



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ORGANICKÉ POLOVODIČE

ORGANIC SEMICONDUCTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

IVAN TEBICH

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV BOUŠEK, CSc.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Ivan Tebich

ID: 81679

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Organické polovodiče

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií tenkovrstvých struktur organických polovodičů a sestavte přehled jejich aplikací. Seznamte se s metodami vyšetřování optoelektronických vlastností organických polovodičů. Provedte charakterizaci vlastností dodaných vzorků organických polovodičů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] WEITER, M. : "Latest achievements in organic semiconductors for future electronic devices". In Proceedings of IMAPS International Conference. Brno: IMAPS, 2006. s. XV (6 s.) ISBN: 80-214-3246-2.
[2] HADZIIOANNOU, G., MALLIARAS, G.: " Semiconducting Polymers", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2007

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 3.6.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Práce pojednává o využití fotovoltaického jevu k výrobě elektrické energie prostřednictvím solárních článků. Zkoumá princip fotovoltaického jevu v organických strukturách. Dále uvádí základní druhy konstrukcí organických solárních článků a hodnotí jejich vlastnosti. V experimentální části je práce zaměřena na charakterizaci tenkovrstvých struktur z fotovodivých organických materiálů.

Abstract:

My final thesis treats of usage photovoltaic phenomenon to production electric energy by solar cells. It inquires into this phenomenon in organic structures. Further it mentions basic types of constructions organic solar cells and evaluates their properties. In experimental part the thesis is focused on characterization thin-film structures made out of photoconductive organic materials.

Klíčová slova:

Organické polovodiče, solární články, organické solární články, fotovoltaický jev, voltampérová charakteristika, fluorescence, fotovodivost

Keywords:

Organic semiconductors, solar cells, organic solar cells, photovoltaic effect, current-voltage characteristic, fluorescence, photoconductivity

Bibliografická citace mé práce:

TEBICH, I. *Organické polovodiče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 31. 5. 2008

.....

PODĚKOVÁNÍ:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jaroslavu Bouškovi, CSc. za zorganizování spolupráce s Fakultou chemickou VUT Brno a za pomoc při dokončování práce. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Martinu Weiterovi, Ph.D. (FCH VUT Brno) za vedení a konzultace při tvorbě mé bakalářské práce. Na závěr bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Šedinovi za pomoc a odbornou asistenci v průběhu praktických experimentů.

OBSAH

ÚVOD.....	- 6 -
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	- 7 -
1.1 TEORIE FOTOVOLTAICKÉHO JEVU	- 7 -
1.1.1 Historie objevu fotovoltaického jevu	- 7 -
1.1.2 Princip vzniku fotovoltaického jevu.....	- 7 -
1.1.3 Inverzní fotovoltaický jev.....	- 9 -
1.1.4 Princip křemíkového fotovoltaického článku.....	- 10 -
1.2 VYUŽITÍ FOTOVOLTAICKÉHO JEVU U ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ.....	- 13 -
1.2.1 Solární články z organických materiálů - úvod	- 13 -
1.2.2 Princip solárních článků z organických materiálů (polymerů).....	- 14 -
1.2.3 Druhy struktur polymerových solárních článků	- 15 -
1.2.3.1 Dye - sensitized (založené na bázi org. barviva) solární články	- 15 -
1.2.3.2 Dvouvrstvé solární články	- 16 -
1.2.3.3 Objemové heteropřechodové články	- 17 -
1.2.3.4 Tandemová struktura polymerového článku	- 19 -
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	- 21 -
2.1 MATERIÁLY	- 21 -
2.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	- 24 -
2.2.1 Klasická a inverzní struktura - porovnání.....	- 25 -
2.2.2 Příprava podložky s vrstvou ITO	- 27 -
2.2.3 Příprava roztoků	- 27 -
2.2.4 Nanášení tenkých vrstev	- 28 -
2.2.5 Nanášení hliníkové elektrody	- 28 -
2.3 MĚŘÍCÍ PRACOVNÍ MÍSTO PRO URČENÍ V-A CHARAKTERISTIKY	- 28 -
2.4 METODY CHARAKTERIZACE PROTOTYPOVÝCH STRUKTUR FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	- 30 -
2.4.1 UV-VIS spektroskopie	- 30 -
2.4.2 Fotoluminiscenční spektroskopie	- 31 -
2.4.3 Voltampérová charakteristika organického fotocitlivého polymeru	- 32 -
2.4.3.1 Vyhodnocení fotovodivosti z V-A charakteristiky.....	- 33 -
2.5 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	- 34 -
2.5.1 UV-VIS spektroskopie	- 34 -
2.5.2 Fluorescence	- 36 -
2.5.3 Voltampérová charakteristika organického polovodivého polymeru.....	- 37 -
2.5.3.1 Rozdělení vzorků.....	- 38 -
2.5.3.2 Porovnání V-A charakteristik Fc ₁₋₂ s P3HT	- 44 -
2.5.4 Vyhodnocení fotovodivosti	- 46 -
3 ZÁVĚR.....	- 49 -
4 POUŽITÁ LITERATURA	- 50 -
5 SEZNAM SYMBOLŮ	- 51 -

ÚVOD

V současné době vyráběné solární články na bázi anorganických materiálů (hlavně křemík) jsou příliš drahé z důvodu obtížné sériové výroby a jejich nynější použití je možné jen díky dotacím. Z tohoto důvodu se začaly hledat jiné materiály, které by byly vhodné pro velkokapacitní sériovou výrobu. Tento požadavek nejlépe splňují organické materiály a právě u některých sloučenin byla objevena schopnost přeměny světelné energie na elektrickou energii (fotovoltaický efekt). Tyto organické materiály v sobě spojují elektrické chování typické pro anorganické polovodiče s vlastnostmi polymerů umožňující snadné a méně nákladné zpracování. Ve srovnání s existujícími anorganickými články, mají organické solární články nízkou konverzní účinnost (méně než 5%), což je způsobeno nedostatečnou generací nosičů náboje (elektrony a díry), jejich transportem a kvantovou účinností. Je zde proto snaha hledat nové materiály, zkoumat jejich vlastnosti a optimalizovat technologie tak, aby bylo dosaženo vyšší účinnosti a byla možná aplikace studovaných materiálů v solárních článcích.

V teoretické části této práce jsem provedl rešerši na téma fotovoltaický jev a jeho využití v solárních článcích. Dále je zde uvedeno několik základních konstrukcí organických solárních článků a jejich specifické výhody i nevýhody.

V experimentální části jsem se zaměřil na charakterizaci tenkovrstvých struktur organických polovodivých materiálů.

Cíle experimentální části:

1. Seznámit se s metodou přípravy struktur prototypových solárních článků z tenkých vrstev vybraných polymerních polovodivých materiálů
2. Charakterizovat připravené tenkovrstvé struktury vybranými metodami s důrazem na fotovodivost a charakterizaci účinnosti přeměny světelné energie na energii elektrickou.
3. Získané výsledky vyhodnotit z hlediska potenciálního využití studovaných materiálů v solárních článcích.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 TEORIE FOTOVOLTAICKÉHO JEVU

1.1.1 Historie objevu fotovoltaického jevu

Fotovoltaický jev objevil v roce 1839 francouzský fyzik Alexandre-Edmond Becquerel. První fotovoltaický článek však byl sestaven až v roce 1883 Charlesem Frittssem, který potáhl polovodivý selen velmi tenkou vrstvou zlata. Jeho zařízení mělo pouze jednoprocenní účinnost. V roce 1946 si nechal patentovat konstrukci solární článku Russel Ohl. Současná podoba solárních článků se zrodila v roce 1954 v Bell Laboratories. Při experimentech s dopovaným křemíkem byla objevena jeho vysoká citlivost na osvětlení. Výsledkem byla realizace fotovoltaického článku s účinností kolem šesti procent. Význam fotovoltaiky se projevil zvláště v kosmonautice, kde fotovoltaika tvoří prakticky jediný zdroj elektrické energie pro umělé družice země. Prvou družicí s fotovoltaickými články byla sovětská družice Sputnik 3, vypuštěná na oběžnou dráhu 15. května 1957[2]. Na začátku sedmdesátých let se fotovoltaické články dostaly z laboratoří a z kosmického prostoru i na zem, z velké části díky ropným společnostem těžícím v Mexickém zálivu. Na automatických ropných plošinách je elektrická energie potřebná pro osvětlení (maják) a pro ochranu proti korozi. Fotovoltaické články zcela vytlačily do té doby používané primární články elektrické energie. Fyzikální podstatu fotovoltaického jevu vysvětlil Albert Einstein, který za svůj objev dostal roku 1921 Nobelovu cenu [11].

1.1.2 Princip vzniku fotovoltaického jevu

Bylo zjištěno, že při osvětlení některých látek (především kovy) se tyto látky nabíjí. Např. zinek osvětlený ultrafialovým světlem se nabije kladně. Při ozáření vzorku spektrem elektromagnetického vlnění byly přítomny pohlceny hlavně krátké vlnové délky (blíže ultrafialové části spektra). Delší vlny obsažené ve spektru se přeměnily na teplo.

Pro krátké vlnové délky došlo k emisi vodivostních elektronů z kovu. Počet těchto elektronů rostl s intenzitou vlnění. Jev byl ale pozorován jen pro krátké vlnové délky, pro velké délky vln jev nenastal při libovolné intenzitě. Pro krátké vlnové délky se se zvýšením intenzity dopadajícího záření zvyšoval počet uvolněných elektronů, avšak intenzita neovlivnila energii těchto elektronů.

Podle představ klasické fyziky by elektronům měla být předána kinetická energie dopadajícího elektromagnetického vlnění. Energie elektromagnetických vln souvisí s

intenzitou záření, to znamená, že energie excitovaných elektronů by měla záviset na intenzitě dopadajícího záření. Experimenty však ukázaly, že kinetická energie vyzařovaných elektronů je závislá na frekvenci a nikoliv na intenzitě dopadajícího záření.

Experimentálně bylo zjištěno, že pokud frekvence dopadající záření klesne pod tzv. mezní (prahový) kmitočet f_0 , fotoemise se neobjevuje. Mezní frekvence je charakteristickou vlastností každé látky. Pokud je frekvence v dopadajícího záření vyšší než mezní frekvence f_0 , mají fotoelektrony energii v rozmezí od nuly do určité maximální hodnoty E_{\max} . Maximální hodnota energie E_{\max} je lineární funkcí frekvence a platí pro ni vztah:

$$E_{\max} = h(f - f_0) \quad (1)$$

kde h je Planckova konstanta

Podivné chování světla při interakci s vlněním vysvětlil až Einstein v roce 1905 s využitím poznatků právě se rodící kvantové teorie. Byla to především Planckem prezentovaná teorie, že elektromagnetické vlnění předává svou energii při interakcích s jinými částicemi nespojitě, po takzvaných kvantech. Velikost kvanta energie závisí na frekvenci (vlnové délce) elektromagnetického záření, přičemž platí:

$$E = hf = \hbar\omega \quad (2)$$

h je Planckova konstanta

f je frekvence elektromagnetického záření

ω je úhlová rychlost

\hbar je redukovaná Planckova konstanta

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (3)$$

Pro toto kvantum energie, přenášené elektromagnetickým zářením o vysokých frekvencích, se vžil název foton.

Světlo při dopadu předává energii elektronům na povrchu zkoumané látky. Je-li vlnová délka λ světla dostatečně malá, pak frekvence f a tedy i energie ($c = f\lambda$), kterou záření po dopadu předá elektronu, může dosáhnout dostatečné hodnoty pro uvolnění tohoto elektronu z vazby v obalu atomu. Hodnota této energie potřebné k uvolnění elektronu se označuje jako ionizační energie. Velikost ionizační energie, kterou potřebují elektrony k uvolnění z látky, se někdy označuje jako *fotoelektrická bariéra*. Předáním dostatečné energie elektronům je

možné tuto bariéru překonat. Tato energie předávaná elektronům bývá také označována jako *výstupní práce*. Minimální frekvence, při níž dopadající fotony předávají elektronům energii potřebnou k překonání této bariéry, se označuje jako *prahová frekvence*.

Naopak při velkých vlnových délkách λ a tedy nízkých frekvencích nedojde k uvolnění elektronu z obalu atomu, protože energie přenášená *kvantem (fotonem)* takového záření bude menší než zmiňovaná tzv. *výstupní práce*. Navíc elektromagnetická záření nižších frekvencí se chovají, spíše než jako proud částic, jako vlnění.

Pokud je energie předaná elektronu větší než je potřeba k jeho uvolnění (tedy větší než výstupní práce), pak fotoelektronu po opuštění látky část energie zůstane. Tato energie má formu kinetické energie elektronu.

Z těchto úvah získal Einstein *rovnici fotoelektrického jevu*:

$$hf = hf_0 + E_{\max} \quad (4)$$

kde hf je energie dopadajícího fotonu,

hf_0 je minimální energie potřebná k uvolnění elektronu (tedy výstupní práce)

E_{\max} je maximální možná energie uvolněného elektronu.

Z uvedené rovnice je vidět, že energie uvolněného elektronu závisí pouze na frekvenci dopadajícího záření, a nikoliv na intenzitě tohoto záření. Je také vidět, že bez ohledu na intenzitu dopadajícího záření nemůže při $f < f_0$ dojít k uvolnění elektronů, tzn., nedochází k fotoefektu. Výstupní práce elektronu je závislá na tom, jak hluboko se elektron v látce nachází, proto leží energie fotoelektronů v rozmezí od nuly do E_{\max} . Ačkoliv intenzita dopadajícího záření nemá vliv na energii uvolněných elektronů, ovlivňuje jejich počet. Při větší intenzitě záření je také počet uvolněných elektronů vyšší. [5]

1.1.3 Inverzní fotovoltaický jev

Pokud na látku dopadají elektrony, které způsobují vyzařování fotonů, mluví se o inverzním (obráceném) fotoelektrickém jevu.

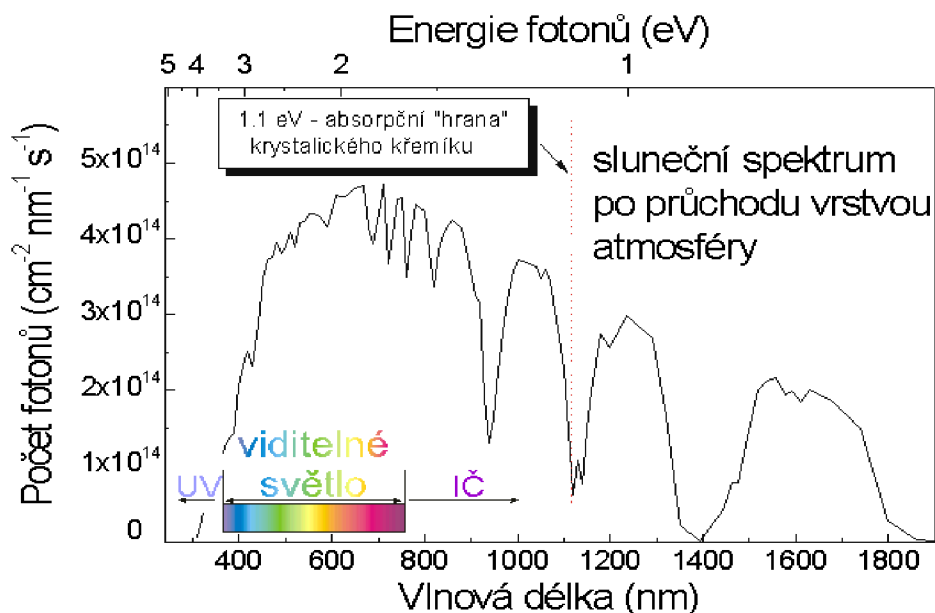
Energie pohybujícího se elektronu je obvykle podstatně větší než potenciálová hráz, proto lze hodnotu výstupní práce zanedbat proti kinetické energii elektronu E_k , tzn.

$$E_k = h.f \quad (5)$$

Při dopadu elektronu na kov dochází obvykle ke ztrátě jeho kinetické energie postupně, tzn. několika srážkami s částicemi hmoty, kdy postupně uvolňuje svoji energii ve formě tepelného záření. Některé elektrony však všechnu svoji energii ztratí při jednom nárazu. V takovém případě se všechna kinetická energie elektronu může přeměnit v částici elektromagnetického záření, tzn. ve foton. Tímto způsobem je možné získat například fotony rentgenového záření. [5]

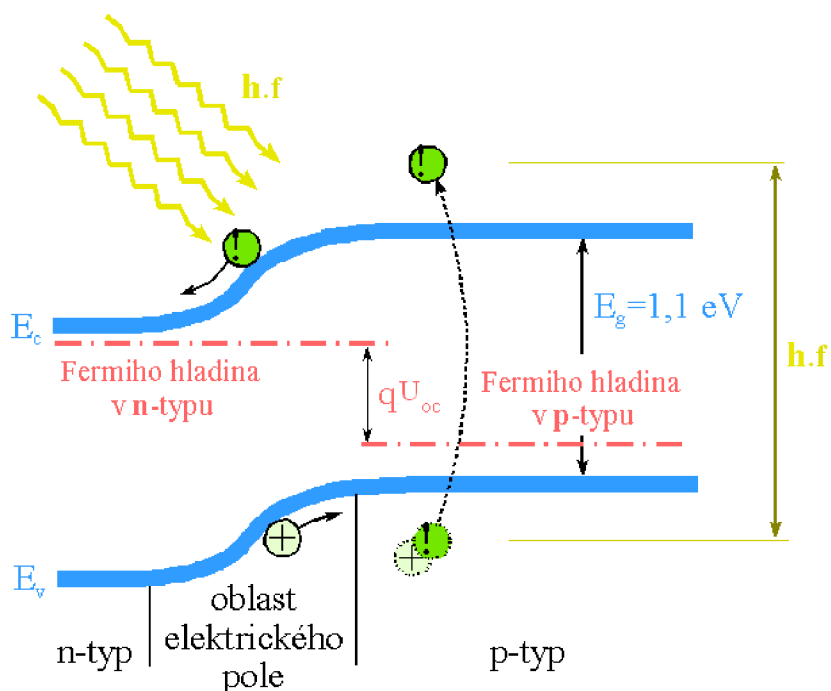
1.1.4 Princip křemíkového fotovoltaického článku

Křemík má stejnou krystalovou strukturu jako diamant. Na rozdíl od diamantu však není průhledný, absorbuje světlo o kratší vlnové délce než zhruba 1 mikrometr (fotony o větší energii než zhruba 1,1 elektronvoltů), to jest část infračerveného, celé viditelné a ultrafialové spektrum. Absorbuje tedy větší část celého slunečního spektra. To je znázorněno na obrázku 1, kde vidíme spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou, spolu s absorpční hranou křemíku. Dopadá-li na křemík foton o energii menší než 1,1 elektronvoltů, projde křemíkem a není absorbován. Když je jeho energie větší než 1,1 elektronvoltů (tato energie odpovídá šířce zakázaného pásu a tedy absorpční hraně křemíku) pak je tento foton absorbován a v polovodiči vznikne jeden volný elektron a jedna volná díra. Energetický rozdíl mezi energií dopadajícího fotonu a šířkou zakázaného pásu se přeměňuje na teplo a je hlavním důvodem, že teoretická účinnost jednoduchého článku v planární konfiguraci příliš nepřesáhne 30%.



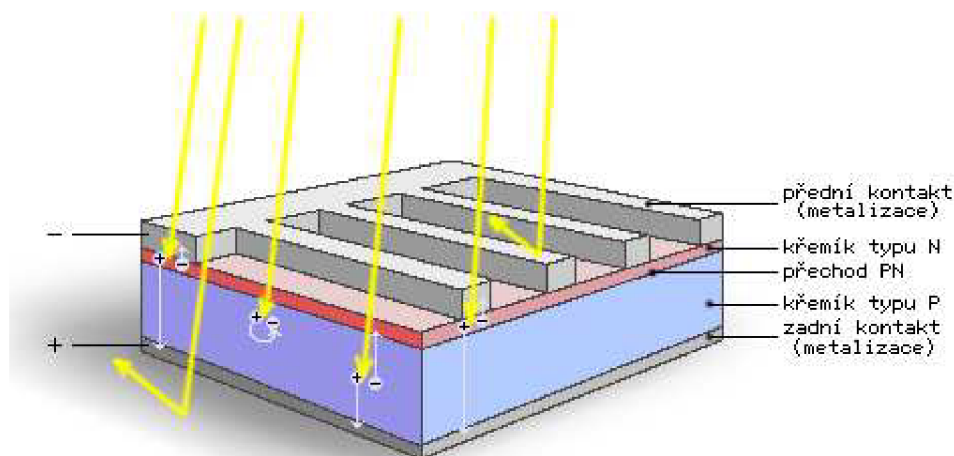
Obr. 1 Sluneční spektrum po průchodu atmosférou pod úhlem 48° od normály. Znárodnění absorpční "hrany" křemíku[11].

Aby sluneční článek sloužil jako zdroj proudu, musí v něm nastat rozdělení elektronů a děr. Sluneční článek není homogenní polovodič, ale skládá se z části s elektronovou vodivostí (materiál typu n, například křemík s příměsí fosforu) a části s děrovou vodivostí (materiál typu p, například křemík s příměsí boru).



Obr. 2 Pásový model p-n přechodu krystalického křemíku za osvětlení (energie fotonů $h.f$) s vyznačením hran vodivostního (E_c) a valenčního (E_v) pásu, šířky zakázaného pásu ($E_g = E_c - E_v$), Fermiho hladin v polovodiči typu n i p a oblasti existence vnitřního elektrického pole (prostorového náboje). U_{oc} je napětí vzniklé následkem osvětlení p-n přechodu[3].

Skutečná struktura článku je vidět na obrázku 3. Cílem je zmenšení všech možných ztrát (reflexe světla, rekombinace nosičů náboje) a realizace co největší účinnosti přeměny sluneční energie v energii elektrickou. Teoretická účinnost v případě článku z krystalického křemíku je okolo 30%. Vyšší teoretické účinnosti lze dosáhnout u článků složených z různých materiálů s různou absorpční hranou nebo koncentrací světla, která zvyšuje (logaritmičtě) získané napětí [3].



Obr. 3 Schématické zobrazení struktury křemíkového článku. Povrch je opatřen texturou vytvořenou leptáním pro snížení reflexe a pasivován oxidem nebo nitridem křemíku. Zadní Al kontakt slouží také jako zpětný reflektor. [4]

Absorpce monokrystalického křemíku nad absorpční hranou roste pomalu, tedy pro dosažení dostatečného absorbování je potřeba dostatečná tloušťka článku z čehož vyplývají různé problémy např. malá pružnost a velká spotřeba materiálu. Monokrystalický křemík je také velmi náročný na výrobu.

Naproti tomu např. amorfni křemík má absorpční hranu na rozhraní infračervené a červené oblasti, většinu infračerveného světla tedy propouští, ale absorpce nad absorpční hranou prudce roste (následkem změny výběrových pravidel pro optické přechody se změnou uspořádání látky) a postačí vrstva tenčí než tisícina milimetru ($1 \mu\text{m}$) k úplné absorpci. Současně se dá tento materiál připravit při nízké teplotě, obvykle 200°C , a tedy nanášet na levné podložky, jako jsou sklo či některé plastické hmoty nebo kovová fólie. To vše umožní snížit cenu slunečního článku. Amorfni křemík se však obtížněji dotuje a při dopadu slunečního světla v něm vznikají defekty, které vytváří nežádoucí rekombinační centra. Díky tomu se snižuje postupem času jeho účinnost.

Na výrobu anorganických fotovoltaických článků se používá mnoho dalších materiálů. Jsou to polovodiče typu chalkogenidů (t. j. sloučeniny síry, selenu či teluru) prvků druhé skupiny periodické tabulky (kadmium) nebo kombinace prvků první (měď) a třetí skupiny (indium, galium). Nejznámějším takovým materiálem je CdTe nebo CuInSe_2 . Starší systém fotovoltaického článku $n\text{-typ CdS} / p\text{-typ CdTe}$ je z důvodu toxicity kadmia nahrazován v současnosti nejperspektivnějším systémem CuInSe_2 , s případným dalším přidáním galia a síry [4].

1.2 VYUŽITÍ FOTOVOLTAICKÉHO JEVU U ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ

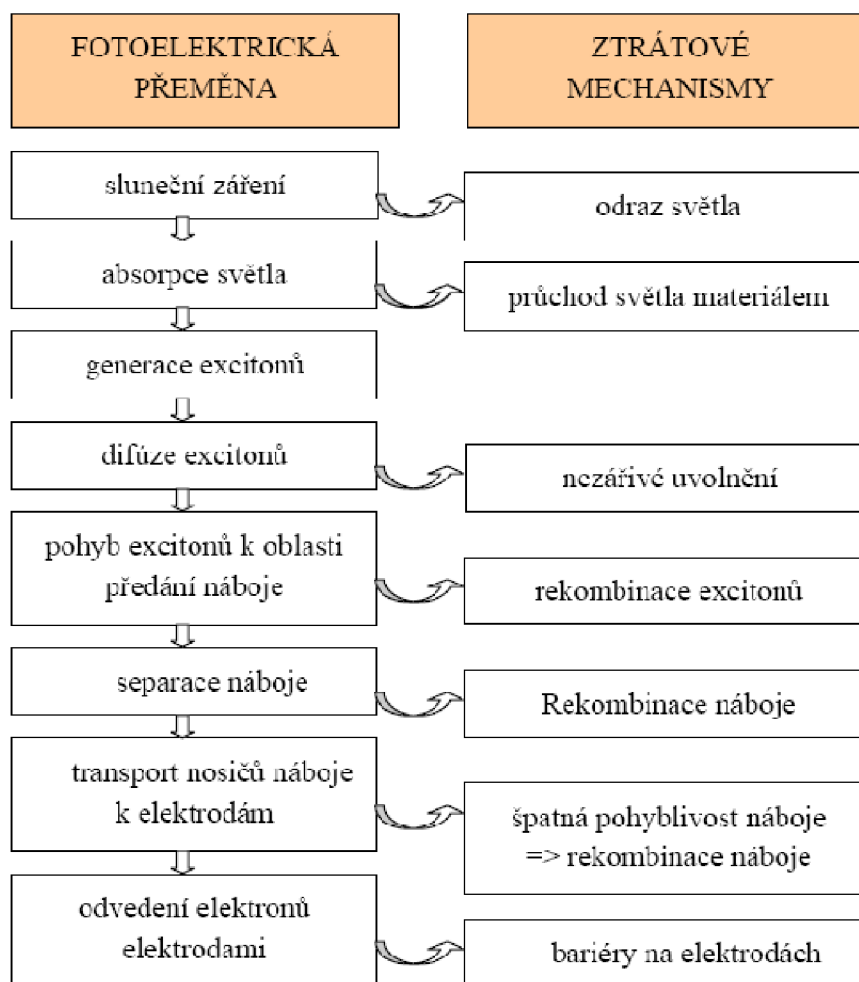
1.2.1 Solární články z organických materiálů - úvod

Mezi novinky ve vývoji slunečních panelů patří polymerové/plastové solární články. Ty zatím mají malou účinnost, což ale kompenzují velmi nízkými výrobní náklady. To by v budoucnu měl být hlavní důvod k tomu, aby došlo k jejich většímu rozšíření.

Solární články a panely stále bojují se stejnými problémy a těmi jsou hmotnost, účinnost převodu světelné energie na elektrickou a cena. Všechny polovodičové křemíkové solární články jsou totiž již z principu dost náročné na výrobu a tedy i drahé. To by ani tak nevadilo, kdyby měly velkou účinnost, tedy vysokou hodnotu výkonu v poměru k ceně. To bohužel však stále neplatí. Například monokrystalické články, které mají účinnost největší (20 až 30%), jsou ale zároveň také nejtěžší a není možné na základě jejich struktury vyrábět je jako ohebné. Tím jsou méně praktické a často to velmi omezuje jejich použití.

Díky těmto nežádoucím vlastnostem se začalo uvažovat o použití jiných materiálů, například na bázi organických sloučenin, u jejichž některých druhů byly objeveny polovodičové vlastnosti. Organické fotovoltaické materiály (Organic photovoltaic materials) jsou potenciálně velmi levné, protože jejich organické molekuly jsou rozpustitelné a mohou tak být tisknuty nebo nastříkány. Tyto techniky je možné použít i při nízkých výrobních teplotách, což znamená, že mohou být "tištěny" na pružný plastický substrát. Byla již prakticky vyzkoušena metoda vakuového nastříkání polymerů pro levnou výrobu polymerových solárních článků. Polymerové solární články tedy nabízejí výhody v podobě jednoduchého řešení zpracování a mechanické flexibility, ale stále potřebují další výzkum pro potřeby zvýšení účinnosti a životnosti. Polymerové články v sobě uplatňují 3 následující principy, jejichž funkci je však v budoucnu nutné dále vylepšit [6]:

- pohlcení (absorpci) světla
- oddělení fotoindukovaného náboje
- přenos a sběr světlem generovaných nosičů náboje



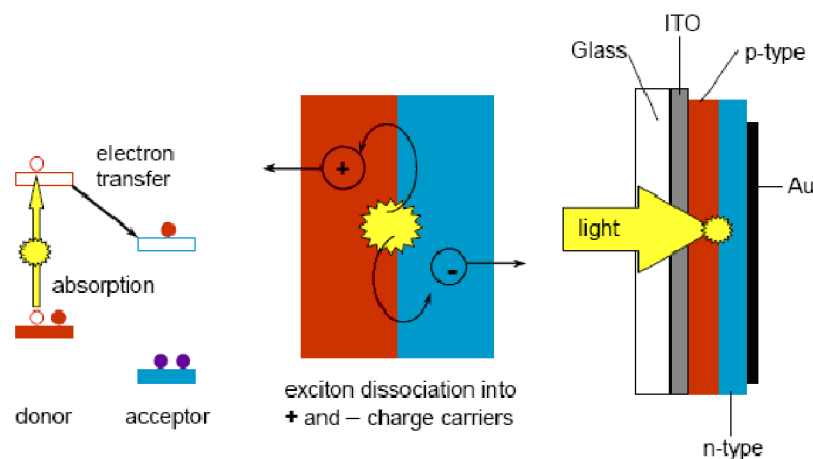
Obr. 4 Přehled kroků fotoelektrické konverze a ztrát, ke kterým při ní dochází [9].

1.2.2 Princip solárních článků z organických materiálů (polymerů)

Ke konverzi energie dochází v okolí heteropřechodů, což je rozhraní polovodivých materiálů s různými šířkami zakázaného pásu, kde jednotlivé materiály na sebe navazují na molekulární úrovni. Heteropřechody se již často používají v optoelektronických součástkách a vysokofrekvenčních tranzistorech.

Nejjednodušší struktura, kterou lze použít pro organické solární články je planární heterostruktura. Tenká vrstva aktivního polymeru (donoru) a tenká vrstva akceptorového polymeru, jsou uzavřeny mezi dva kontakty (elektrody) v planární konfiguraci. Uvolněné páry elektron-díra (excitony) vytvořené v donorové oblasti dopadem fotonu, mohou difundovat k přechodu. Zde dochází k rozdělení páru, protože díry zůstávají za přechodem a elektrony procházejí do akceptorové oblasti. Planární struktura je však neefektivní, protože

nosiče náboje v typickém organickém polovodiči mají difúzní délku pouze 3-10 nm. Proto musí být planární struktura velmi tenká, aby nosiče náboje "dodifundovaly" až ke kontaktům. Čím je ale článek tenší, tím méně světla stačí absorbovat [6].



Obr. 5 Schematický obrázek principu činnosti organického fotočlánku [1].

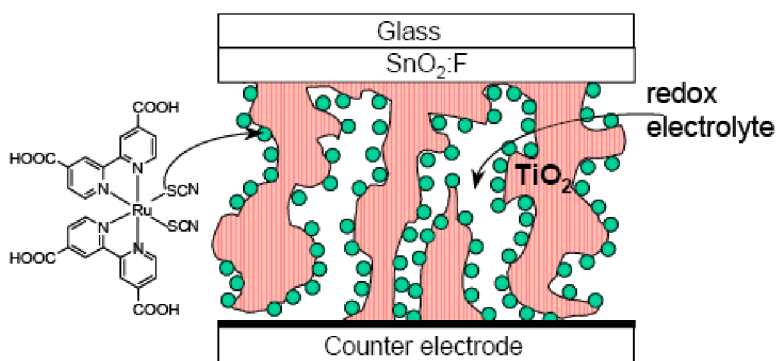
Osvětlování donoru (červeně) skrz průhlednou elektrodu (ITO) má za následek fotoexcitovaný stav donoru, ve kterém je elektron přemístěn z nejvyšší obsazené molekulové orbity (HOMO) k nejnižší neobsazené molekulové orbitě (LUMO) donoru. Následně je vybuzený elektron přemístěn do LUMO akceptoru (modrý), což má za následek přebytečný elektron na straně akceptoru a opuštěné díry v donoru. Fotovoltaicky generované náboje jsou pak přepravované a soustředěny v protilehlých elektrodách[1].

1.2.3 Druhy struktur polymerových solárních článků

1.2.3.1 Dye - sensitized (založené na bázi org. barviva) solární články

V solárním článku založeném na bázi organického barviva, je barvivo nanášeno na povrchu anorganického širokopásmového polovodiče. Výzkum barvocitlivých slunečních článků zaznamenal značný rozmach, když se podařilo zlepšit styčnou plochu mezi organickým donorovým a anorganickým akceptorovým polovodičem použitím nanoporézního oxidu titaničitého (TiO_2). Jako organické barvivo je použito ruthenium, které se stará o pohlcení světla a následnou injekci elektronů do vodivostního pásu TiO_2 . Póry v TiO_2 jsou vyplněny redukčním elektrolytem, který slouží k regenerování (redukování) fotooxidované

barvivové molekuly. Kladný náboj je přepravovaný kapalným elektrolytem ke kovové elektrodě, kde I³⁻ převezme elektron z externího obvodu (opačná elektroda), zatímco záporný náboj přejde do TiO₂ a je soustředěn ve fluoridem dotovaném oxidu cínu (SnO₂:F), který slouží jako elektroda.



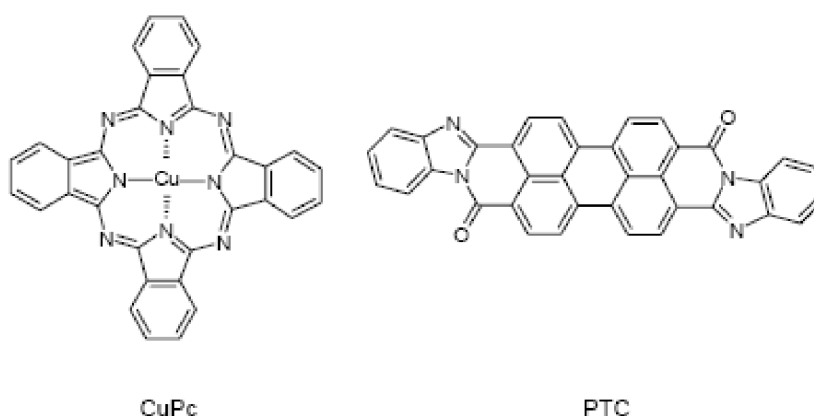
Obr. 6 Solární článek založený na bázi organického barviva. Po pohlcení světla rutheniem (barvivem), je elektron přemístěn do TiO₂. Barvivo je pak redukováno redukčním elektrolytem a kladný náboj je přepravován z barviva přes tento elektrolyt ke kovové sběrné elektrodě (counter electrode). Elektron v TiO₂ je transportován k SnO₂:F elektrodě [1].

Nanoporézní TiO₂ zabezpečí dramatické zvětšení plochy styku mezi barvivem a polovodičem, ve srovnání s plochým rozhraním. Vysoké efektivity polohového oddělení náboje je dosažena tím, že molekuly barviva jsou přímo adsorbovány do pórů n- typu polovodiče. Kladné náboje jsou přepravované efektivně kapalným elektrolytem, a proto tloušťka fotovoltického článku může být navýšena na hodnoty, při kterých již článek dobře absorbuje světlo. Z technologického hlediska nicméně kapalný elektrolyt reprezentuje nevýhodu. Z toho důvodu je mnoho výzkumů zaměřených na náhradu kapalného elektrolytu za pevný. Další nový koncept sestává z polymerního nebo organického polovodiče, které kombinují funkce absorpce světla a transportu náboje (díra) v jediném materiálu [1].

1.2.3.2 Dvouvrstvé solární články

První pokusy vytvořit celoorganické sluneční články byly spočívaly ve vložení jediné vrstvy organického materiálu mezi dvě různé elektrody. V těchto člancích fotovoltické vlastnosti silně závisí na povaze elektrod. Silně dotované konjugované materiály měly za následek rozumné elektrické účinnosti až 0.3%. V roce 1986 byl učiněn průlom, který uvedl dvouvrstvou strukturu, složenou z organického polovodiče typu p a typu n. Tento 70 nm silný

dvouvrstvý článek byl zhotoven měděním (sloučením s mědí) thalocyaninu užitého jako elektronového donoru a perylén tetracarboxylového derivátu jako elektronový akceptoru. Fotovoltaický materiál byl umístěný mezi dvěma různými elektrodami, indium cínovým kysličník (ITO) pro sběr kladných nábojů a stříbro (Ag) pro sběr náboje záporného. Elektrická účinnost asi 1% byla dosažená pod simulovaným osvětlením AM2 (691 W/m²). Důležitý aspekt v tomto konceptu je to, že nábojová generační efektivita je relativně nezávislá na příčném napětí.



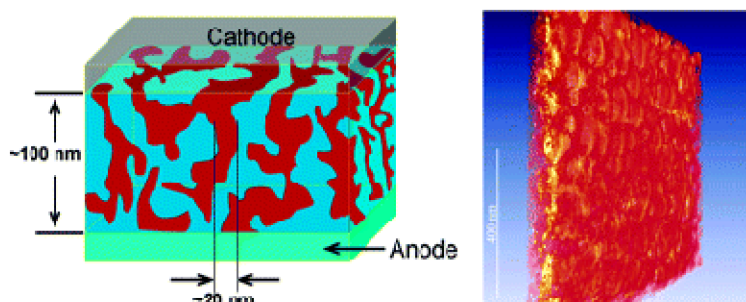
Obr. 7 Molekulární struktury phthalocyaninu mědi (CuPc) a derivátu perylénu (PTC).

V dvouvrstvě uspořádání, fotoexcitovaný nosič náboje ve fotocitlivém materiálu musí dosáhnout p- n přechodu (Obr 4, střed), kde se může uskutečnit nábojový přenos. Protože difuzní délka (dráha, kterou urazí nosič náboje) organického materiálu je omezena na 5-10 nm, dochází k účinnému fotovoltaickému jevu pouze ve velmi tenké vrstvě. Tato skutečnost omezuje výkon dvouvrstvě článků, protože takovéto tenké vrstvy nemohou řádně pohlcovat všechno světelné záření. Strategie pro zlepšení efektivity dvouvrstvého článku souvisí se strukturální organizací organického materiálu, zvětšením difuzní délky a také vytvořením silnější fotocitlivé styčné plochy [1].

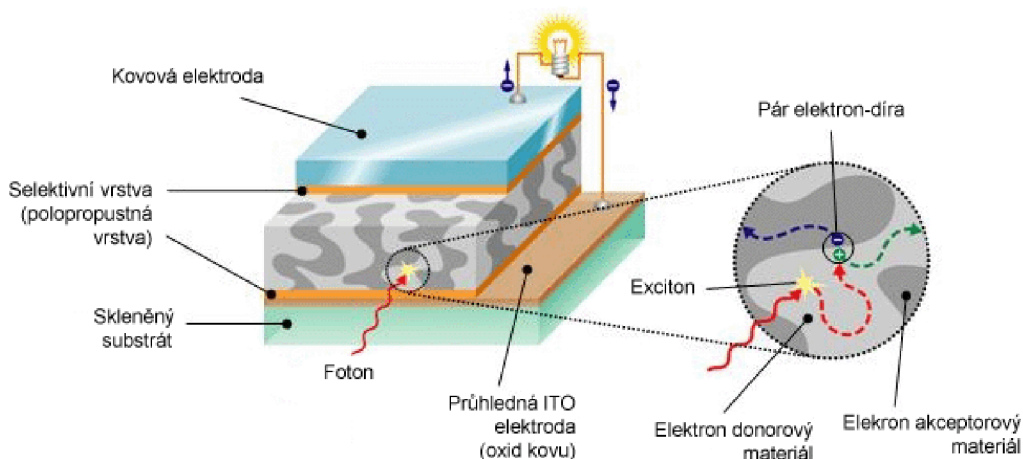
1.2.3.3 Objemové heteropřechodové články

V kombinování donorových (p typ) a akceptorových (n typ) materiálů v aktivní vrstvě slunečního článku, musí být zajištěno, že vytvořený pár elektron-díra (dále exciton) může buď difundovat v materiálu rozhraní, nebo umožnit nábojové oddělení. Toto je důležitá podmínka účinného nábojového buzení. Kdekoli v aktivní vrstvě, by vzdálenost k rozhraní měla být

stejná jako dif. délka excitonu. Navzdory jejich vysokým koeficientům absorpce, přesahujícím 10^5 cm^{-1} , 20 nm tlusté dvouvrstvé donorové a akceptorové materiály by nebyly dostatečně optické husté a dovolili by většině fotonů projít. Řešení bylo docíleno smícháním polovodiče typu p a n a spolehnutím se na vlastnost polymerů se vůči sobě vymezit na úrovni nanometrů. Tím je vytvořen přechod P-N po celé ploše, kterou se polymery dotýkají, což zabezpečí velké množství fotovoltaicky vytvořených excitonů bez ohledu na tloušťku vrstvy. Fullerenové polymerní solární články byly mezi prvními používající tento objemový princip. Nicméně toto atraktivní řešení nese novou výzvu. Fotogenerované nosiče náboje musí být schopny migrovat k sběrné elektrodě skrz tuto směs. Protože díry jsou přepravované polovodičem typu *p* a elektrony polovodičem typu *n*, tyto materiály měl by být smíšené do sítě umožňující obousměrný prostup. Blízko ideálnímu objemovému heteropřechodovému solárnímu článku je struktura zobrazená na obrázku 8, kde je takovýto objemový heteropřechod nadeponován na ITO substrátu a zavíčkován kovovou zadní elektrodou [1].



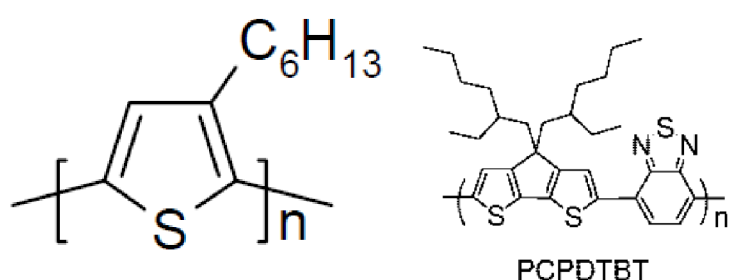
Obr. 8 Aktivní polovodivý světlo absorbující polymer vytvořený technologií objemového heteropřechodu [6]



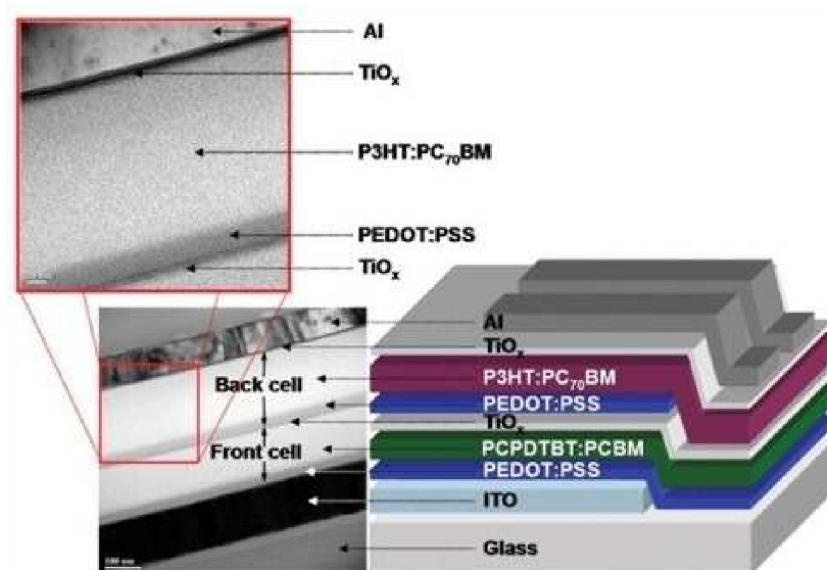
Obr. 9 Popis základní funkce polymerového solárního článku s objemovým heteropřechodem jako hlavní aktivní složkou [6].

1.2.3.4 Tandemová struktura polymerového článku

Nevýhodou výše uvedené jednoduché struktury, která je až na polymer podobná strukturám polovodičových solárních článků, je spektrální citlivost. Zatím nebyl syntetizován takový polymer, aby byl schopen převádět na elektrickou energii široké spektrum světla (záření), včetně záření ultrafialového nebo infračerveného spektra. To výrazně snižuje účinnost polymerových solárních článků. Současný nejúčinnější článek, vyrobený z polovodičového polymeru a molekul fullerenu je fakticky složen ze dvou článků umístěných nad sebou v takzvaném tandemovém uspořádání. Oba články jsou odděleny vrstvou oxidu titanu TiO_x , která plní několik úloh. Jednak slouží jako mezivrstva pro navázání různých druhů materiálů obou článků, které mají odlišné chemické vlastnosti a jednak jako sběrná a transportní vrstva pro elektrony. Zároveň zabraňuje průchodu děr. Vrstva oxidu titanu je opticky polopropustná a její optické parametry (zejména koeficient odrazu) se volí tak, aby se v jednotlivých člancích absorbovalo optimální množství fotonů. Každý z dvojice článků je tedy citlivý na jinou část spektra slunečního záření (mají rozdílnou absorpční charakteristiku). Aktivní materiály (polymery) tvoří sloučeniny P3HT (poly3-hexylthiophene) což je polovodič typu *p* a PCPDTBT (poly[(4,4-bis(2-ethylhexyl)-cyclopenta-[2,1-b;3,4-b2]dithiophene)-2,6-diyl-*alt*-2,1,3-benzothiadiazole-4,7-diyl]) což je polovodič typu *n*. Zatímco P3HT pokrývá podstatnou část viditelného spektra, PCPDTBT absorbuje nejvíce infračervené oblasti a ultrafialové oblasti blízké viditelnému spektru. Tyto materiály však samy o sobě nedokáží přeměnit sluneční záření na elektrickou energii. Ke konverzi energie dochází v okolí heteropřechodů vytvořených sloučeninami P3HT:PC₇₀BM pro viditelné spektrum a PCPDTBT:PCBM pro oblast spektra blízkou vlnovým délkám infračerveného a ultrafialového světla.



Obr. 10 Struktura molekul P3HT (Poly 3-hexylthiophene) vlevo a PCPDTBT (poly[(4,4-bis(2-ethylhexyl)-cyclopenta-[2,1-b;3,4-b2]dithiophene)-2,6-diyl-*alt*-2,1,3-benzothiadiazole-4,7-diyl])



Obr. 11 Průřez tandemovou (dvojitou sendvičovou) strukturou polymerových solárních článků s účinností 6.5 % [6]

Většina současných vyráběných tandemových článků má v horní vrstvě materiál s větší šířkou zakázaného pásu než je materiál ve vrstvě spodní. V horní vrstvě se tak absorbují fotony kratších vlnových délek, zatímco fotony s větší vlnovou délkou jí projdou a absorbují se až ve spodní vrstvě. Tím se dosahuje vyšší účinnosti, protože se absorbuje větší rozsah dopadajícího záření (světla). Navíc obě vrstvy (oba články) v tandemové struktuře mají podobnou voltampérovou charakteristiku, což je důležité pro celkovou VA charakteristiku solárního článku. Toto uspořádání je sice jednodušší na výrobu, ale bohužel v důsledku velké tloušťky horní vrstvy zde dochází ke značnému útlumu infračerveného záření, které se má zachytávat až vrstvou spodní. Celý článek tak má nižší účinnost. Proto v případě nejnovějšího článku vyvinutého na Kalifornské univerzitě s účinností přes 6% při ozáření 200 mW/mm^2 bylo nutno použít inverzního uspořádání, to znamená, že článek s větší šířkou zakázaného pásu je umístěn na spodní straně[6].

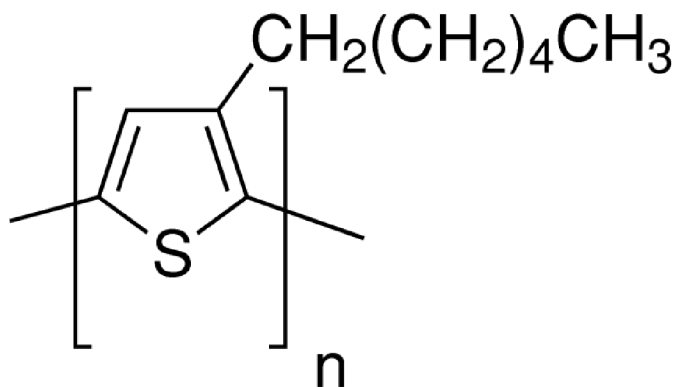
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část práce je zaměřena na zkoumání vhodných struktur solárních článků, ve kterých by bylo využito uvedených materiálů. Bylo připraveno několik prototypových struktur, v nichž byly tyto materiály použity jako hlavní funkční složka pro přeměnu světelného záření na elektrickou energii. Vzorky byly podrobeny standardním charakterizačním metodám na k tomu určených měřicích pracovištích, aby byla zajištěna porovnatelnost z výsledků předchozích prací.

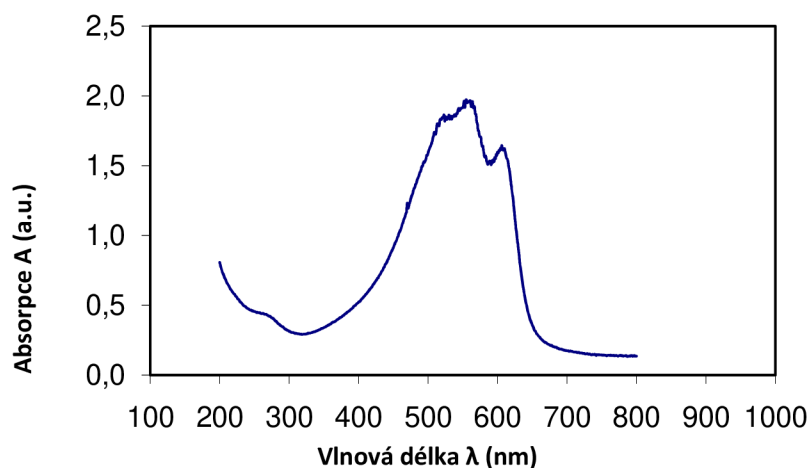
2.1 MATERIÁLY

Jako hlavní funkční materiály, jež byly použity na vytvoření zkoumaných struktur (viz kapitola 2.2), byly zvoleny *poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)* (dále jen zkratka P3HT) a *hydroxy(29H,31H-phthalocyaninato)aluminum* (dále ftalocyanin nebo Fc_{1-2}). P3HT byl referenční materiál, protože je již komerčně využíván a jeho elektrické a optické vlastnosti jsou známé. Absorpční spektrum P3HT viz Graf 1. V porovnání s P3HT (absorpční maximum 570nm), má Fc_{1-2} absorpční maximum posunuté do oblasti vlnových délek viditelného světla (okolo 730nm) jak je vidět v grafu (Graf 2).

- **poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl), označení P3HT**



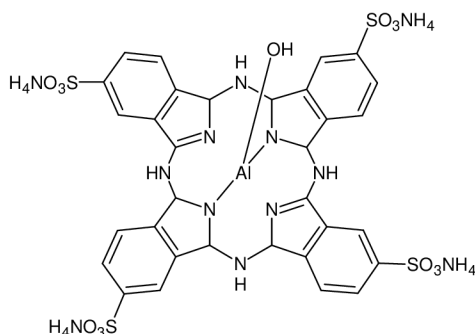
Obr. 12 Strukturální vzorec P3HT



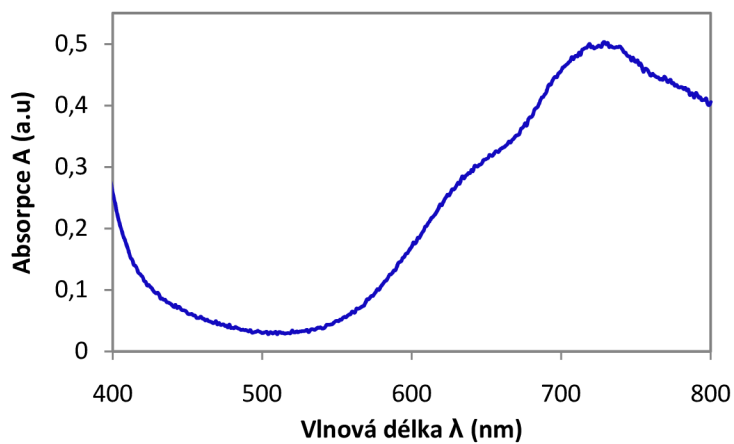
Graf 1 Absorpční spektrum tenké vrstvy P3HT

P3HT absorbuje záření v oblasti středních vlnových délek viditelného spektra okolo 570nm. Je rozpustný v organických rozpouštědlech, jako je chloroform nebo toluen.

- hydroxy(29H,31H-phthalocyaninato)aluminum, zkratka Fc(Pc)₁₋₂



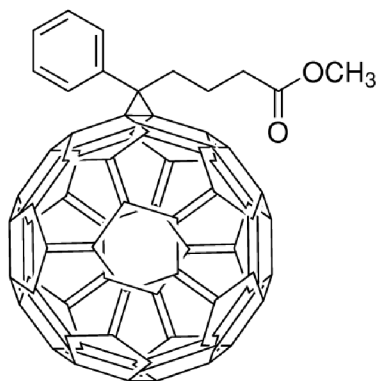
Obr. 13 Strukturální vzorec ftalocyaninu



Graf 2 Absorpční spektrum tenké vrstvy ftalocyaninu

Ftalocyanin je vodou rozpustné barvivo, které mimo jiné vykazuje polovodivé vlastnosti. Jeho absorpční maximum je na horní hranici oblasti viditelného spektra (viditelné červené/infračervené světlo) okolo 730nm.

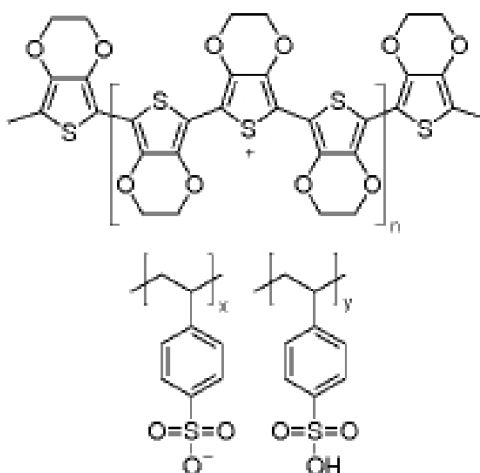
- **1-[3-(Methoxycarbonyl)propyl]-1-phenyl-[6.6]C₆₁**, zkratka: **PCBM**



Obr. 14 Strukturální vzorec PCBM

PCBM je polovodivý nanomateriál (derivát fullerenu) a používá se jako polovodič typu *n* především v solárních článcích, v nichž snižuje potenciálovou bariéru mezi vlastním funkčním materiálem a kovovou elektrodou. Absorpční maxima jsou u tohoto materiálu okolo 270nm a 350nm. Je dobře rozpustný v organických rozpouštědlech např. chlorbenzenu nebo toluenu.

- **Poly(2,3-dihydrothieno-1,4-dioxin)-poly(styrenesulfonate)**, zkratka: **PEDOT:PSS**

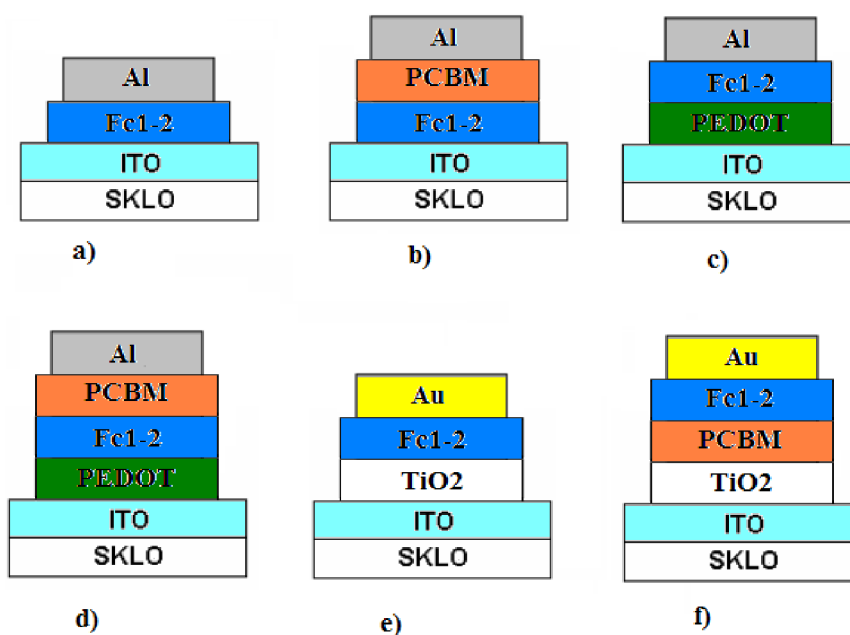


Obr. 15 Strukturální vzorec PEDOT

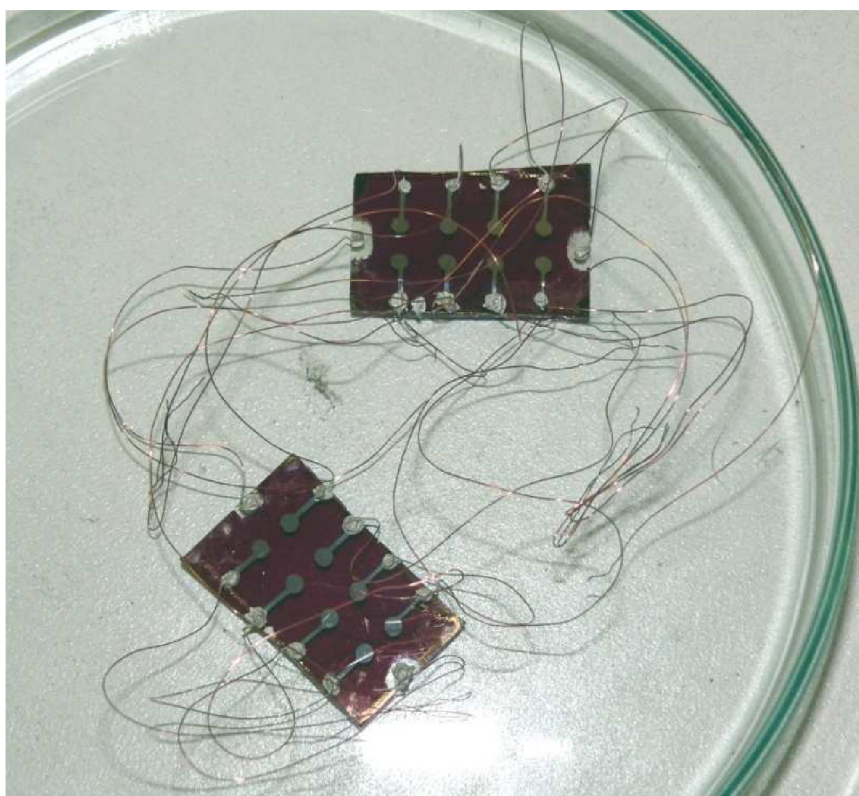
Jedná se o směs dvou materiálů. Tato směs je dobře rozpustná ve vodě a dobře se nanáší metodou rotačního lití. Má celkem nízké pH (1.2-1.8), což může působit destruktivně na sousední vrstvy, zvláště pak ftalocyanin. Materiál PEDOT:PSS absorbuje záření velkých vlnových délek. Slouží ke snížení potenciálové bariéry mezi funkčním materiálem a ITO elektrodou.

2.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Příprava vzorků je důležitým procesem, na kterém do značné míry závisí kvalita elektrických měření. Na měření bylo připraveno 12 vzorků. Těchto dvanáct vzorků bylo dále rozděleno do dvojic, které měli stejnou strukturu, lišili se však použitím odsoleného či neodsoleného ftalocyaninu. Všechny měřené vzorky měly uspořádání sandwichové tj. mezi substrát a kovovou elektrodou jsou nanесeny jednotlivé funkční vrstvy tak jak je vidět na Obr. 16. Světlo dopadá na vzorek ze strany skleněné podložky a přes propustnou ITO elektrodu proniká k polovodivému materiálu.



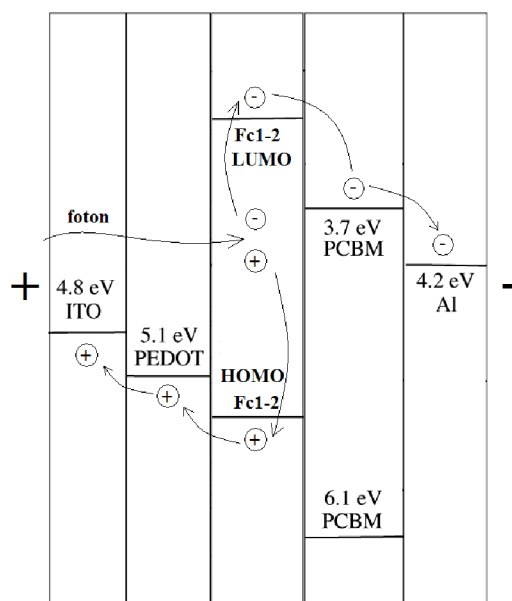
Obr. 16 *Struktury a) až d) jsou v klasickém uspořádání tedy kladný pól na hliníkové elektrodě a záporný na elektrodě ITO. Struktury e) a f) jsou v inverzním uspořádání s kladnou Au elektrodou a zápornou ITO elektrodou (Inverzní a klasické uspořádání viz kapitola 2.2.1)*



Obr. 17 Hotové vzorky, na nichž se provádí měření

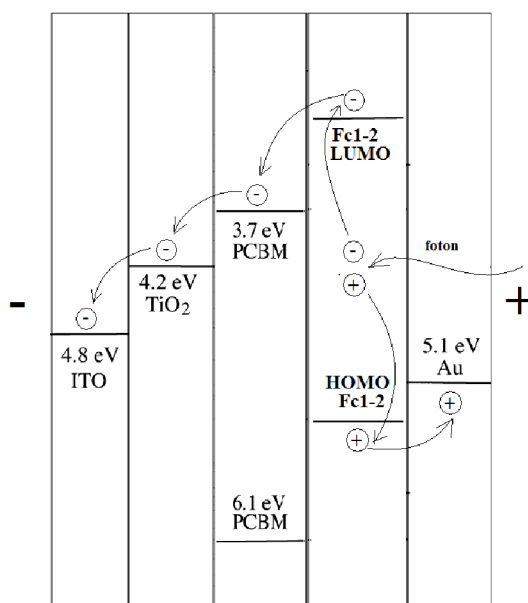
2.2.1 Klasická a inverzní struktura - porovnání

U konvenčních struktur, kde je použit PEDOT jako sběrný materiál snižující výstupní práci děr mezi organickým materiálem a anorganickým ITO (indium tin oxide), je problémovým faktorem kyselost PEDOT, která narušuje aktivní vrstvu (v tomto případě ftalocyaninu). V inverzní struktuře tento problém odpadá, protože zde organická aktivní vrstva přímo navazuje na kovovou elektrodu (většinou Au). Další z výhod inverzní struktury uspořádání je její menší náročnost na zhotovení, protože není vyžadováno vakuum při nanášení elektrod a vrstvy PEDOT. V současné době však zatím inverzní struktura zaostává za klasickou strukturou v účinnosti, což je způsobeno horší generací a separací exitovaných nosičů náboje.



Obr. 18 Pásový model klasické struktury se znázorněným transportem náboje. Připravené vzorky byly také ve variantách bez PCBM a bez PEDOT.

V pásovém modelu jsou uvedeny skutečné hodnoty energetických hladin jednotlivých materiálů. Pouze u ftalocyaninu jsou zde jeho hladiny vyznačeny pouze orientačně a to z důvodu toho, že u něj zatím nebyly přesné hodnoty experimentálně změřeny.



Obr. 19 Pásový model inverzní struktury se znázorněným transportem náboje. Připravené vzorky byly také ve variantách bez PCBM.

2.2.2 Příprava podložky s vrstvou ITO

Vrstvy ITO jsou transparentní, chemicky velmi stabilní, mechanicky odolné a mají vysokou přilnavost ke sklu. Tyto vrstvy vykazují chování degenerovaného polovodiče typu N s kubickou strukturou a atomy cínu zde vystupují jako donory. Parametry vrstev závisejí na parametrech depozice, zvláště teplota substrátů významně ovlivňuje stupeň uspořádání vznikající vrstvy.

Pro přípravu všech vzorků bylo k dispozici tenké sklo s již nanesenou vrstvou ITO. Sklo bylo nařezáno na obdélníky (1 × 2 cm) a vrstva ITO upravena, aby nepokrývala celou plochu sklíčka. Části ITO, které měly na podložce zůstat, byly zalepeny izolepou. Poté byla sklíčka vložena do roztoku HCl s H₂O (v poměru 1:1), do kterého se rovnoměrně sypal cca 30 sekund práškový zinek, aby došlo k důkladnému odleptání. Po vyjmutí sklíček z roztoku a opláchnutí destilovanou vodou byla odstraněna izolepa a následovalo důkladné čištění sklíček. Nejprve byla čištěna pod tekoucí vodou za pomoci detergentu a po opláchnutí destilovanou vodou byla umístěna do ultrazvukové pračky, kde se v destilované vodě čistila 15 minut. Dalších 20 minut se sklíčka čistila v ultrazvuku v rozpouštědle použitým na přípravu aplikovaného roztoku polymeru (voda, chloroform), který se na ně následně nanášel. Nakonec bylo každé sklíčko ostříkáno izopropanolem[9].

2.2.3 Příprava roztoků

Organické materiály byly na podkladový materiál nanášeny ve formě roztoku. K přípravě roztoku bylo třeba nejdříve navážít práškový materiál. V případě ftalocyaninu bylo naváženo konkrétní množství tak, aby po vytvoření roztoku odpovídalo koncentraci 15 mg.cm⁻³, pro PCBM byla tato hodnota 10 mg.cm⁻³. Z důvodu ručního dávkování, byla stanovena jistá tolerance a přesné množství, které bylo použito k přípravě roztoků, je uvedeno v Tab. 1. Po navážení tuhého materiálu do zkumavky byl mikropipetou přidán 1 cm³ rozpouštědla. Pro přípravu roztoku ftalocyaninu byla rozpouštědlem demineralizovaná voda, v případě PCBM to byl chloroform. Dále byly zkumavky ponechány v třepačce po dobu cca 24 hodin, aby se práškový polymer dobře rozpustil. Ze stejného důvodu byly zkumavky umístěny do třepačky i před nanášením vrstev z roztoků, a to zhruba na hodinu.

materiál	úprava	množství [mg/cm ³]	rozpouštědlo
ftalocyanine Fc ₁₋₂	odsolený	15.9	voda
	neodsolený	16.6	voda
PCBM	-	11.3	chloroform
P3HT	-	10	chloroform/toluen – 7:3

Tab. 1 Koncentrace zkoumaných materiálů

2.2.4 Nanášení tenkých vrstev

K vytváření tenkých vrstev polymerů bylo užito metody rotačního lití (spin coating). Touto metodou připravené tenké vrstvy mají tloušťku přibližně 200nm. Zde je uveden podrobný popis postupu jejich přípravy:

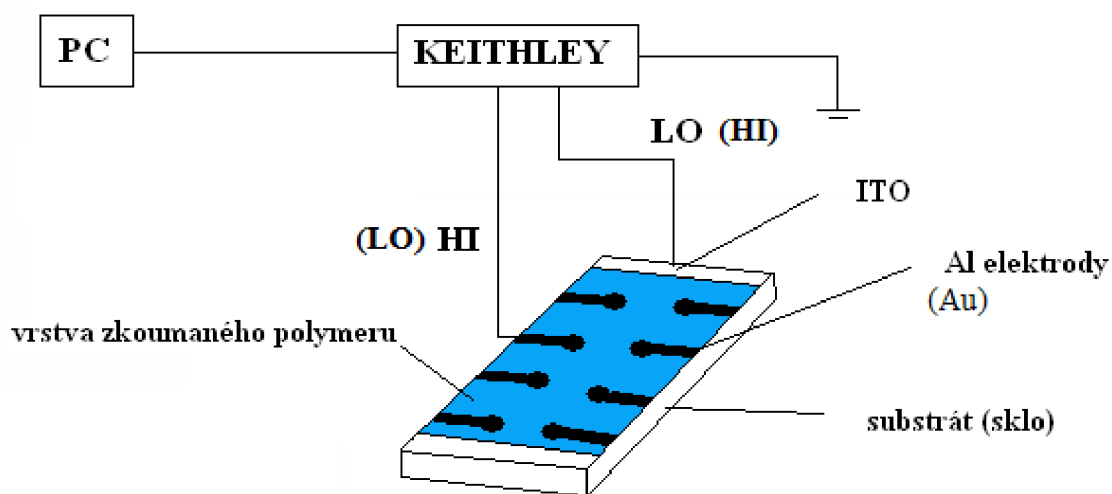
Čistá sklíčka byla za pomoci podtlaku přichycena k rotačnímu kotouči a před nanášením roztoku ofouknuta dusíkem, aby byly z povrchu odstraněny prachové částice. Následovalo nanesení roztoku mikropipetou v množství $0,2 \text{ cm}^3$. Poté byl ihned přístroj spuštěn s nastavením 1000 otáček za minutu. Pro ftalocyanin byla doba rotačního nanášení 1 min. Pro nanášení vrstev PEDOT se sklíčko ponechalo při rotačním nanášení 2 minuty s nastavením 3000 otáček za minutu. Metoda rotačního nanášení silně ovlivňuje výslednou strukturu vzorku, počet otáček za minutu má vliv na tloušťku nanesených vrstev. Dalším faktorem, který výrazně ovlivňuje tloušťku nanesené vrstvy je viskozita roztoku. Vytvořená tenká vrstva byla vždy 20 min žíhána. Vrstvy ftalocyaninu a PCBM byly žíhány při 50°C , vrstvy PEDOT při 110°C .

2.2.5 Nanášení hliníkové elektrody

Na zaschlou vrstvu polymeru byly pomocí vakuového napařování nanесeny hliníkové elektrody. Napařování se provádí přes masku při vakuu 10^{-3}Pa . Tloušťka napařené vrstvy hliníku byla přibližně 100nm. Napařená vrstva je velmi choulostivá na poškození poškrábáním. V konečné fázi byly ke vzorku nakontaktovány stříbrnou pastou měděné drátky, na koncích zbavené izolace[9].

2.3 MĚŘÍCÍ PRACOVNÍŠTĚ PRO URČENÍ V-A CHARAKTERISTIKY

K automatizovanému odečítání hodnot byl použit picoampérmetr se zabudovaným napěťovým zdrojem (0-500V/50VA stejnosměrných) KEITHLEY model 6487 (Obr. 21 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) a PC se zabudovanou kartou s rozhraním IEEE. Picoampérmetr KEITHLEY při měření funguje jako programovatelný zdroj napětí a zároveň odečítá proud procházející mezi elektrodami LO a HI (polarita závisí na tom, zda je měřena struktura klasická či inverzní, viz Obr. 20). Odeslaná data z picoampérmetru zpracovávalo virtuální měřicí pracoviště vytvořené v integrovaném grafickém prostředí Delphi od firmy Borland. Vzorek byl při měření umístěn v kryostatu ve vakuu (cca $8 \cdot 10^{-6}\text{Pa}$), aby se zamezilo působení vzdušných plynů na vrstvu polymeru. Celé měřicí pracoviště (kromě PC) je vidět na Obr. 22.



Obr. 20 Schéma zapojení vzorku do obvodu. Údaje v závorkách platí pro měření inverzní struktury prototypového článku.



Obr. 21 Picoampérmetr se zabudovaným napěťovým zdrojem (0-500V/50VA stejnosměrných) KEITHLEY model 6487



Obr. 22 Měřící pracoviště na určování V-A charakteristik prototypových struktur solárních článků. Zprava: xenonová výbojka, monochromátor, kryostat, picoampérmetr.

2.4 METODY CHARAKTERIZACE PROTOTYPOVÝCH STRUKTUR FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

2.4.1 UV-VIS spektroskopie

Principem této optické metody je měření absorpce záření v ultrafialové a viditelné oblasti spektra. Dochází při tom k excitaci valenčních elektronů, které jsou součástí molekulových orbitalů, absorpce záření souvisí tedy s přechodem elektronu mezi energetickými hladinami v molekule. Absorpce záření je přímo úměrná koncentraci absorbující látky a tloušťce absorbující vrstvy. Pomocí UV-VIS spektroskopie můžeme měřit transmitanci T , což je relativní část prošlého záření[9].

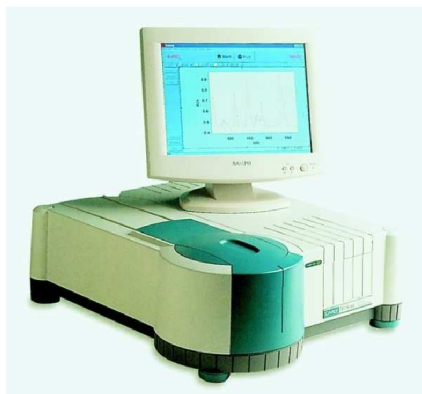
$$T = \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad (6)$$

Φ_0 představuje dopadající zářivý tok a Φ prošlý zářivý tok.

Lze také měřit absorbanci A , což je záporný dekadický logaritmus transmitance.

$$A = -\log T = \log \frac{\Phi_0}{\Phi} \quad (7)$$

Pro měření byl využit jednopaprskový spektrometr Cary 50 od firmy Varian. Spektrometr se skládá se zdroje záření a z mřížky pro separaci světelného paprsku jedné vlnové délky (monochromátor). Tento paprsek prochází vzorkem a dopadá na detektor, který měří energii propuštěnou vzorkem[9].



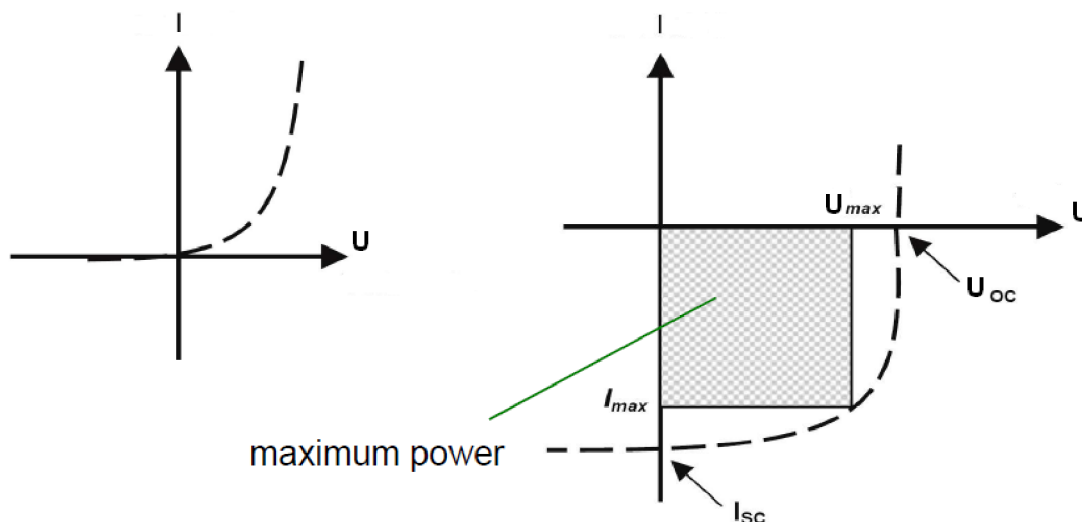
Obr. 23 Jednopaprskový spektrometr Varian Cary 50

2.4.2 Fotoluminiscenční spektroskopie

Fotoluminiscence zahrnuje zářivé přechody fosforescenci a fluorescenci. Fotoluminiscenci vykazují především molekuly s konjugovanými dvojnými vazbami. K měření byl využíván jednopaprskový spektrofluorimetr Aminco Bowman. Při měření je paprsek ze zdroje rozdělen na dva, z jednoho paprsku je vymezena vhodná vlnová délka emisním monochromátorem, poté excitační paprsek vstupuje do květy se vzorkem (v našem případě prochází vrstvou polymeru na skle), kde vyvolá fluorescenční emisi. Emisní paprsek poté prochází excitačním monochromátorem a tím se již izoluje vlnová délka pro měření. Signál obou paprsků je následně vyhodnocen ve fotonásobiči. Vzorky jsou charakterizovány emisními spektry (závislost intenzity emise na vlnové délce). Měření je prováděno na vlnových délkách, kde byla předpokládána maximální emise záření.

2.4.3 Voltampérová charakteristika organického fotocitlivého polymeru

Měření V-A charakteristiky článku neosvětleného a pod osvětlením (Obr. 24) dovoluje vyhodnocení většiny z fotoelektrických technických parametrů článku, stejně jako jeho elektrické chování.



Obr. 24 V-A charakteristiky ideálního solárního článku za tmy (vlevo) a za světla (vpravo). Vyšrafovaný obdélník vyznačuje oblast maximálního výkonu (maximum power) [7].

Hlavními sledovanými parametry jsou:

- **zkratový proud I_{sc}** – proud, který prochází článkem při nulovém přiloženém napětí
- **napětí naprázdno U_{oc}** – napětí, které je naměřeno při proudu procházejícím článkem $I = 0A$
- **I_{max} a U_{max}** - hodnoty, které jsou definované pro maximální výkon dodaný fotovoltaickým článkem $P_{max} = |I_{max} \cdot U_{max}|$.
- **plnicí činitel FF** - poměr maximálního výkonu k hodnotám napětí na rozpojeném obvodu a hodnotám proudu při zkratu

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{U_{max} \cdot I_{max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (8)$$

- **externí fotovoltaická účinnost η** je definována rovnicí:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{S \cdot G} \quad (10)$$

S povrch článku, který byl osvětlen

G výkonová hustota osvětlení

2.4.3.1 Vyhodnocení fotovodivosti z V-A charakteristiky

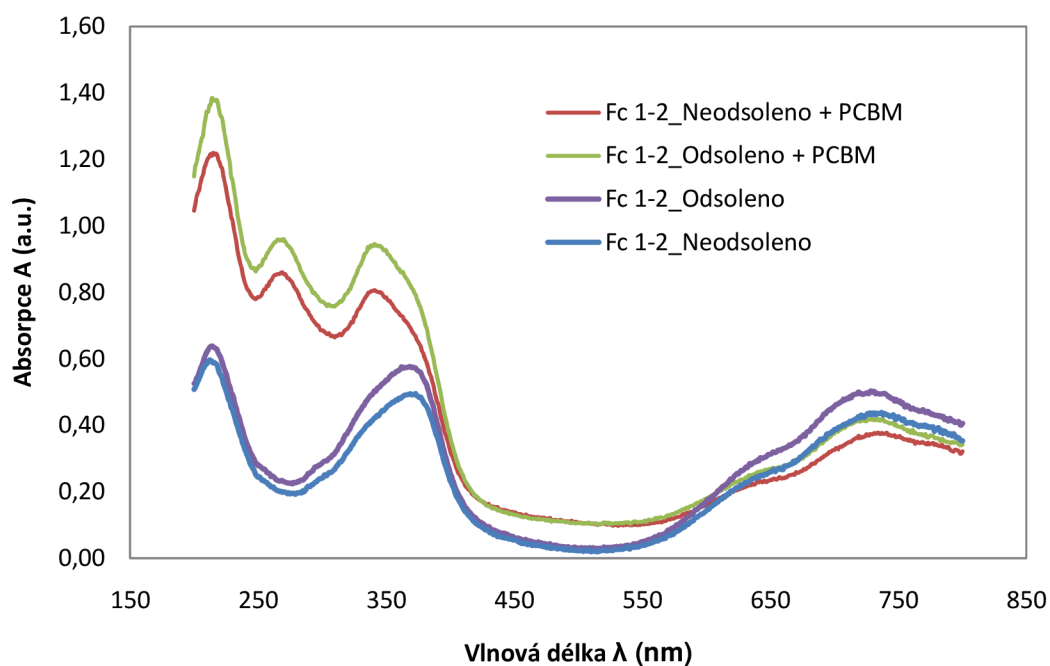
Vyhodnocení fotovodivosti z V-A charakteristiky se je základní metodou, jak určit a vyhodnotit zda zkoumaný materiál, který je polovodivý, vykazuje reakci na osvětlení zvýšením vodivosti. Toto zvýšení je zapříčiněno generací volných nosičů náboje v materiálu vlivem absorpce fotonů. Vyhodnocení se provádí z naměřených V-A charakteristik v propustném směru (např. 0-2V) za světla a za tmy a vynesení zlogaritmovaných hodnot do grafu s lineárními souřadnicemi. Takto získané křivky se proloží lineární regresní funkcí, ze které se určí parametr sklonu neboli strmosti této funkce. Čím vyšší je tento parametr (tedy i strmost), tím vyšší byla fotovodivost dané měřené struktury.

2.5 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

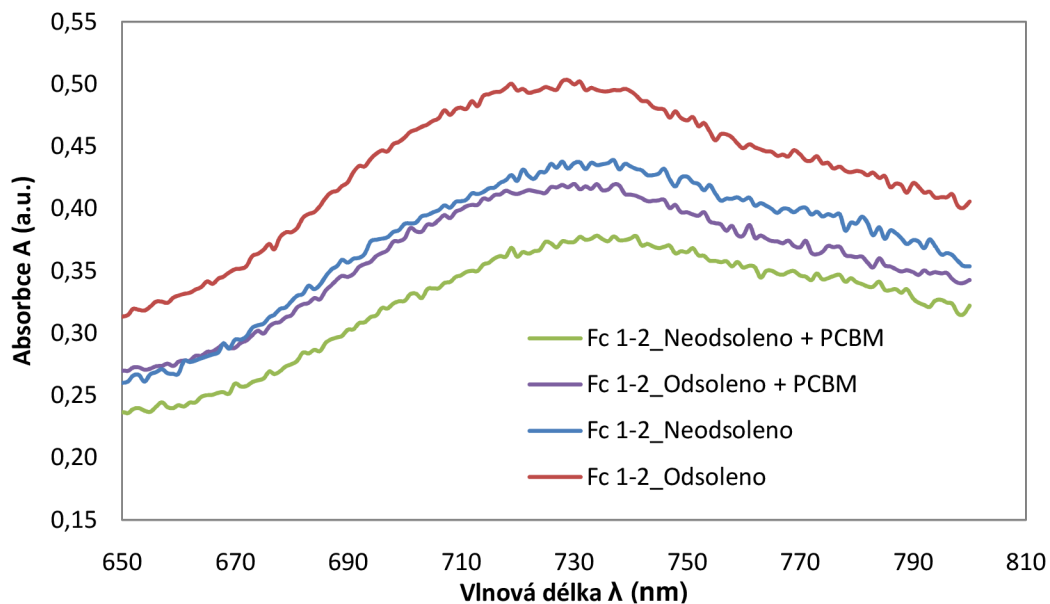
2.5.1 UV-VIS spektroskopie

Cílem tohoto měření bylo zjistit, v jakých oblastech spektra světelného záření daný materiál nejvíce absorbuje. Tato informace určuje, s jakým dalším funkčním materiálem by bylo nejvhodnější daný materiál kombinovat, aby výsledný fotovoltaický článek zužitkoval co největší spektrum dopadajícího záření.

Vzorky pro měření optických vlastností materiálů byly připraveny podobně jako vzorky pro elektrická měření metodou rotačního lití. V tomto případě však podložku tvořilo křemenné sklo bez vrstvy ITO. Rozdíly v absorpčních spektrech jednotlivých variant (bez nebo s přidaným PCBM) a vliv úprav ftalocyaninu Fc_{1-2} jsou dobře patrné v grafu 3. Graf 4 je pak zaměřen na absorpční maximum ftalocyaninu Fc_{1-2} .

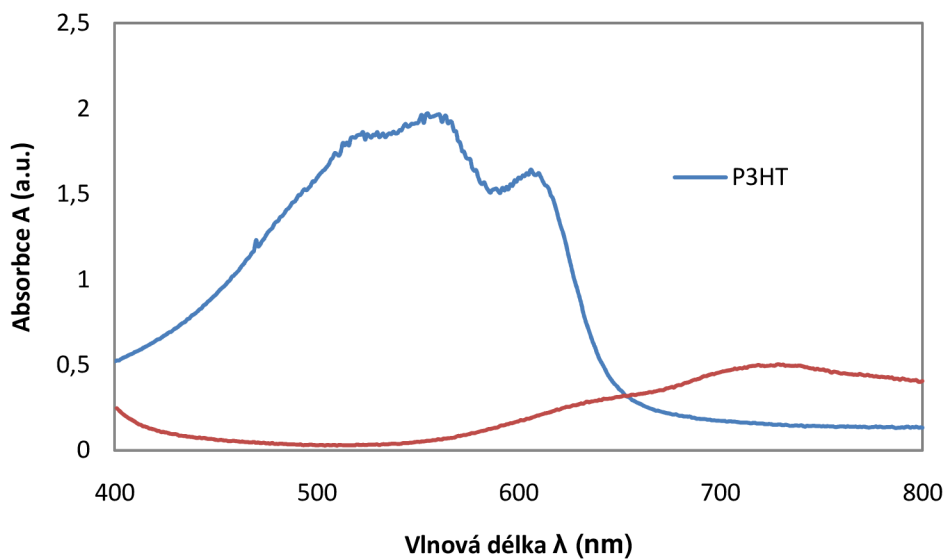


Graf 3 Porovnání průběhů absorpčních spekter ftalocyaninu Fc_{1-2} . Z grafu je patrná změna absorpce krátkých vlnových délek způsobená vrstvou PCBM (maxima při 270nm a 350nm), stejně jako vliv tloušťky celé struktury v oblasti 450-550nm. Minimální rozdíl je pak mezi odsoleným a neodsoleným ftalocyaninem Fc_{1-2} .



Graf 4 Graf průběhu absorpčního spektra, zaměřen na oblast absorpce ftalocyaninu Fc1-2 (oblast okolo 730nm). V oblasti absorpčního maxima ftalocyaninu lze pozorovat nižší hodnoty za přítomnosti PCBM.

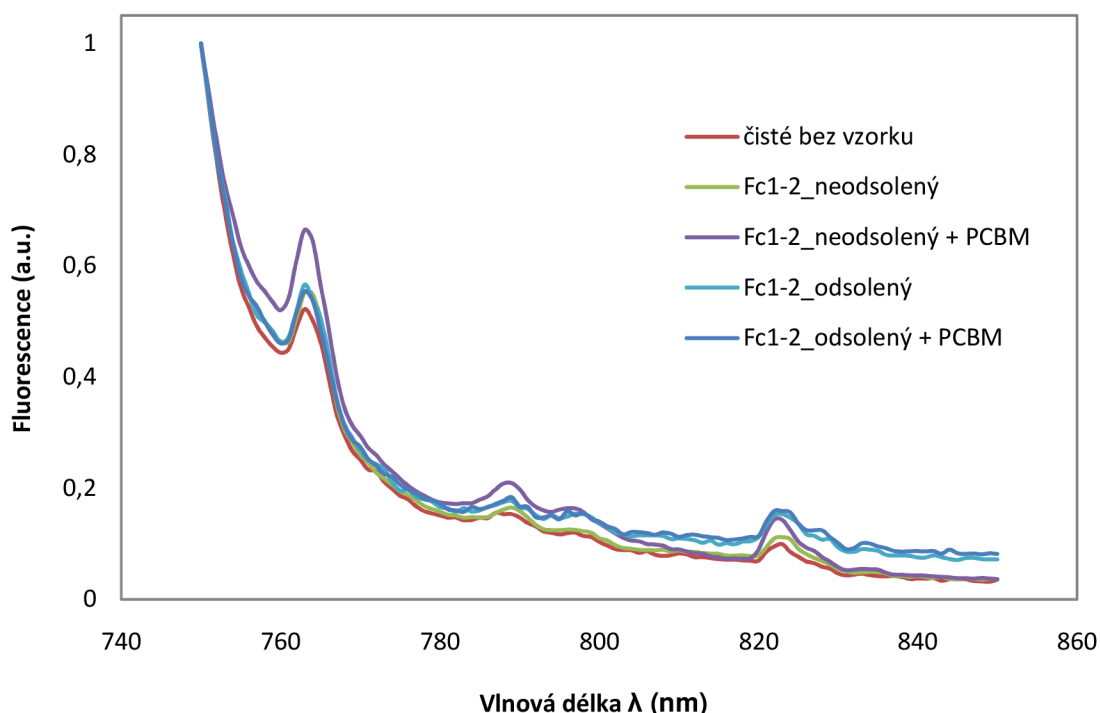
Z grafu 4 je patrné, že nejvyšší absorpci vykazoval ftalocyanin odsolený bez vrstvy PCBM. Rozdíly mezi odsoleným a neodsoleným ftalocyaninem Fc_{1-2} však není příliš výrazný, což je výhodné pro využití v průmyslu, protože odsolování je velmi časově a finančně náročné. V grafu 5 je vidět návaznost spekter P3HT a ftalocyaninu Fc_{1-2} což nabízí jejich možnou kombinaci v konstrukci tandemového solárního článku.



Graf 5 Srovnání absorpčních spekter P3HT a ftalocyaninu Fc_{1-2}

2.5.2 Fluorescence

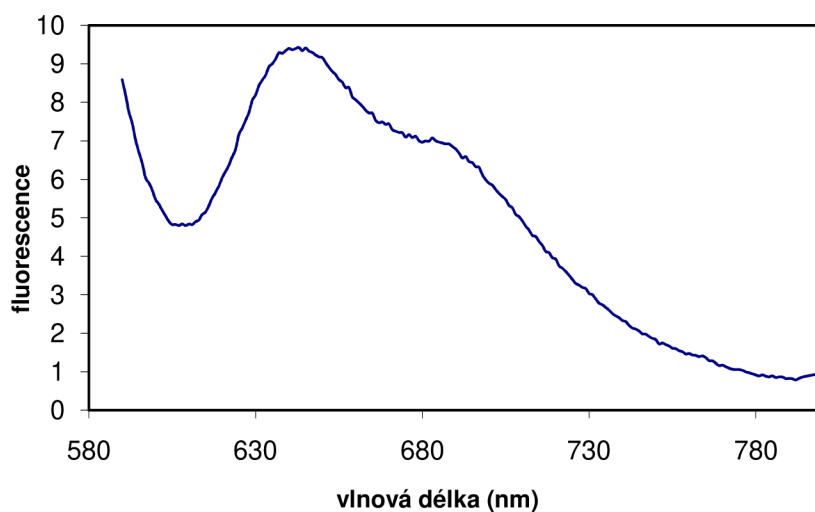
Cílem měření emisního spektra bylo zjištění, zda se ve zkoumaném materiálu vyskytují zářivé deexcitace (vrácení excitovaného nosiče náboje na původní energetickou hladinu a vyzáření přebytečné energie ve formě fotonu) a jakých vlnových délek toto záření dosahuje. Fluorescence jako taková je v podstatě jev negativní, jelikož při ní dochází k nežádoucím rekombinacím, které pak snižují účinnost generace volných nosičů.



Graf 6 Naměřené emisní spektrum na vzorcích Fc_{1-2} normované. Excitační vlnová délka byla 750 nm.

Při porovnání naměřených spekter se spektrem čistého substrátu je zřejmé, že ftalocyanin Fc_{1-2} nevykazoval žádnou fluorescenci. Přitom se v odborné literatuře udává emisní maximum okolo 700nm. Z výsledku však vyplývá, že pravděpodobně byla veškerá energie dopadající ve formě fotonů využita na separaci náboje a nežářivé rekombinace.

Na rozdíl od ftalocyaninu u P3HT dochází k výrazné emisi záření. Nevyšších hodnot dosahuje okolo 640 nm jak je vidět na grafu 7.

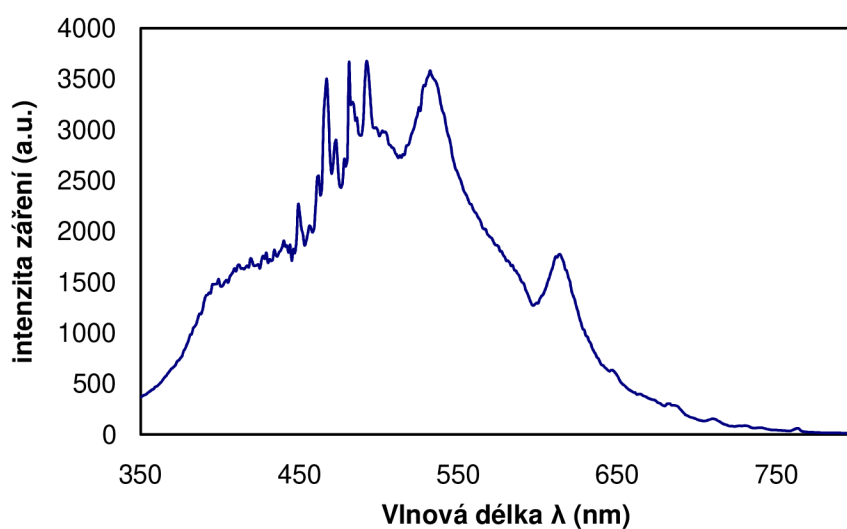


Graf 7 Emisní spektrum P3HT

2.5.3 Voltampérová charakteristika organického polovodičového polymeru

Na připravených vzorcích byly měřeny závislosti proudu na napětí (dále jen V-A charakteristiky) a to za tmy a za osvětlení. Získaná data získaná z jednotlivých vzorků jsou rozdělena podle tvaru V-A charakteristiky tak, aby se oddělily vzorky s polovodičovou charakteristikou, ohmickou a na vzorky kde se nepodařilo naměřit stabilní charakteristiku.

Jako světelný zdroj byla použita xenonová výbojka, která dodávala plošný výkon $P_0 = 2,15 \text{ mW/cm}^2$. Po přepočtu na plochu elektrody, jejíž průměr byl 2,1 mm, byl získán celkový výkon dopadající na plochu elektrody $P_0 = 0,0745 \text{ mW}$.



Graf 8 Spektrum použitého zdroje osvětlení (xenonové výbojky).

2.5.3.1 Rozdělení vzorků

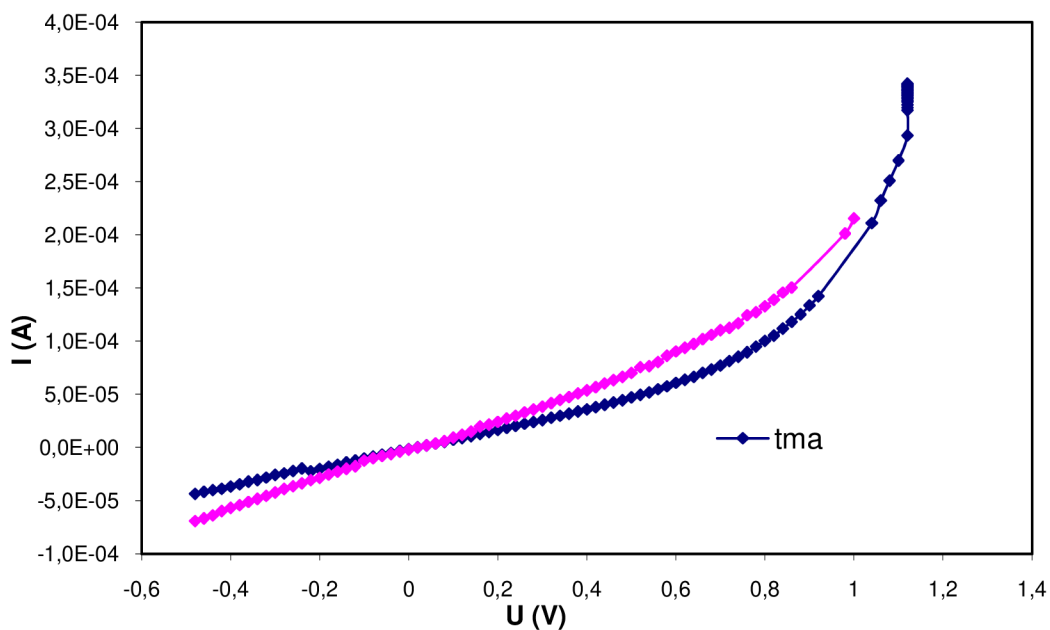
Z proměřených vzorků byla sestavena tabulka se zhodnocením základních kritérií určujících vlastnosti připravených vzorků.

Prvním kritériem pro posouzení vzorku podle jeho V-A charakteristiky je její tvar, který určuje, zda daný vzorek vykazoval vlastnosti polovodiče či nikoliv. Zde jsou uvedeny V-A charakteristiky vzorků vykazujících chování polovodiče. Druhým kritériem bylo, zda byla zaznamenána přítomnost fotovodivosti respektive zvýšení vodivosti při osvětlení. V následující tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny všechny měřené vzorky seřazené podle čísel. Je zde uvedena struktura jednotlivých vzorků, úprava ftalocyaninu a slovní popis tvaru V-A charakteristik.

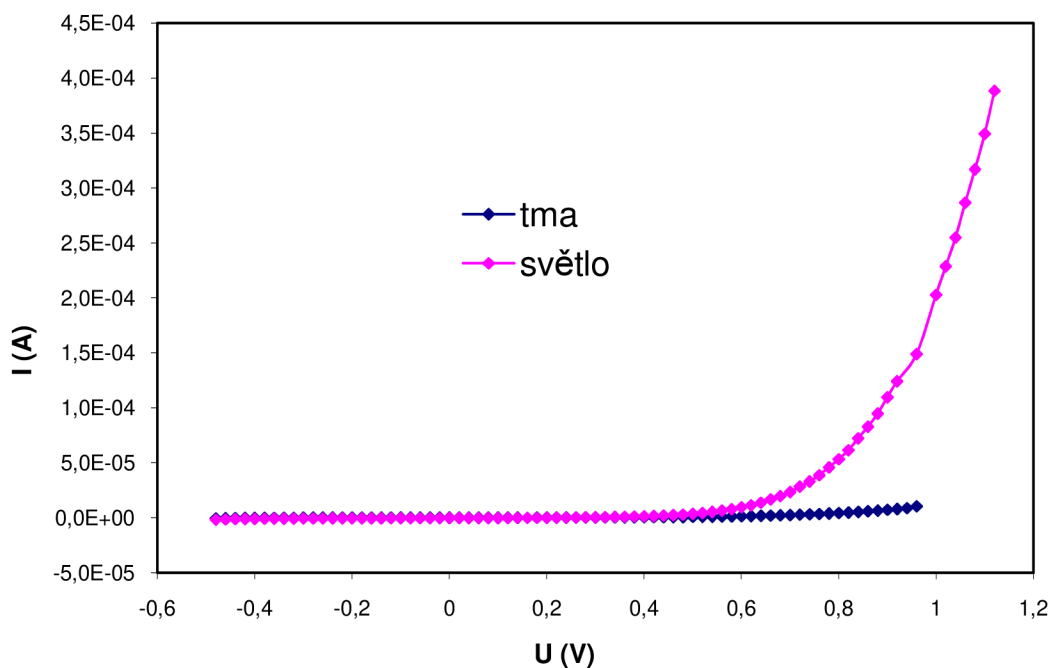
Vzorek číslo:	Struktura	Úprava Fc	Proměřená elektroda	Fotovodivost	Tvar V-A	Fotovolt. jev	Pozn.
280	ITO/PEDOT/Fc1-2/Al	ODSOLENO	B	malá	ohmický	ne	
			F	ano	ohmický	ne	
281	ITO/PEDOT/FC1-2/PCBM/AL	ODSOLENO	Vadný				
282	ITO/PEDOT/FC1-2/AL	NEODSOL.	D	ano	ohmický	ne	
			F	ne	ohmický	ne	
283	ITO/PEDOT/FC1-2/PCBM/AL	NEODSOL.	B	malá	ohmický	ne	nestabil. char
			C	ano	neurčitelné	ano	nestabil. char
284	ITO/FC1-2/PCBM/AL	ODSOLENO	D	ano	polovodič	ano	nestabil. char
285	ITO/Fc1-2/AL	ODSOLENO	F	malá	ohmický	ne	
286	ITO/TiO2/PCBM/Fc1-2/Au (INV.)	NEODSOL.	Vadný				
287	ITO/Fc1-2/AL	NEODSOL.	E	malá	ohmický	ne	
288	ITO/TiO2/Fc1-2/Au (INV.)	NEODSOL.	A	malá	polovodič	ne	
289	ITO/TiO2/PCBM/Fc1-2/Au (INV.)	ODSOLENO	Vadný				
290	ITO/TiO2/Fc1-2/Au (INV.)	ODSOLENO	B	ano	polovodič	ano	
			D	ano	polovodič	ano	
			F	ano	polovodič	ne	
			G	ano	polovodič	velmi slabý	
291	ITO/FC1-2/PCBM/AL	NEODSOL.	B	ano	ohmický	ne	nestabil. char
			D	ano	ohmický	ne	nestabil. char

Tab. 2 Rozdělení měřených vzorků podle základních kritérií. Označení INV. v závorce u popisu struktury značí, které struktury byly v inverzním zapojení, tedy s obrácenou polaritou (elektroda ITO byla záporná a kovová elektroda, v případě inverzního zapojení zlatá, byla elektroda záporná).

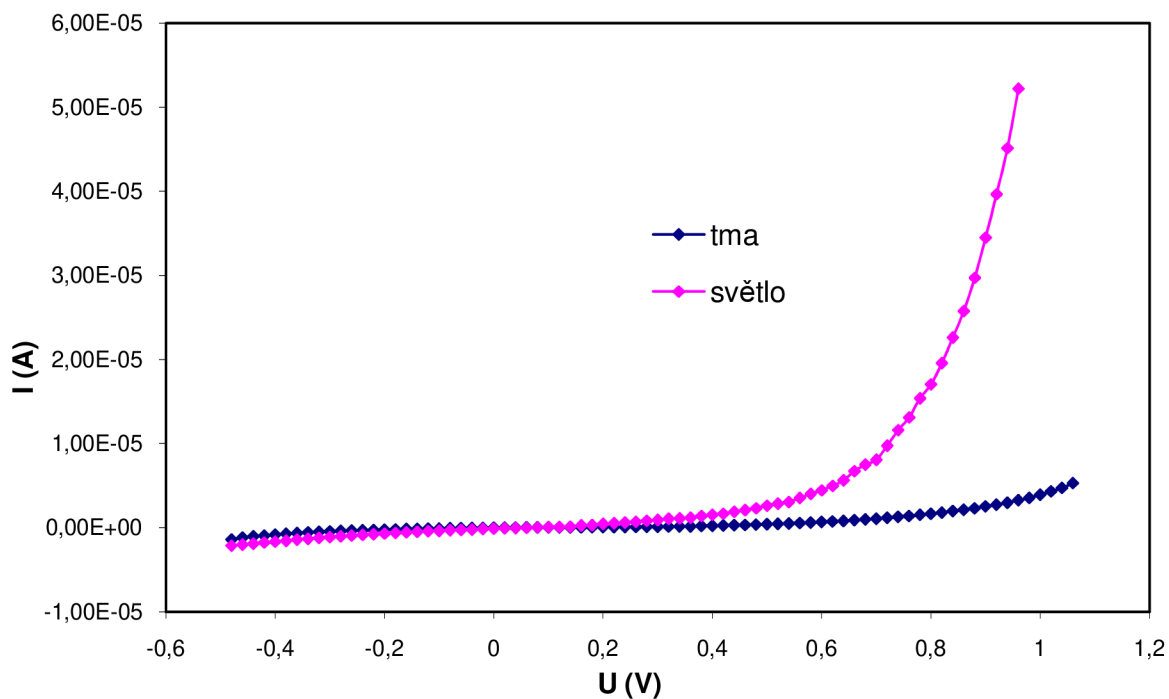
Ze všech naměřených V-A charakteristik byly tedy nejprve vybrány ty, které tvarem nejvíce odpovídají V-A charakteristice polovodiče. Důraz byl kladen na minimální přítomnost šumu či jiných chyb, které by značily nedokonalosti ve vytvořených vrstvách způsobené nečistotami popřípadě předčasnou degradací způsobenou ne úplně dokonalým skladováním vzorků mezi měřeními (zvláště u vzorků s vrstvou PEDOT). Vybrané charakteristiky jsou uvedeny v grafech - 39 - Graf 9 až Graf 13.



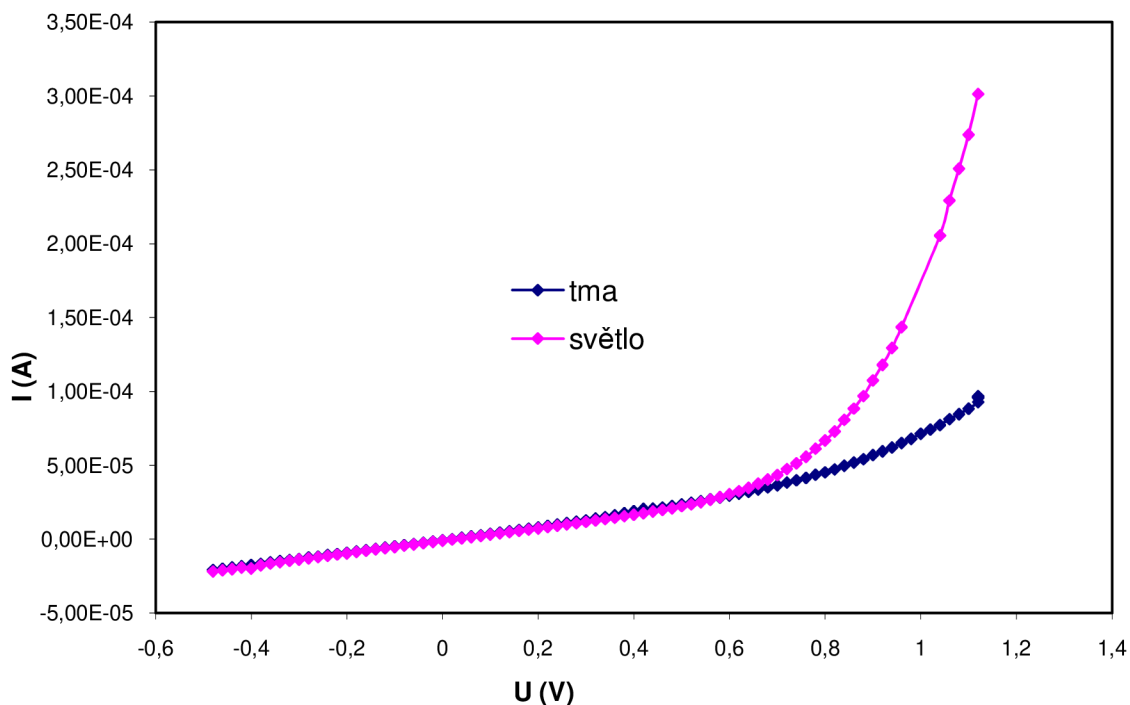
Graf 9 V-A charakteristika vzorku odsoleného Fc_{1-2} číslo 288 v inverzním uspořádání naměřená na elektrodě A při celkovém výkonu dopadajícím na elektrodu 0,0745mW



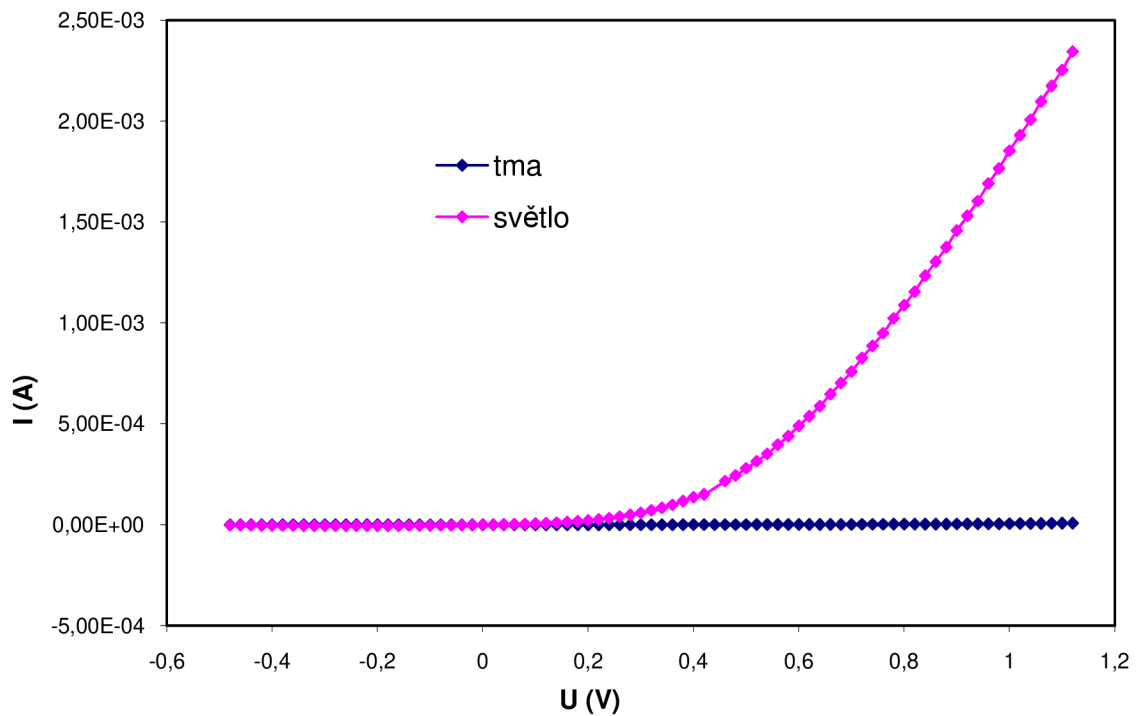
Graf 10 V-A charakteristika vzorku s odsoleným Fc_{1-2} číslo 290 v inverzním uspořádání naměřená na elektrodě D při celkovém výkonu dopadajícím na elektrodu 0,0745mW



Graf 11 V-A charakteristika vzorku s odsoleným Fc_{1-2} číslo 290 v inverzním uspořádání naměřená na elektrodě B při celkovém výkonu dopadajícím na elektrodu 0,0745mW



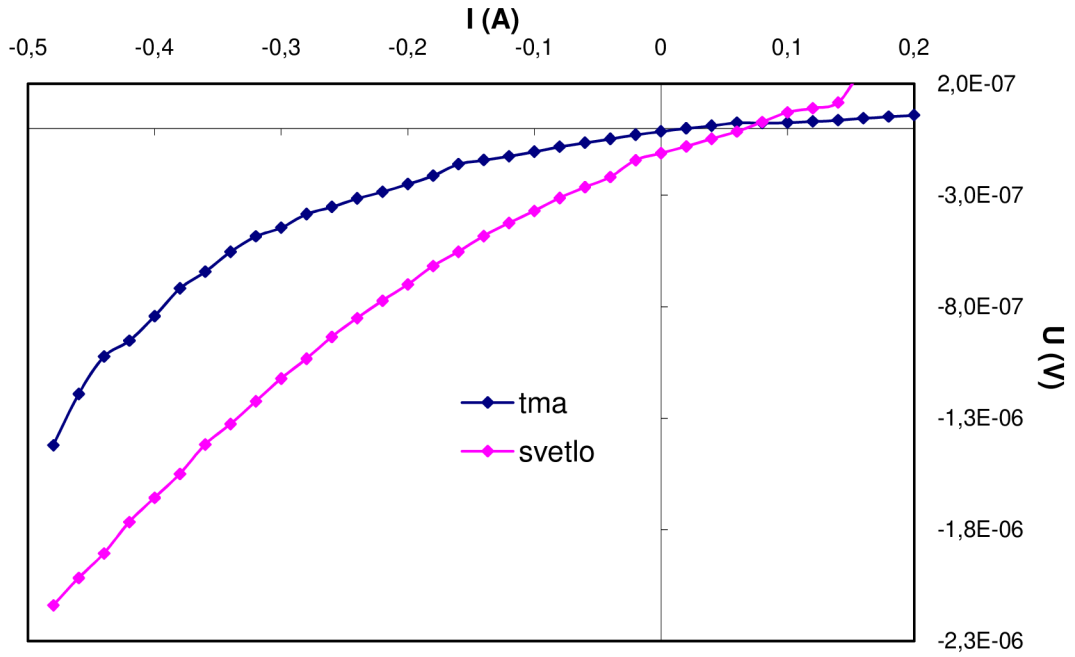
Graf 12 V-A charakteristika vzorku s odsoleným Fc_{1-2} číslo 290 v inverzním uspořádání naměřená na elektrodě F při celkovém výkonu dopadajícím na elektrodu 0,0745mW



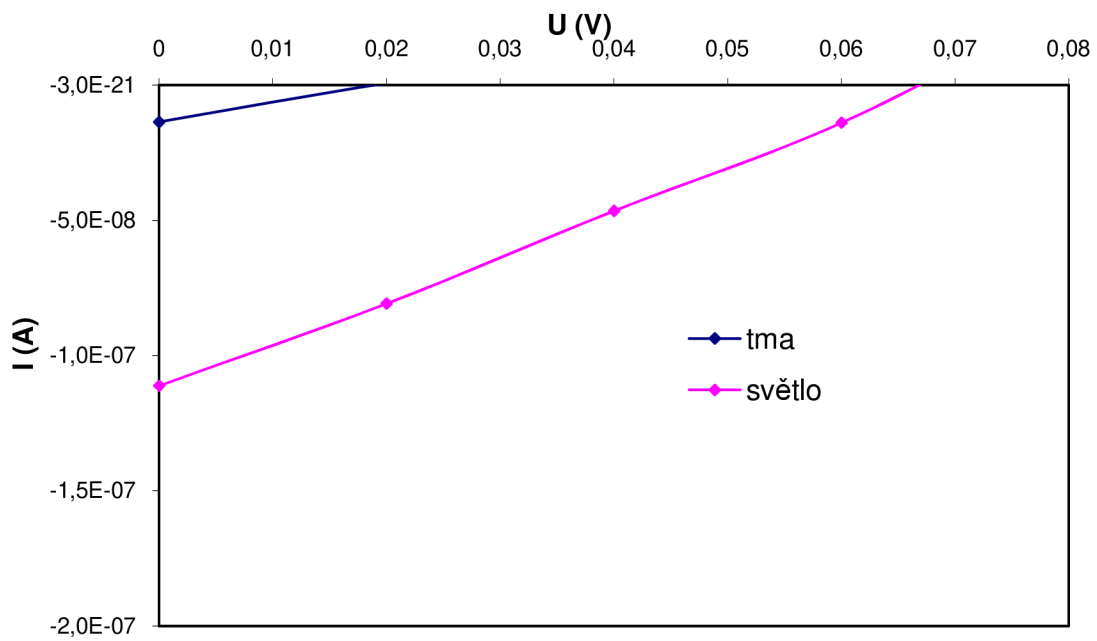
Graf 13 V-A charakteristika vzorku s odsoleným Fc_{1-2} číslo 290 v inverzním uspořádání naměřená na elektrodě G při celkovém výkonu dopadajícím na elektrodu $0,0745mW$

Z V-A charakteristik vzorků, které tvarem odpovídaly charakteristikám polovodiče a vykazovaly fotovodivost, byly vybrány ty, u nichž se vyskytoval fotovoltaiický jev. Následně pak mohl být vypočten maximální výkon P_{max} , faktor plnění FF a účinnost η . Vzhledem k tomu, že připravené vzorky jsou pouze prototypy solárních článků na, kterých se pouze zkoumá možná kombinace materiálů a uspořádání vrstev, jsou vypočtené hodnoty velmi nízké (viz Tab. 3). Charakteristiky vzorků, vykazujících fotovoltaiický jev a u nichž byly výše uvedené parametry vypočteny, představují grafy Graf 14 až Graf 17.

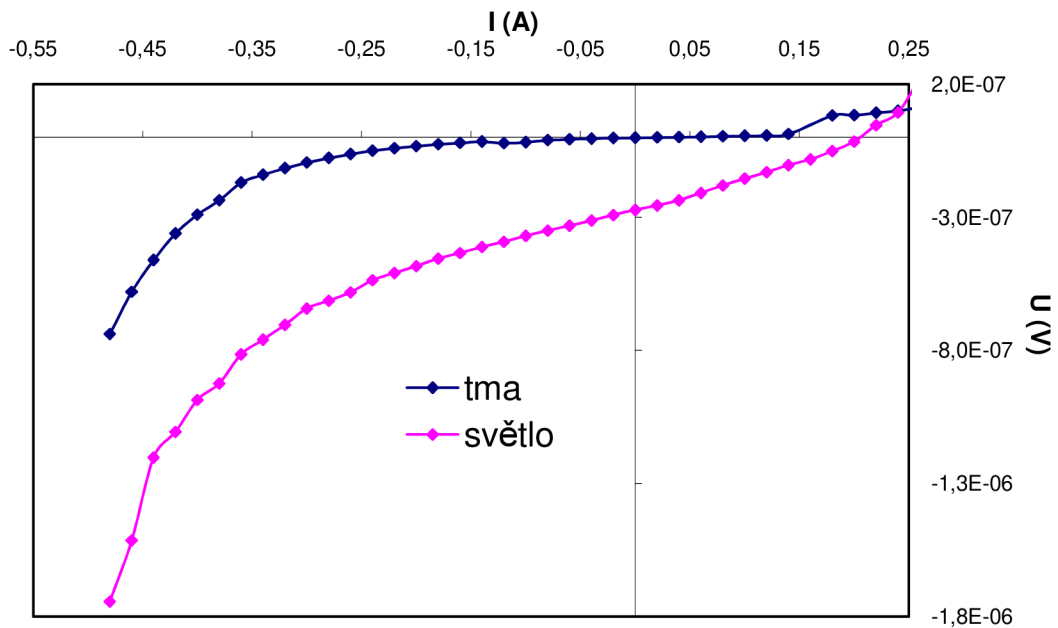
Všechny uvedené charakteristiky byly naměřeny na vzorcích s inverzní strukturou. Důvodem nestabilních charakteristik u vzorků s klasickou strukturou byly zřejmě již zmíněné nedokonalosti ve vytvořených tenkých vrstvách. Dalším důvodem by mohl být také fakt, že vrstva PEDOTu, potažmo i PCBM pokud byl použit, působila degračně na vrstvu aktivního Fc_{1-2} , což je u inverzní struktury odstraněno použitím TiO_2 .



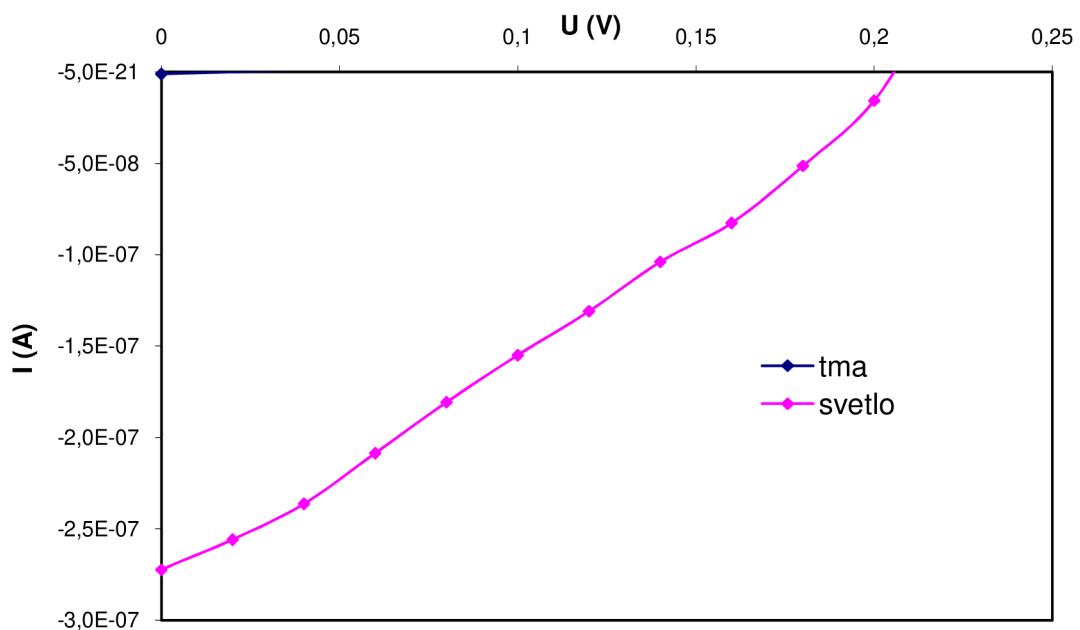
Graf 14 Graf V-A charakteristiky odsoleného Fc_{1-2} na vzorku č. 290 elektrodě B v inverzním uspořádání, omezený na 3. a 4. kvadrant. $P_0=0,0745mW$



Graf 15 Graf V-A charakteristiky odsoleného Fc_{1-2} na vzorku č. 290 elektrodě B v inverzním uspořádání, omezený 4. kvadrant kde je patrný fotovoltaický jev. $P_0=0,0745mW$



Graf 16 Graf V-A charakteristiky odsoleného Fc_{1-2} na vzorku č. 290 elektrodě D v inverzním uspořádání, omezený na 3. a 4. kvadrant. $P_0=0,0745mW$



Graf 17 Graf V-A charakteristiky odsoleného Fc_{1-2} na vzorku č. 290 elektrodě D v inverzním uspořádání, omezený 4. kvadrant kde je patrný fotovoltaický jev. $P_0=0,0745mW$

Vzorek	elektroda	Účinnost	FF	Isc[A]	Uoc[V]	I _{max} [V]	U _{max} [V]	P _{max} [W]
290	B	2.4973E-05	-2.5165E-01	-1.1118E-07	6.6467E-02	-4.6493E-08	4.0000E-02	1.8597E-09
	D	2.1094E-04	-2.8113E-01	-2.7243E-07	2.0510E-01	-1.3090E-07	1.2000E-01	1.5708E-08

Tab. 3 Vypočtené hodnoty účinnosti a faktoru plnění pro naměřené V-A charakteristiky vzorků ftalocyaninu Fc₁₋₂ vykazující fotovoltaický jev.

Příklad výpočtu:

Celkový výkon dopadající na elektrodu byl vypočten z plošného výkonu dodávaného xenonovou výbojkou (2,15 mW/cm²) a je roven P₀ = 0,0745mW. Průměr elektrody je 2,1mm a plocha S = π · r² = 3,4636mm².

I_{sc} = -1,1118 · 10⁻⁷ A - zkratový proud - odečteno z grafu

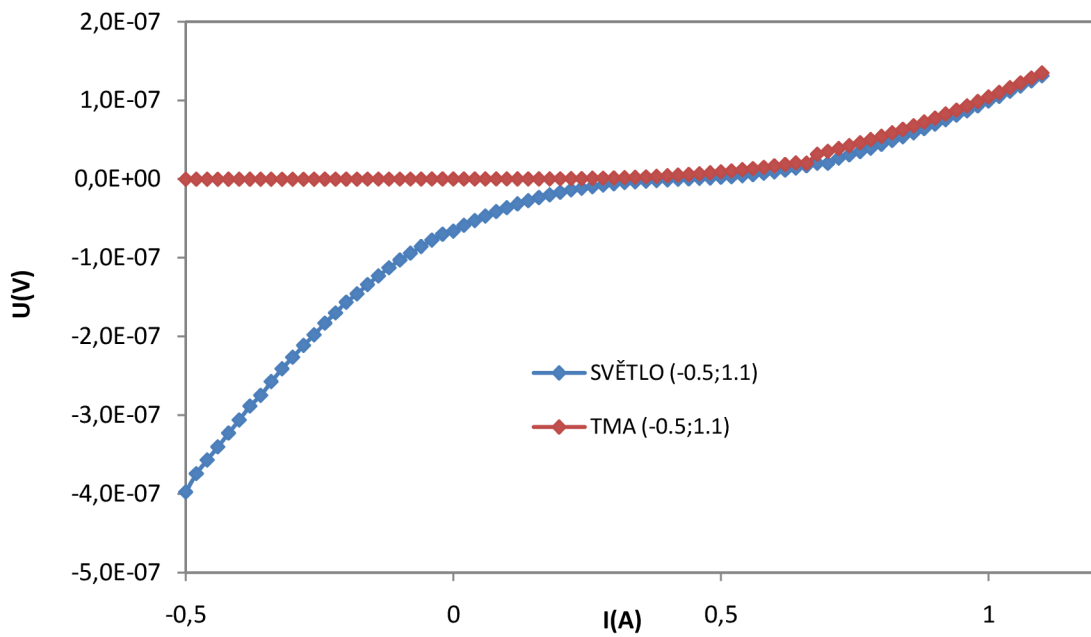
U_{oc} = 6,6467 · 10⁻² V – napětí naprázdno – vyjádřeno z regresní funkce

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_0} = \frac{|U_{\max} \cdot I_{\max}|}{P_0} = \frac{|-4,6493 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 10^{-2}|}{0,0745 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{2,4973 \cdot 10^{-5}}}$$

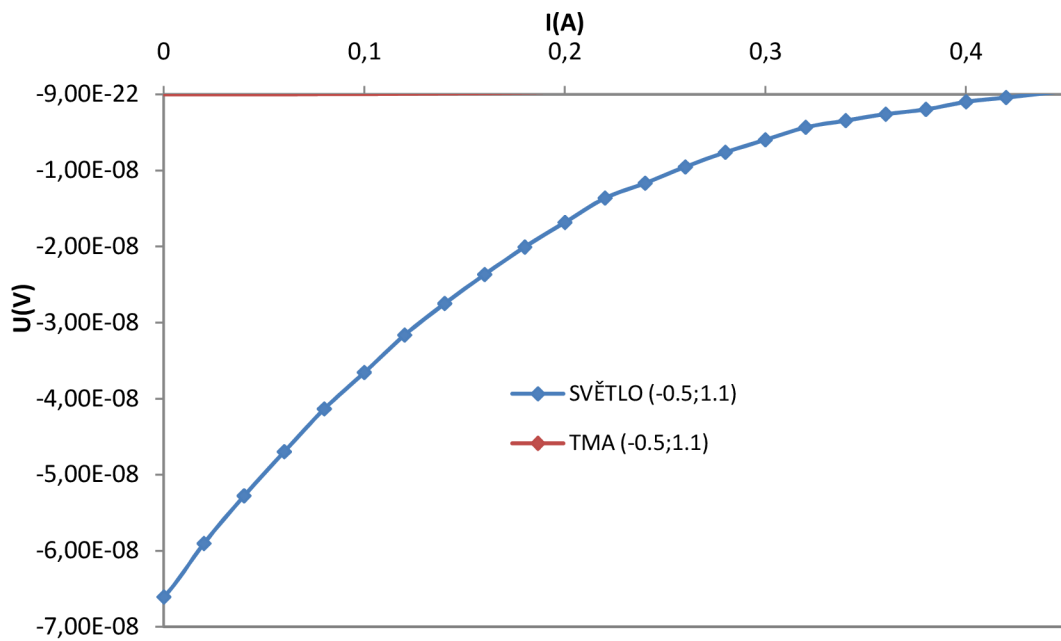
$$FF = \frac{P_{\max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{|-4,6493 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 10^{-2}|}{|-1,1118 \cdot 10^{-7} \cdot 6,6467 \cdot 10^{-2}|} = \underline{\underline{2,5165 \cdot 10^{-1}}}$$

2.5.3.2 Porovnání V-A charakteristik Fc₁₋₂ s P3HT

Materiál P3HT je již využíván pro výrobu komerčních solárních článků, které jsou využívány v aplikacích, kde použití anorganických křemíkových článků není vhodné nebo možné. Z tohoto důvodu byl také tento materiál zvolen jako referenční. Jeho V-A charakteristiky vykazují nízkou šumovost, vyplývající z dobře utvořené tenké vrstvy metodou rotačního lití. Na rozdíl od ftalocyaninu u P3HT lépe fungovala klasické uspořádání struktury vzorku. Naměřené charakteristiky jsou uvedeny v grafech (Graf 18 a Graf 19).



Graf 18 Graf V-A charakteristiky materiálu P3HT za tmy a za světla. $P_0 = 0,0745\text{mW}$



Graf 19 Předchozí graf V-A charakteristiky P3HT omezený na 4. kvadrant s patrným fotovoltaickým jevem. $P_0 = 0,0745\text{mW}$

Vzorek	elektroda	Účinnost	FF	Isc[A]	Uoc[V]	I _{max} [V]	U _{max} [V]	P _{max} [W]	P0[W/mm ²]
190	E	5.1662E-05	1.3436E-01	-6.6069E-08	4.3357E-01	-2.7492E-08	1.4000E-01	3.8488E-09	7.4500E-05

Tab. 4 Vypočtené hodnoty účinnosti a faktoru plnění pro naměřené V-A charakteristiky referenčního vzorku P3HT.

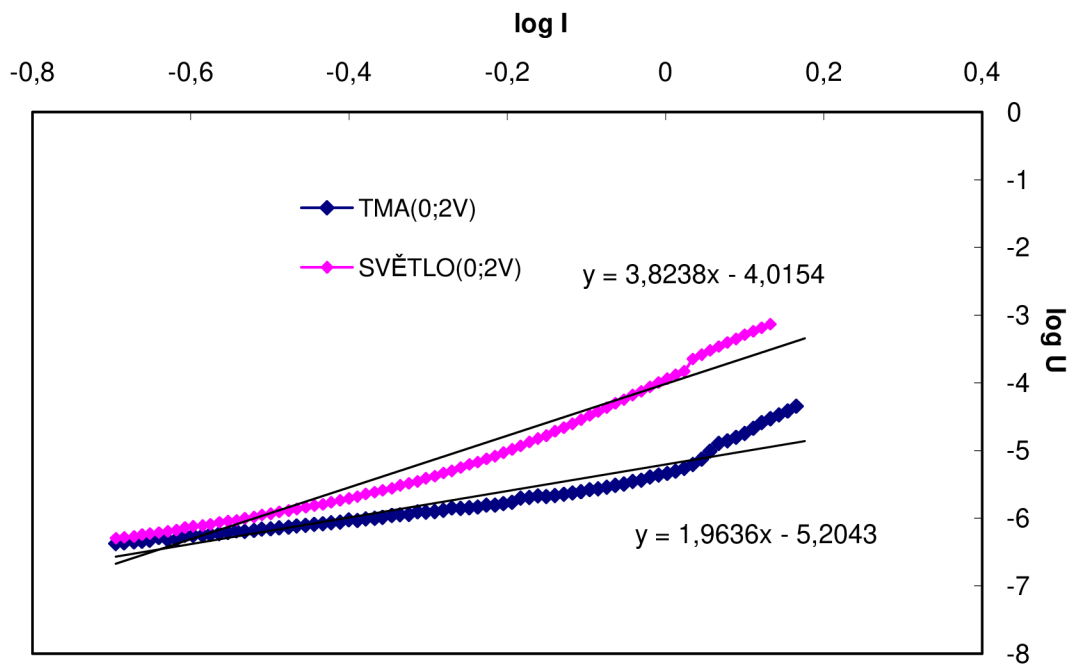
V porovnání s ftalocyaninem je patrné, že P3HT v propustném směru nedosahoval tak vysokých proudů, což souvisí s menší vlastní vodivostí vzorku. Vzorek P3HT vykazoval i nepatrně menší fotovoltaický jev, přestože absorpční spektrum P3HT se více kryje se spektrem vyzařovaným xenonovou výbojkou.

2.5.4 Vyhodnocení fotovodivosti

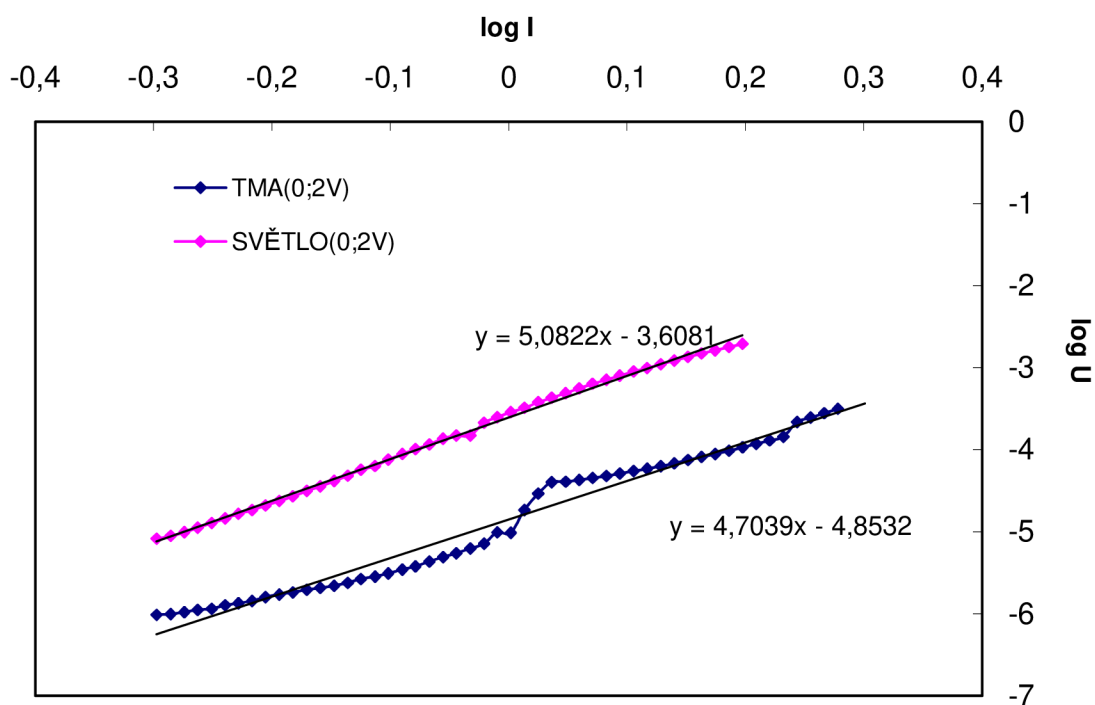
Z vybraných vzorků byl určen sklon daný koeficientem a z rovnice regrese $y = ax + c$. K tomuto účelu byly hodnoty proudu a napětí naměřených v propustném směru (0 – 2V) zlogaritmovány a vyneseny do grafu s lineárními osami, aby bylo možné přidat lineární rovnici regrese jak je vidět na grafech (viz Graf 20 až Graf 23). V tabulce 5 jsou pak uvedeny hodnoty odečtené z regresních rovnic V-A charakteristik pro dané vzorky.

Vzorek	elektroda	varianta měření	strmost	poměr strmosti (světlo/tma)
290	B	TMA	1.9636	1.9473
		SVĚTLO	3.8238	
	D	TMA	4.3309	1.1600
		SVĚTLO	5.0239	
288	A	TMA	1.1287	1.0071
		SVĚTLO	1.1367	
190(P3HT)	E	TMA	2.4340	1.2919
		SVĚTLO	3.1446	

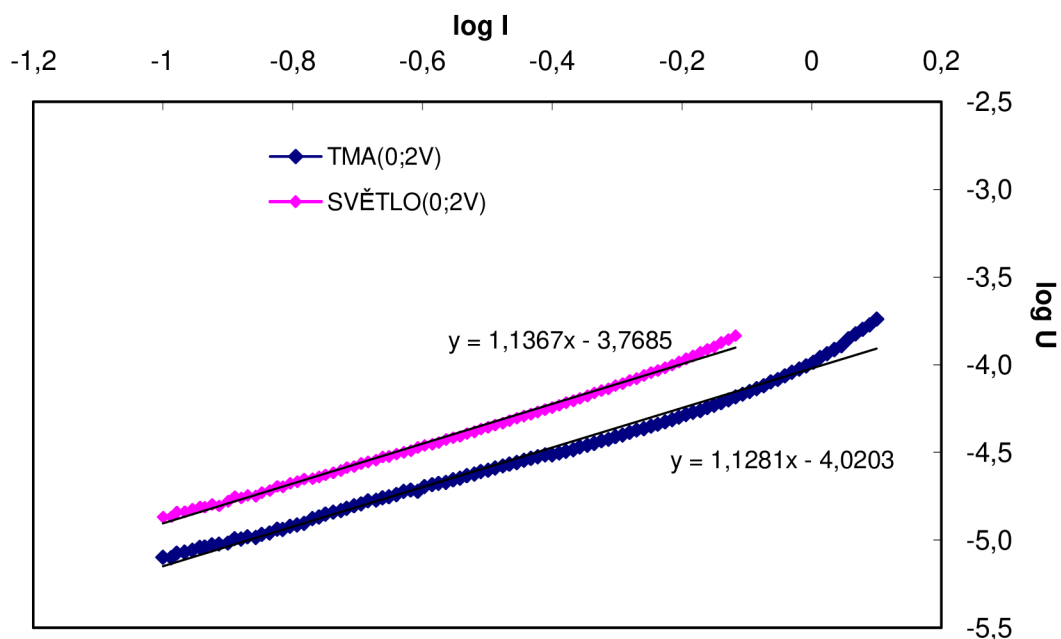
Tab. 5 Poměr strmostí charakteristik za tmy a za světla udává, kolikrát byla vyšší vodivost za světla než za tmy vlivem působení fotovodivosti.



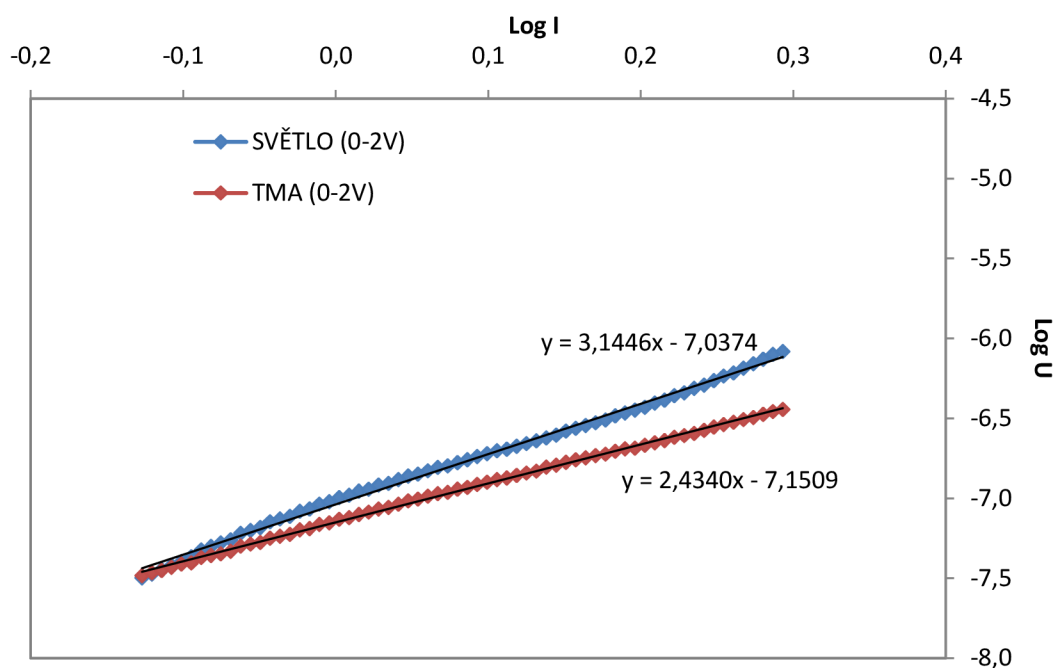
Graf 20 Vyhodnocení fotovodivosti vzorku 290 el. B – struktura s ftalocyaninem v inverzním uspořádání. $P_0 = 0,0745\text{mW}$



Graf 21 Vyhodnocení fotovodivosti vzorku 290 el. D – struktura s ftalocyaninem v inverzním uspořádání. $P_0 = 0,0745\text{mW}$



Graf 22 Vyhodnocení fotovodivosti vzorku 288 el. A – struktura s ftalocyaninem v inverzním uspořádání. $P_0 = 0,0745\text{mW}$



Graf 23 Vyhodnocení fotovodivosti vzorku 190 el. E – struktura s P3HT v klasickém uspořádání. $P_0 = 0,0745\text{m}$

3 ZÁVĚR

Organické solární články mají své nesporné výhody. Kromě snadnosti hromadné výroby je to také možnost vytvoření pružných solárních panelů nebo dokonce tkanin schopných vyrábět elektrickou energii. Mají však i své nevýhody jako například nízkou účinnost a také malou životnost, která je způsobena degradací organického materiálu vlivem absorpce světelného záření. Tyto nevýhody jsou jen momentální, protože vývoj v oblasti organických polovodičů ať již použitých na výrobu solárních článků či v jiných aplikacích, jde velmi rychle dopředu.

Hlavními cíli mé práce bylo seznámit se s problematikou týkající se využití organických polovodičů a jejich tenkých struktur v konstrukci solárních článků. V teoretické části byla provedena rešerše, ve které je věnována pozornost principu fotovoltaického jevu obecně a se zaměřením na jeho specifika u organických polovodivých materiálů.

V experimentální části byly připraveny prototypové struktury organických solárních článků z materiálu ftalocyanin Fc_{1-2} , na nichž byla provedena měření. Byl k dispozici také vzorek struktury s materiálem P3HT, který byl zvolen k porovnání, protože na této struktuře již bylo provedeno mnoho měření a jsou známy její optoelektrické vlastnosti. Úkolem bylo charakterizovat jejich optické a optoelektrické vlastnosti s využitím standardizovaných měřících metod. Tato měření zahrnovala metodu absorpční UV-VIS spektroskopie, fotoluminiscenční spektroskopie a měření V-A charakteristik.

V rámci absorpční spektroskopie bylo zjištěno, že materiál ftalocyanin Fc_{1-2} nejvíce absorbuje záření o vlnových délkách okolo 730nm. Tato vlastnost by mohla být potencionálně výhodná při konstrukci solárních článků s tandemovou strukturou v kombinaci s P3HT.

Z výsledků fotoluminiscenční spektroskopie bylo překvapivě zjištěno, že ftalocyanin Fc_{1-2} nevykazuje žádnou fluorescenci. Byly sice naměřeny určité průběhy, ty však pouze kopírovaly referenční měření na čistém substrátu bez vrstvy polymeru. Tato skutečnost je však velmi pozitivní, protože fluorescence není žádoucí z důvodů uvedených v kapitole.

Při měření V-A charakteristik bylo zjištěno, že použití ftalocyaninu ve struktuře s klasickým uspořádáním není příliš vhodné. Použitelné charakteristiky se podařilo naměřit pouze u vzorků s inverzní strukturou, kde byl jako materiál snižující výstupní práci elektronů při přestupu do vrstvy ITO použit TiO_2 . Materiál PEDOT užívaný v klasické struktuře, působí degradaci vrstvy ftalocyaninu, a tedy tato kombinace není vhodná. Při měření charakteristik v propustném směru inverzní struktury dosahovaly vysokých proudů (i několik mA), aniž by došlo k jejich destrukci. To značí dobrou vodivost těchto struktur.

Z výsledků měření je možné vyvodit následující. Protože ftalocyanin absorbuje na rozhraní červeného a infračerveného spektra, je vhodné jej kombinovat např. s P3HT. Při použití ftalocyaninu v klasické struktuře je nutné zvolit jiný materiál než PEDO snižující výstupní práci nosičů náboje při přestupu do ITO elektrody.

4 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Janssen, R.: Introduction to polymer solar cells, dostupné z [www:
http://user.chem.tue.nl/janssen/SolarCells/Polymer%20solar%20cells.pdf](http://user.chem.tue.nl/janssen/SolarCells/Polymer%20solar%20cells.pdf)
- [2] Fotovoltaický článek [cit. 2010-10-22], dostupné z [www:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8DI%C3%A1nek](http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8DI%C3%A1nek)
- [3] Přeměna sluneční energie na elektrickou [cit. 2008-10-22], dostupné z [www:
http://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou](http://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou)
- [4] Princip fotovoltaického jevu [cit. 2008-3-15], dostupné z [www:
http://server.solartec.cz/clanek.php?CLANEK=26](http://server.solartec.cz/clanek.php?CLANEK=26)
- [5] Bc. Petr Okrajek: Fotoelektrický jev, soubor pdf
- [6] Polymerové solární články - nový směr vývoje [cit. 2008-11-10], dostupné z [www:
http://automatizace.hw.cz/polymerove-plastove-solarni-clanky-novy-smer-vyvoje](http://automatizace.hw.cz/polymerove-plastove-solarni-clanky-novy-smer-vyvoje)
- [7] Petritsch, Klaus: Organic Solar Cell Architectures, PhD práce, Cambridge and Graz, červenec 2000
- [8] Nunzi, Jean-Michel, Organic photovoltaic materials and devices, soubor pdf
- [9] Šedina, Martin: Fotovodivé organické látky - Fakulta chemická VUT v Brně, soubor pdf
- [10] Weiter, Martin, Latest achievements in organic semiconductors for future electronic device, soubor pdf
- [11] Fotovoltaika pro každého [cit. 2010-3-29] dostupné z [www:
http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika](http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika)

5 SEZNAM SYMBOLŮ

E_{\max}	[eV]	maximální energie fotoelektronu
E	[eV]	velikost kvanta energie
h	[eV.s ⁻¹]	Planckova konstanta
f	[Hz]	frekvence
\hbar	[eV.s ⁻¹]	redukována Planckova konstanta
E_K	[J]	kinetická energie elektronu
U_{oc}	[V]	napětí naprázdno
G	[W.m ⁻²]	výkonová hustota osvětlení
J_{sc}	[A.m ⁻²]	proudová hustota obvodu nakrátko
c	[m.s ⁻¹]	rychlost světla
S	[m ²]	plocha článku
I_L	[A]	fotoproud
R_L	[Ω]	odpor zátěže
T	[$^{\circ}K$]	teplota
R_S	[Ω]	ztráty při migraci nosičů náboje
R_{SH}	[Ω]	ztráty při rekombinaci nosičů blízko místa oddělení
I_S	[A]	proud nakrátko