbital – nejnižší neobsazený molekulový orbital
m	Metr
MEH-PPV/C60	Poly[2-metoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-fenylenvinylen]/Buckminsterfulleren
MDMO-PPV	Poly[2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloxy)-1,4-fenylenvinylen]
oPSC	Výkon zařízení
OSC	Organické polymerní články
P3-C3	Senzibilní barvivo
P3HDTTT	Derivát PPV
P3HT	Poly(3-hexylthiofen-2,5-diyl)
P3PT	Poly(3-pentylthiofen)
PC ₆₁ BM	Metylester kyseliny fenyl-C ₆₁ -máselné
PC ₇₁ BM	Metylester kyseliny fenyl-C ₇₁ -máselné
PCBM	Metylester kyseliny máselné
PCE	Výkon zařízení
PEDOT:PPS	Poly(3,4-etylendioxythiofen)polystyren sulfonát
PET	Polyetylentereftalát
PFDTBT	Poly[2,7-(9,9-bis-(2-oktyl)fluoren]-alt-[5,5-(4,7-di-2-thienyl-2,1,3-benzothiadiazol)]
PPV	Poly(fenylenvinylen)
PV	Fotovoltaický článek
R2R	Roll-to-roll technologie

Se	Selen
TiO ₂	Oxid titaničitý
U _{oc}	Napětí naprázdno
W	Watt
μm	Mikroometr

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Šíření slunečního záření vesmírem [4]</i>	11
<i>Obrázek 2 Schéma stanovení solární konstanty [4]</i>	12
<i>Obrázek 3 Schéma přenosu elektrického náboje [9]</i>	14
<i>Obrázek 4 Schéma technologických příprav fotovoltaických materiálů [32]</i>	16
<i>Obrázek 5 Struktura vrstev krystalického solárního článku [1]</i>	18
<i>Obrázek 6 Struktura solárních článků na bázi tenkých vrstev včetně účinnosti [1]</i> ...	20
<i>Obrázek 7 Schéma separace náboje [1]</i>	22
<i>Obrázek 8 Struktura heteropřechodů [7]</i>	23
<i>Obrázek 9 Struktura PC₆₁BM [16]</i>	24
<i>Obrázek 10 dimery perylendiimidu [16]</i>	24
<i>Obrázek 11 Krystalová struktura perovskitu [19]</i>	25
<i>Obrázek 12 Srovnání vrstev a typů fotovoltaických panelů [7]</i>	28
<i>Obrázek 13 Srovnání účinnosti polymerních a perovskitových článků [23]</i>	29
<i>Obrázek 14 Struktura tandemových a ternárních buněk [1]</i>	33
<i>Obrázek 15 Chemické vzorce polymerních struktur; A,B – donor-akceptorové polymery, C-struktura P3HT; D- struktura PFDTBT [16]</i>	33
<i>Obrázek 16 Schéma potahování tenkých filmů odstřed'ováním [26]</i>	35
<i>Obrázek 17 Schéma sítotisku [26]</i>	36
<i>Obrázek 18 Schéma inkoustového tisku [26]</i>	37
<i>Obrázek 19: Molekulární struktura standartních donorových polymerů [24]</i>	40

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Přehled šířky band gapů různých materiálů [1].....</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 2 Přehled vybraných vlastností solárních článků [4].....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 3 Srovnání fyzikálních vlastností polymerních a perovskitových materiálů [23].....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 4 Srovnání nejdůležitějších paramaterů solárních článků na bázi perovskitu a polymerních solárních článků [23].</i>	<i>30</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Přehled Nejúčinnějších vyzkoumaných solárních článků

Dostupné z:

<https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies-190416.pdf>

„Tento graf je použit s laskavým svolením National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO“

