

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta chemická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2023

Marko Varchenko



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

## ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

# STUDIUM NOVÝCH MATERIÁLŮ PRO ORGANICKÉ SOLÁRNÍ ČLÁNKY

INVESTIGATION OF NOVEL MATERIALS FOR ORGANIC SOLAR CELLS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marko Varchenko

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matouš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO 2023

## Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1858/2022 Akademický rok: 2022/23  
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie  
Student: **Marko Varchenko**  
Studijní program: Chemie a chemické technologie  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Matouš Kratochvíl, Ph.D.**

### Název bakalářské práce:

Studium nových materiálů pro organické solární články

### Zadání bakalářské práce:

1. Prostudujte relevantní literární zdroje a sestavte rešerši shrnující současný stav poznání o přípravě organických solárních článků, zejména o používaných materiálech.
2. Připravte tenké vrstvy studovaných a referenční materiálů (nízkomolekulární a polymerní organické polovodiče).
3. Charakterizujte vlastnosti připravených tenkých vrstev, zejména optické vlastnosti, tloušťku, atp.
4. Připravte organické solární články na bázi studovaných a referenční materiálů a porovnejte jejich účinnost.

### Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2023:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

-----  
Marko Varchenko  
student

Ing. Matouš Kratochvíl, Ph.D.  
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2023

-----  
prof. Ing. Michal Veselý, CSc.  
děkan

## **Abstrakt**

Cílem práce je sestavení rešerši o současném stavu poznání o přípravě organických solárních článků, zejména o používaných materiálech, příprava tenkých vrstev a organických solárních článků ze studovaného a referenčních materiálů, charakterizace vlastností připravených vrstev a článků (optické vlastnosti, tloušťka a voltampérová charakteristika). V teoretické části jsou popsány hlavně organické solární články, jejich struktura, princip fungování a použité materiály. V Experimentální části jsou popsány výroba organických solárních článků, použité metody při výrobě, vzniklé problémy a dilemata, a rovněž vysvětleny metody pro charakterizace vlastnosti vrstev a článků. Výsledkem je zjištění závislosti mezi jednotlivé vlastností vrstev, optimalizace výroby článků pomoci referenčních materiálů a výroba sérii se studovaným materiálem, který bude ohodnocen pomoci voltampérové charakteristiky.

**Klíčová slova:** Solární články, organické polovodiče, donorní materiály, heteropřechod, spin-coating.

## **Abstract**

The aim of the work is to compile a review of the current state of knowledge on the preparation of organic solar cells, in particular on the materials used, the preparation of thin films and organic solar cells from the studied and reference materials, the characterization of the properties of the prepared layers and cells (optical properties, thickness and voltammetric characteristics). The theoretical part mainly describes the organic solar cells, their structure, principle of operation and the materials used. The experimental part describes the fabrication of organic solar cells, the methods used in the fabrication, the problems and dilemmas encountered, and also explains the methods for characterizing the properties of the layers and cells. As a result, the dependence between the individual layer properties is established, the cell production is optimized using reference materials and the production of a series with the studied material is evaluated using voltammetry characterization.

**Keywords:** Solar cells, organic semiconductors, donor materials, heterojunction, spin-coating.

## Citace

VARCHENKO, Marko. *Studium nových materiálů pro organické solární články* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/148970>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Matouš Kratochvíl.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....  
podpis studenta

## Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu mojí bakalářské práce Ing. Matouši Kratochvílu Ph.D. za cenné rady, všestrannou pomoc každodenně při jejím vypracování a nádhernou spolupráci, která otevřela mí nové horizonty.

## Obsah

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Úvod.....  | 1  |
| 2   | Teoretická část .....  | 2  |
| 2.1 | Fotovoltaika .....   | 2  |
| 2.2 | Generace solárních článků.....                                 | 3  |
| 2.3 | Rozdíl mezi organickými a anorganickými solárními články ..... | 4  |
| 2.4 | Struktura solárních článků .....                               | 5  |
| 2.5 | Princip funkce.....  | 8  |
| 2.6 | Materiály:.....  | 10 |
| 2.7 | Metody nanášení tenkých vrstev .....                           | 12 |
| 3   | Experimentální část.....                                       | 14 |
| 3.1 | Postup výroby .....  | 14 |
| 3.2 | Enkapsulace článků .....                                       | 15 |
| 3.3 | Metody charakterizace.....                                     | 15 |
| 3.4 | Postupy výroby sérií OSC .....                                 | 19 |
| 4   | Výsledky a diskuze .....                                       | 20 |
| 4.1 | Studované vzorky .....   | 20 |
| 4.2 | Měření tloušťky.....   | 21 |
| 4.3 | Optické vlastností .....                                       | 22 |
| 4.4 | Solární články .....   | 24 |
| 5   | Závěr .....  | 1  |
| 6   | Seznam použitých zdrojů:.....                                  | 3  |

# 1 Úvod

V současné době je energetická otázka obzvláště naléhavá, lidé usilují o šetrné nakládání s energiemi a nejúčinnější způsoby (například tepelné elektrárny) využívají neobnovitelné zdroje (ropa, plyn, uhlí), které mají dopad na životní prostředí i při těžbě a přepravě. Dále vznikají ekologické problémy, protože při spalování fosilních paliv dochází k emisi CO<sub>2</sub>, dusíku, sloučenin síry a dalších škodlivých pro ovzduší látek, které ničí atmosféru Země a způsobují skleníkový efekt a globální oteplování. Proto se lidstvo snaží najít způsoby získávat energii z obnovitelných zdrojů jako jsou například vítr, voda, bioplyn, geotermální energie nebo slunečná energie.

Slunečná energie se vyrábí ve Slunci během termonukleárních procesů a je mnohofunkční. Existuje několik hlavních metod využití slunečné energie, například – ohřev vody nebo stěn (využití tepelných vlastností) nebo získání elektrického proudu pomocí fotovoltaického jevu (využití tepelných vlastností). Pro poslední slouží různé typy solárních článků.

Solární články patří do oblastí fotovoltaiky, která se zabývá přeměnou slunečné energie na elektrickou s využitím fotovoltaického jevu. Organické solární články (OSC) se staly slibným kandidátem na udržitelnou výrobu energie díky své nízké ceně, nízké hmotnosti a flexibilitě. Klíčovou složkou OSC je aktivní vrstva, která je zodpovědná za absorpci slunečního světla a generování elektrického proudu. Hledání nových materiálů s lepšími vlastnostmi pro OSC stále pokračuje a podnítilo vývoj nových typů organických polovodičů, polymerů a malých molekul. Výkonnost OSC silně závisí na vlastnostech materiálů aktivní vrstvy, včetně jejich absorpčního koeficientu, délky difúze excitonů a pohyblivosti nosičů. Studium nových materiálů pro OSC má zásadní význam pro zlepšení účinnosti a stability těchto zařízení a pro jejich komerční využitelnost. V této studii jsou zkoumány vlastnosti a potenciál nových materiálů pro OSC se zaměřením na vývoj účinnějších, stabilnějších a cenově výhodnějších zařízení. Tento výzkum může prospět probíhajícímu úsilí o přechod na udržitelnou energetiku a poskytnout poznatky pro vývoj technologií solárních článků nové generace.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Fotovoltaika

Fotovoltaická (FV) technologie je rychle se rozvíjejícím oborem obnovitelné energie, který pracuje se solárními články k přímé přeměně slunečního světla na elektrinu. Fotovoltaické systémy lze použít ve více oblastech, od malých obytných a komerčních instalací až po velké elektrárny.

Existuje několik typů fotovoltaických technologií, z nichž každá má své výhody a nevýhody. Nejběžnějšími typy fotovoltaické technologie jsou [4]:

- 1) Krystalický křemík (c-Si): c-Si je nejrozšířenějším typem fotovoltaické technologie, který tvoří více než 90 % světového trhu s fotovoltaickými technologiemi. Skládá se z destiček vysoce vyčištěného křemíku, které se spojují do solárních článků. c-Si články jsou vysoce účinné a jejich účinnost přeměny se obvykle pohybuje v rozmezí 15 až 22 procent.[11]
- 2) Tenkovrstvá fotovoltaika: využívá k výrobě solárních článků tenké vrstvy polovodičových materiálů, jako je tellurid kadmia (CdTe), selenid mědi a galia (CIGS) nebo amorfní křemík (a-Si). Tenkovrstvé články jsou méně účinné než články c-Si, ale jejich výroba je levnější, a takové články jsou flexibilnější.
- 3) Koncentrovaná fotovoltaika (CPV): využívá čočky nebo zrcadla k soustředění slunečního světla na malou plochu vysoce účinných solárních článků. Systémy CPV mohou dosahovat velmi vysoké účinnosti přeměny, až 37 % [28], ale jejich výroba je složitější a dražší než u jiných fotovoltaických technologií.

Fotovoltaická technologie má širokou škálu využití, od malých obytných a komerčních instalací až po velké elektrárny. Mezi nejběžnější aplikace fotovoltaické technologie patří např: solární energie pro obytné prostory a komerční účely (solární panely, instalované na střechy budov); napájení mimo síť: fotovoltaické systémy lze použít k napájení odlehklých míst, jako jsou chaty, lodě a karavany, kde není přístup k síti; napájení ze sítě: Fotovoltaické systémy lze také připojit k síti, což umožňuje prodej nevyužité energie zpět energetické společnosti. [3]

#### 2.1.1 Fotovoltaický jev

Fotovoltaický jev je proces, při kterém se sluneční světlo přeměňuje na elektrickou energii. Tento jev je základem fungování solárních článků, což jsou zařízení, která vyrábějí elektrickou energii přímo ze slunečního světla. Tento byl poprvé objeven v roce 1839 francouzským fyzikem Alexandrem-Edmondem Becquerelem, který pozoroval, že určité materiály produkují elektrický proud, když jsou vystaveny světlu. A. Einstein v roce 1917 zavedl představu o světelném kvantu fotonů, které mají svou energii

$$\varepsilon = h \cdot \nu$$

a svou hybnost

$$p = \frac{h \cdot \nu}{c_0}$$

tyto fotony mají nulovou hmotnost.[6] Písmenem  $h$  je označena Planckova konstanta  $c_0$  a je



rychlost světla ve vakuu,  $v$  je frekvence [7]

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$c_0 = 299799458 \text{ m} \cdot \text{s}$$

Intenzita dopadajícího světla je úměrná počtu elektronů vyzářených z materiálu a energie fotonů je určena množstvím vyzařovaného světla.[3]

K fotovoltaickému jevu dochází v důsledku interakce světla s polovodičovými materiály, což jsou materiály, které mají jak vlastnosti izolátorů, tak i vodičů. Když je polovodič vystaven světlu, fotony světla jsou absorbovány a energie fotonů je předána elektronům v materiálu. V důsledku se elektrony přesunou ze svých původních pozic a začnou se volně pohybovat materiálem. Pohyb těchto volných elektronů vytváří rozdíl potenciálů neboli napětí na polovodičovém materiálu. Toto napětí lze měřit jako elektrický proud a je základem fungování solárních článků.

Úlohou této práce je použití fotovoltaického jevu v solárních článcích. Základní struktura solárního článku se skládá z polovodičového materiálu, obvykle křemíku, který je vložen mezi dvě vrstvy vodivého materiálu, například kovu. Když sluneční světlo dopadá na polovodičový materiál, energie fotonů se absorbuje a elektrony se uvolní, aby se pohybovaly materiálem. Elektrony jsou po uvolnění zachyceny vodivými vrstvami, které generují elektrický proud, který lze použít k napájení externích zařízení nebo uložit do baterií.[5]

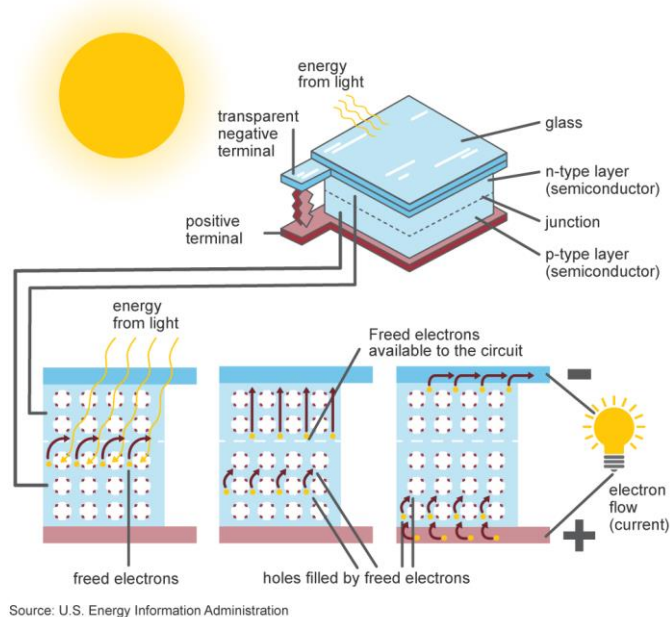
### **2.1.2 Procesy fotoelektrické přeměny sluneční energie**

Solární fotoelektrická přeměna energie probíhá v polovodičovém materiálu, který je obvykle dopován příměsmi, aby se vytvořily p-n přechody.[8] P-n přechod funguje jako bariéra pro tok elektronů a vytváří rozdíl potenciálů, který při osvětlení fotony pohání tok elektronů. Když jsou fotony absorbovány polovodičovým materiálem, elektrony v materiálu jsou excitovány na vyšší energetické hladiny. Vznikají tak volné elektrony, které lze shromažďovat a využívat k výrobě elektrické energie.

Účinnost procesu solární fotoelektrické přeměny energie je ovlivněna několika faktory, včetně tloušťky materiálu a kvality spoje. Pásová struktura v materiálu určuje rozsah vlnových délek světla, které může materiál absorbovat. Tloušťka materiálu určuje vzdálenost, kterou mohou volné elektrony urazit, než rekombinují s dírami, zatímco kvalita přechodu ovlivňuje rychlost rekombinace elektronů.[3]

Tento proces zahrnuje několik kroků:

## Inside a photovoltaic cell



Obrázek 1: Proces fotoelektrické přeměny sluneční energie převzato z [29]

- 1) Absorpce slunečního světla: Solární články jsou vyrobeny z polovodičových materiálů, jako je křemík nebo fullerén, které jsou schopny absorbovat fotony slunečního světla. Když jsou fotony absorbovány, předají svou energii elektronům v materiálu, čímž je posunou z valenčního pásu do vodivostního, kde se mohou volně pohybovat.
- 2) Vznik párů elektron-díra: Když je elektron excitován do vodivostního pásu, zanechává za sebou kladně nabitou díru ve valenčním pásu. Absorpcí každého fotonu vzniká jeden pár elektron-díra.
- 3) Oddělení párů elektron-díra: V solárním článku se k oddělení párů elektron-díra obvykle používá p-n přechod. Materiál typu p má přebytek děr, zatímco materiál typu n má přebytek elektronů. Když jsou oba materiály v kontaktu, vytvoří se vestavěné elektrické pole, které oddělí elektrony a díry.
- 4) Sběr nosičů náboje: Oddělené nosiče náboje, tj. elektrony a díry, se pohybují směrem k příslušným elektrodám, které jsou obvykle vyrobeny z vodivých kovů, jako je stříbro nebo hliník. Při pohybu vytvářejí tok elektrického proudu.
- 5) Přeměna proudu: Tok elektrického proudu lze použít k napájení elektronických zařízení nebo uložit do baterie pro pozdější použití. [18]

## 2.2 Generace solárních článků

Solární články prošly od svého vzniku v 50. letech minulého století dlouhou cestou. V průběhu let došlo k významnému pokroku ve vývoji technologie solárních článků, což vedlo ke vzniku několika generací solárních článků. Každá generace má své jedinečné vlastnosti a výhody.

### 2.2.1 První generace

Solární články první generace, známé také jako solární články na bázi destiček, jsou vyrobeny z krystalického křemíku, který je nejpoužívanějším polovodičovým materiálem v

průmyslu solárních článků. Tyto solární články mají relativně nízkou účinnost, která se obvykle pohybuje od 14 % do 22 % [11]. Solární články první generace jsou tuhé a těžké, což komplikuje jejich instalaci na nerovné povrchy.

### 2.2.2 Druhá generace

Solární články druhé generace, známé také jako tenkovrstvé solární články, jsou vyrobeny z polovodičových materiálů, které jsou nanášeny v tenkých vrstvách na substrát. Nejčastěji používanými materiály pro tenkovrstvé solární články jsou telurid kadmia, selenid mědi a galia nebo amorfni křemík. Účinnost tenkovrstvých solárních článků se pohybuje od 6 do 18 % [12], jsou lehké a flexibilní, proto jsou vhodné pro různé aplikace.

### 2.2.3 Třetí generace

Solární články třetí generace jsou stále ve fázi výzkumu a vývoje. Tyto solární články jsou navrženy tak, aby překonaly omezení solárních článků první a druhé generace využitím nových materiálů a technologií. Mezi zkoumané materiály pro solární články třetí generace patří organické polymery, kvantové tečky a perovskitové materiály. Tyto solární články mají potenciál dosažení vyšší účinnosti než solární články druhé generace a očekává se, že jejich výroba bude levnější. [9][10]

## 2.3 Rozdíl mezi organickými a anorganickými solárními články

Organické a anorganické solární články se liší hlavně svými materiály, výrobním postupem a výkonnostními charakteristikami. Zde jsou některé z hlavních rozdílů:

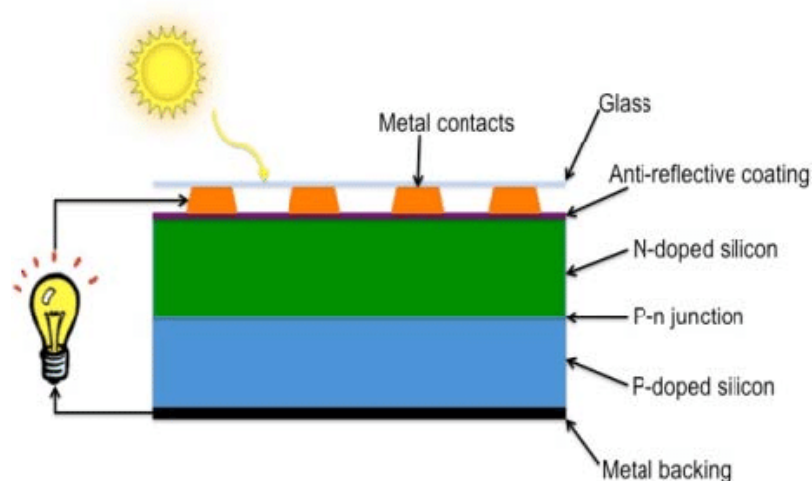
- 1) Materiály: Organické solární články používají jako aktivní vrstvu organické materiály, jako jsou polymery a malé molekuly, zatímco anorganické solární články používají jako aktivní vrstvu anorganické materiály, jako je křemík, telurid kadmia a selenid mědi a galia. Díky použití organických materiálů v solárních článcích jsou tyto články flexibilní, lehké a jejich výroba je potenciálně levnější než výroba anorganických solárních článků.
- 2) Výrobní proces: Výrobní proces organických solárních článků je obvykle levnější a méně energeticky náročný než proces výroby anorganických solárních článků. Organické solární články lze vyrábět pomocí tisku nebo potahování, zatímco anorganické solární články vyžadují vysokoteplotní zpracování a složitá výrobní zařízení.
- 3) Účinnost: Anorganické solární články mají obecně vyšší účinnost než organické solární články. Nejvyšší dosud dosažená účinnost organických solárních článků se pohybuje kolem 17 %, zatímco anorganické solární články dosahují účinnosti až 46 % [13].
- 4) Stabilita: Anorganické solární články jsou obecně stabilnější než organické solární články. Organické materiály jsou náchylnější k degradaci vlivem vlhkosti, kyslíku a UV záření, což může omezit jejich dlouhodobou stabilitu a životnost. Anorganické solární články jsou také odolnější vůči teplotním výkyvům a je u nich menší pravděpodobnost, že se časem znehodnotí.
- 5) Náklady: Organické solární články mohou být levnější než anorganické solární články díky nižším výrobním nákladům a možnosti velkoplošné a levné výroby pomocí tisku nebo potahování.
- 6) Aplikace: Organické solární články jsou ideální pro určité aplikace, například pro napájení zařízení s nízkou spotřebou energie, nositelnou elektroniku a fotovoltaiku

integrovanou do budov. Anorganické solární články jsou vhodnější pro aplikace, které vyžadují vysokou účinnost a trvanlivost, například pro výrobu solární energie ve velkém měřítku.

Celkově mají organické i anorganické solární články své výhody i nevýhody a volba mezi nimi závisí na konkrétní aplikaci a požadavcích na výkon. [13]

## 2.4 Struktura solárních článků

### 2.4.1 Obecná struktura anorganických solárních článků



Obrázek 2: Obecná struktura anorganických solárních článků převzato z [15]

Obecná struktura solárního článku zahrnuje několik vrstev materiálů, které společně vytvářejí elektrickou energii. Zde je stručný popis jednotlivých vrstev pro klasický křemíkový solární článek:

- 1) Přední kontaktní vrstva: Tato vrstva je obvykle tvořena tenkou vrstvou kovu, například stříbra nebo hliníku, a její hlavní funkcí je shromažďovat elektrony generované solárním článkem.
- 2) Antireflexní vrstva: Tato vrstva se nanáší na povrch solárního článku, aby se snížilo množství světla odraženého od článku. Obvykle je vyrobena z materiálu, jako je nitrid křemíku nebo oxid titaničitý.
- 3) Vrstva typu N: Tato vrstva je dopována nečistotami, například fosforem, aby se vytvořil přebytek volných elektronů.

P-n přechod: mezivrstva, která vzniká mezi vrstvou N typu a P typu, tady dochází k rozdělení děr a elektronů, které potom jdou do elektrod

- 4) Vrstva typu P: Tato vrstva je dopována příměsmi, například bórem, a vytváří tak přebytek kladně nabitých děr
- 5) Vrstva zadního kontaktu: Tato vrstva je obvykle tvořena tenkou vrstvou kovu, jako je stříbro nebo hliník, a její hlavní funkcí je shromažďovat díry generované solárním článkem.
- 6) Substrát: Tato vrstva je základním materiálem, na kterém je solární článek vyroben, obvykle z křemíku.

Když sluneční světlo dopadá na solární článek, excituje elektrony ve vrstvě typu n a způsobuje jejich pohyb směrem k vrstvě typu p. Současně se díry ve vrstvě typu p pohybují

směrem k vrstvě typu n. Pohyb elektronů a děr vytváří tok elektrického proudu, který se shromažďuje v přední a zadní kontaktní vrstvě a používá se k napájení elektronických zařízení nebo se ukládá do baterie pro pozdější použití. Účinnost solárního článku závisí na použitých materiálech, struktuře a výrobním procesu. [14]

### 2.4.2 Struktura organických solárních článků

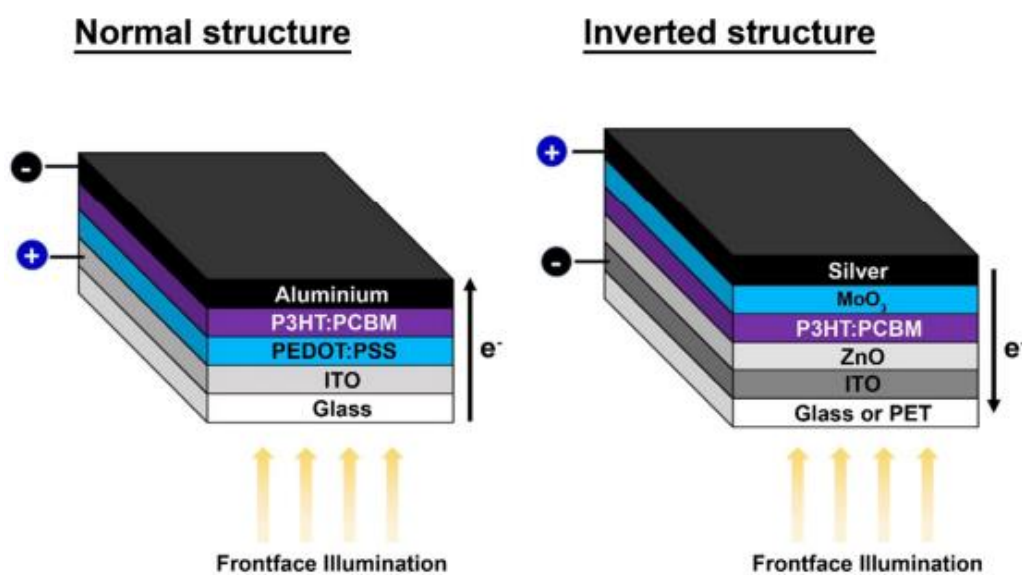
Struktura organických článků (OSČ) je podobná struktuře anorganických, také má vrstvý charakter, ale vrstvy jsou odlišné, a proto i princip funkce OSČ je mírně odlišný, standardní OSČ by měl obsahovat:

- 1) Substrát: báze, na které se nanášejí ostatní vrstvy.
- 2) Transparentní vodivý oxid (Transparent Conductive Oxide (TCO)): Průhledná vrstva, která je umístěna na substrátu. Umožňuje průchod světla k aktivní vrstvě solárního článku a slouží také jako elektroda pro sběr generovaných elektronů. Nejčastěji používaným materiálem TCO je oxid india a cínu (ITO).
- 3) Vrstva pro přenos děr (Hole Transport Layer (HTL)): tenká vrstva organického materiálu, která pomáhá přenášet díry z aktivní vrstvy do elektrod.
- 4) Aktivní vrstva: hlavní vrstva v OSČ, kde probíhá proces absorpce světla a generace elektronů a děr.
- 5) Transportní vrstva elektronů (Electron Transport Layer (ETL)): Tenká vrstva organického materiálu, která pomáhá přenášet elektrony z aktivní vrstvy do elektrod.

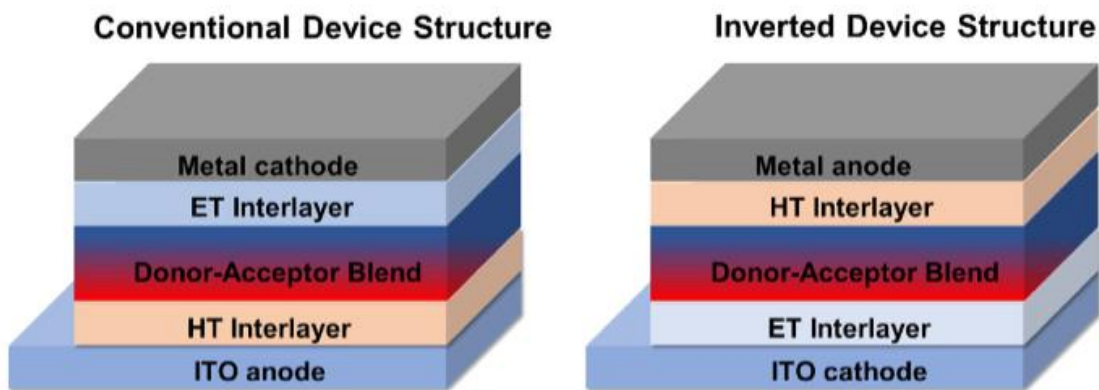
\*Poznámka: Transportní vrstvy se také nazývají pomocné vrstvy, protože pouze pomáhají přenášet elektrony a díry z aktivní vrstvy do elektrod, a tak OSČ nemusí obsahovat nějakou TL

- 6) Kovová elektroda: Vrstva kovu, která je umístěna na horní straně vrstvy ETL. [18]

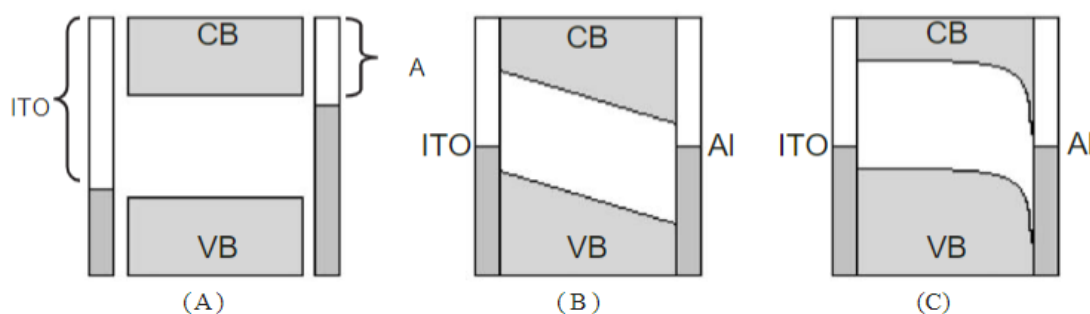
Podle pořadí těchto vrstev se rozlišují dva typy struktur: klasická a inverzní



Obrázek 3: Schematické zobrazení dvou příkladů klasické a inverzní struktury OSČ [18]



Obrázek 4: Schematické porovnání klasické a inverzní struktury OSC převzato z [39]



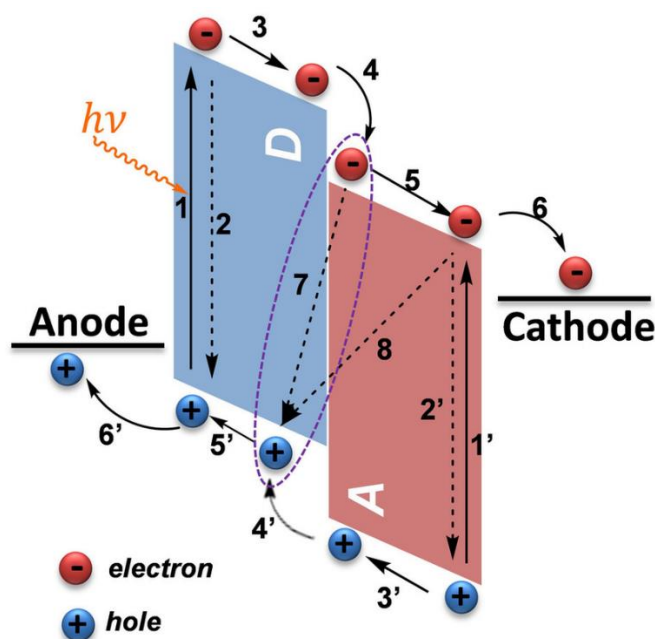
Obrázek 5: Vytvoření gradientu mezi ITO a kovem v OSC, zakřivení valenčního a vodivostního pasu. Relativní energetické hladiny elektrod CB a VB jsou zobrazeny ve třech situacích bez vnějšího předpětí. (A) CB a VB jsou zobrazeny spolu s elektrodou s nízkou pracovní funkcí (Al) a elektrodou s vysokou pracovní funkcí (ITO), když jsou vzájemně izolovány. (B a C) Článek je sestaven a zkratován, což způsobí vyrovnání elektrodoových potenciálů. V (B) je použit izolační organický materiál. V případě C je použit děrově vodivý polymer, který vytváří Schottkyho přechod na elektrodě s vysokou pracovní funkcí. Převzato z [34]

V klasické struktuře organického solárního článku je na substrátu nanášena průhledná vodivá vrstva, následuje vrstva pro přenos děr, aktivní vrstva, vrstva pro přenos elektronů a kovová anodová vrstva. Tato struktura se označuje jako "standardní" nebo "normální". Naopak, obrácená struktura organického solárního článku má na substrátu nejprve nanášenou kovovou katodovou vrstvu, na níž navazuje vrstva pro přenos elektronů, aktivní vrstva, vrstva pro přenos děr a jako poslední průhledná vodivá vrstva. Tato struktura se také označuje jako "obrácená" nebo "invertovaná" architektura. Hlavní rozdíl je v tom, že v klasické struktuře díry přechází do TCO katody přes HTL, a v inverzní struktuře do TCO přechází elektrony přes ETL.

Hlavní výhodou inverzní struktury je lepší stabilita a trvanlivost díky lepší ochraně aktivní vrstvy před vlivy prostředí, jako je vlhkost a kyslík. Vysvětluje se to tím, že katodová vrstva, která je obvykle vyrobena z vysoce stabilního kovu, jako je hliník nebo zlato, funguje jako bariéra, která zabraňuje vniknutí těchto faktorů do článku a způsobuje degradaci aktivní vrstvy. Kromě toho inverzní struktura umožňuje použití různých materiálů ve vrstvách pro přenos děr a elektronů, které nemusí být kompatibilní se standardní strukturou, což může vést k vyšší účinnosti a lepšímu výkonu zařízení. Invertovaná struktura má však také některé nevýhody, jako obtížnější výroba zařízení a nižší účinnost přeměny energie ve srovnání se standardní strukturou. Volba struktury závisí na konkrétní aplikaci a požadavcích na solární článek. [16], [18], [19]

## 2.5 Princip funkce

Organické solární články jsou založeny na fotovoltaickém efektu, který spočívá v přeměně světelné energie na energii elektrickou. K fotovoltaickému jevu dochází, když jsou fotony z dopadajícího slunečního světla absorbovány polovodičovým materiálem a vytvářejí tok elektronů, které lze shromažďovat a využívat jako elektrickou energii. [21]



Obrázek 6: Princip fungování polymerních solárních systémů s hromadným heteropřechodem články: tvorba fotonásobně indukovaných excitonů v D a A (1 a 19); vnitromolekulární rekombinace elektronů a děr (2 a 29); a difúze a disociace excitonů na rozhraní D/A (3 a 39); generace stavů s přenosem náboje (CT) a disociace těchto CT stavů na volné nosiče náboje (elektrony a díry) s ultrarychlým kvaziadiabatickým procesem přenosu náboje (4 a 49); nosiče náboje, které jsou přenášejí přes D nebo A (5 a 59) a poté se shromažďují v systému (6 a 69); oddělené nosiče náboje mohou rekombinovat. navzájem (7, geminátová rekombinace) před disociací; nosiče se mohou navzájem slučovat (7, geminátová rekombinace) oddělené nosiče náboje se mohou také srážet a rekombinovat (8, bimolekulární rekombinace nebo negeminátová rekombinace) předtím, než se jsou zachyceny příslušnými elektrodami (6 a 69). [20]

### 2.5.1 Funkce aktivní vrstvy

Aktivní vrstva v OSČ absorbuje fotony a vytváří páry elektron-díra prostřednictvím procesu fotoexcitace. Princip činnosti aktivní vrstvy v OSČ je založen na fotovoltaickém efektu, když jsou fotony slunečního světla absorbovány aktivní vrstvou, vytvářejí excitony, což jsou páry záporně nabitých elektronů a kladně nabitých děr. Tyto excitony jsou krátkodobé a je třeba je rychle oddělit, aby nedošlo k rekombinaci a ztrátě energie. K dosažení tohoto oddělení mají OSČ heteropřechodové rozhraní mezi 2 materiály aktivní vrstvy. Tento heteropřechod vytváří elektrické pole, které odděluje elektron a díru a generuje tok proudu vnějším obvodem.

Výkonnost aktivní vrstvy v OSČ je dána několika vlastnostmi, jako je absorpční koeficient, délka difúze excitonů, pohyblivost nosičů a doba života. Absorpční koeficient

určuje schopnost materiálu absorbovat fotony a vysoký absorpční koeficient je žádoucí pro zvýšení účinnosti zařízení. Difuzní délka excitonu je průměrná vzdálenost, kterou exciton urazí, než zrekombinuje, a delší difuzní délka je žádoucí pro snížení ztrát energie. Pohyblivost nosičů a doba života určují schopnost materiálu přenášet náboj k elektrodám, respektive zabránit rekombinaci.[21]

### 2.5.2 Funkce transportních (pomocných) vrstev

Transportní vrstvy v OSC usnadňují tok elektronů nebo děr z aktivní vrstvy k elektrodám bez výrazných ztrát energie. Transportní vrstvy hrají klíčovou roli při zlepšování výkonu a stability zařízení a jejich funkce je založena na principech transportu nosičů náboje a vyrovnávání energetických hladin. V OSC existují dva typy transportních vrstev: vrstva pro transport elektronů (ETL) a vrstva pro transport děr (HTL). Když je sluneční světlo absorbováno aktivní vrstvou, generované excitony se na rozhraní heteropřechodu rozdělí na páry elektron-díra a elektrony jsou transportovány přes ETL ke katodové elektrodě, díry naopak směřují k anodě přes HTL. ETL má nižší energetickou hladinu než aktivní vrstva, což vytváří příznivý energetický gradient pro transport elektronů. Na druhé straně je HTL vyrobena z organického polovodičového materiálu typu p, jako jsou konjugované polymery nebo malé molekuly. HTL usnadňuje transport děr z aktivní vrstvy k anodové elektrodě. HTL má vyšší energetickou hladinu než aktivní vrstva, což vytváří energetický gradient pro transport děr. Kromě toho HTL pomáhá zabránit rekombinaci párů elektron-díra tím, že blokuje elektrony z anodové elektrody.

Výkonnost transportních vrstev je dána několika vlastnostmi, jako jsou jejich energetické hladiny, pohyblivost nosičů, tloušťka a morfologie povrchu. Energetické hladiny transportních vrstev musí být v souladu s energetickými hladinami aktivní vrstvy a elektrod, aby byl zajištěn účinný přenos náboje. Mobilita nosičů transportních vrstev určuje snadnost transportu náboje a musí být optimalizována tak, aby se minimalizovaly ztráty energie při transportu. Tloušťka a povrchová morfologie transportních vrstev hrají rovněž zásadní roli při snižování energetických ztrát minimalizací odporu a zlepšením sběru náboje. [21], [22]

### 2.5.3 Funkce elektrod

Elektrody v organickém solárním článku (OSC) hrají klíčovou roli při sběru a transportu nosičů náboje generovaných v aktivní vrstvě do vnějšího obvodu. V standardní struktuře mají OSC dvě elektrody: průhlednou anodu a kovovou katodu. Anoda je obvykle vyrobena z oxidu indium a cín (ITO) nebo podobného průhledného vodivého oxidu (TCO), zatímco katoda je vyrobena z kovu s nízkou pracovní funkcí, jako je hliník, stříbro nebo vápník [23]. Anoda je umístěna na straně OSC, kam vstupuje sluneční světlo, a je v přímém kontaktu s vrstvou pro přenos děr (HTL), pokud se jedná o klasickou strukturu OSC. Hlavní funkcí anody shromažďování děr vzniklých v aktivní vrstvě a jejich přenesení do vnějšího obvodu. Průhlednost anody umožňuje slunečnímu světlu procházet skrz ni a dosáhnout aktivní vrstvy, zatímco její vodivé vlastnosti usnadňují tok děr směrem k vnějšímu obvodu. Katoda je umístěna na opačné straně OSC a je v přímém kontaktu s elektronovou transportní vrstvou (ETL). Hlavní funkcí katody shromažďování elektronů generovaných v aktivní vrstvě a jejich transport do vnějšího obvodu. Nízká pracovní funkce kovové katody umožňuje snadné odebrání elektronů z ETL a jejich transport do vnějšího obvodu.

Pro zlepšení účinnosti a stability OSC musí elektrody splňovat určité požadavky. Anoda a katoda musí být chemicky stabilní a nesmí reagovat s organickými materiály v



zařízení. Kromě toho musí mít elektrody vysokou průhlednost nebo odrazivost, v závislosti na jejich umístění v zařízení. Anoda by měla být vysoce průhledná, aby umožnila účinnou absorpci světla aktivní vrstvou, zatímco katoda by měla být vysoce reflexní, aby zabránila úniku neabsorbovaných fotonů ze zařízení.

Rozhraní mezi elektrodami a přilehlými organickými vrstvami rovněž hrají zásadní roli při výkonu zařízení. Pracovní funkce elektrod musí být správně sladěna s energetickými hladinami přilehlých vrstev, aby se usnadnila účinná extrakce nosičů náboje. Kromě toho může morfologie a drsnost povrchu elektrod ovlivnit účinnost sběru a transportu náboje. [22]

## 2.6 Materiály:

### 2.6.1 Pro aktivní vrstvu

Aktivní vrstva organického solárního článku (OSČ) se obvykle skládá ze směsi donorového a akceptorového materiálu. Donorovým materiálem je polymer nebo malá molekula, která může darovat elektrony, zatímco akceptorovým materiálem je obvykle derivát fullerenu nebo nefulerenový akceptor, který může elektrony přijímat.

1) Mezi donorské materiály používané v OSČ patří konjugované polymery, například:

- **poly(tetrathiofen-tetramethoxy perylen) (p(tThTMP))** (studovaný materiál)
- poly(3-hexylthiofen) (P3HT) [30],
- Poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)] (PCDTBT) [23].
- Poly[(5,6-difluoro-2,1,3-benzothiadiazol-4,7-diyl)-alt-(3,3'''-di(2-octyldodecyl)-2,2';5',2'';5'',2'''-quaterthiophen-5,5'''-diyl)] (PffBT4T-2OD) [31]
- Poly [[4,8-bis[(2-ethylhexyl)oxy]benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene-2,6-diyl][3-fluoro-2-[(2-ethylhexyl)carbonyl]thieno[3,4-b]thiophenediyl ]] (PTB7) [31]
- Poly[2-methoxy-5-(3,7-dimethyloctyloxy)-1,4-phenylene-vinylene] (MDMO-PPV) [31]
- Poly[2,6-(4,4-bis-(2-ethylhexyl)-4H-cyclopenta [2,1-b;3,4-b']dithiophene)-alt-4,7(2,1,3-benzothiadiazole)] (PCPDTBT) [23]
- Poly[(2,6-(4,8-bis(5-(2-ethylhexyl)-3-fluoro)thiophen-2-yl)-benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene)-alt-(5,5-(1',3'-di-2-thienyl-5',7'-bis(2-ethylhexyl)benzo[1',2'-c:4',5'-c']dithiophene-4,8-dione)] [PM6] [32]

Tyto polymery mají konjugovanou páteř, která umožňuje účinný přenos náboje a absorpci slunečního světla.

2) Mezi akceptorové materiály používané v OSČ patří deriváty **fullerenu**, jako je

- metylester [6,6]-fenyl-C61-kyseliny máselné (PCBM) [30] a
- metylester [6,6]-fenyl-C71-kyseliny máselné (PC<sub>71</sub>BM). [31]
- Indene-C60 Bisadduct (ICBA) [31]
- Indene-C70 bisadduct (IC70BA) [31]
- [6,6]-Phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PC<sub>61</sub>BM) [31]
- perylene tetracarboxylic derivate (PTCDI) [31]

a taky nefulerenové materiály:

- (Y6 (BTP-4F)) [32]

- 2,2'-((2Z,2'Z)-((4,4,9,9-tetrahexyl-4,9-dihydro-s-indaceno[1,2-b:5,6-b']dithiophene-2,7-diyl)bis(methanylylidene))bis(3-oxo-2,3-dihydro-1H-indene-2,1-diylidene))dimalononitrile (IDIC) [33]
- BO-4Cl [33]

Tyto fulerenové deriváty mají vysokou elektronovou afinitu a mohou přijímat elektrony z donorového materiálu. Pro použití v OSČ byly vyvinuty i jiné non fulerenové akceptory (NFA). Tyto materiály mají nízkou energetickou mezeru a mohou absorbovat světlo o delších vlnových délkách, proto jsou při získávání slunečního světla účinnější.

Výběr donorů a akceptorů pro aktivní vrstvu v OSČ je důležitý pro určení účinnosti a stability zařízení. Materiály musí mít komplementární energetické hladiny, aby umožňovaly účinný přenos náboje a extrakci. Kromě toho musí mít materiály vysoký stupeň čistoty a dobře definovanou morfologii, aby se minimalizovaly ztráty energie způsobené rekombinací a usnadnil účinný přenos náboje. V posledních letech se značné výzkumné úsilí zaměřilo na vývoj nových donorů a akceptorů pro OSČ, které mohou zlepšit jejich účinnost, stabilitu a škálovatelnost. Nové materiály, jako jsou nefulerenové akceptory a ternární směsi donorových a akceptorových materiálů, se ukázaly jako slibné pro zlepšení výkonu OSČ. [23]

### 2.6.2 Pro děrovou transportní vrstvu (HTL):

Mezi běžně používané materiály pro HTL patří:

- 1) Poly(3,4-ethylenedioxythiopen) polystyren sulfonát (PEDOT:PSS): PEDOT:PSS je široce používaným materiálem HTL díky své vysoké vodivosti, průhlednosti a snadnému zpracování. Má vysokou pracovní funkci, která umožňuje efektivní extrakci děr z aktivní vrstvy. Za určitých podmínek, jako je vystavení vlhkosti nebo světlu, však může být nestabilní.
- 2) Poly(3-hexylthiopen) (P3HT): P3HT je konjugovaný polymer, který se často používá jako donorový materiál v aktivní vrstvě i jako materiál HTL. Má vysokou pohyblivost děr a může účinně přenášet díry z aktivní vrstvy do anody. Může však také trpět problémy se stabilitou.

Tyto dva materiály jsou nejvyužívanější při výrobě OSČ, ale ještě jsou další varianty materiálů:

- 1) Spiro-OMeTAD: Spiro-OMeTAD je HTL materiál s malými molekulami, který se ukázal jako vysoce účinný v perovskitových solárních článcích. Má vysokou pracovní funkci a dobrou pohyblivost děr, což umožňuje účinný transport děr. Je však poměrně drahý a jeho syntéza může být obtížná.
- 2) Deriváty polyfluorenu: V některých organických solárních článcích byly jako HTL materiály použity deriváty polyfluorenu, například poly(9,9-dioctylfluoren-ko-benzothiadiazol) (F8BT). Mají vysokou pracovní funkci a dobrou stabilitu, ale jejich pohyblivost děr je nižší než u některých jiných materiálů. [24]

### 2.6.3 Pro transportní vrstvu elektronů (Electron Transport Layer (ETL))

Vrstva pro přenos elektronů (ETL) se v organických solárních článcích používá k účinnému odvádění a přenosu elektronů z aktivní vrstvy ke katodové elektrodě. Mezi běžně používané materiály pro ETL v organických solárních článcích patří:

- 1) Oxidy: Oxidy kovů, jako je oxid titaničitý (TiO<sub>2</sub>) a oxid zinečnatý (ZnO), se široce používají jako ETL v organických solárních článcích. Mají vysokou pohyblivost elektronů a lze je snadno nanášet levnými metodami, jako je nanášení spinem nebo nástřikem. ETL z oxidů kovů však mohou způsobovat ztráty energie kvůli své vysoké pracovní funkci a mohou být náchylné k tvorbě defektů.
- 2) Organické materiály: Některé organické materiály, jako jsou deriváty fullerenu a konjugované polymery (například PEDOT:PSS), byly rovněž použity jako ETL v organických solárních článcích. Tyto materiály mohou mít lepší vyrovnání energetických hladin s aktivní vrstvou a mohou být konstruovány pro lepší přenos náboje. Mohou však být obtížně zpracovatelné a ve srovnání s oxidy kovů mají nižší pohyblivost elektronů.
- 3) Mezifázové vrstvy: V organických solárních článcích se jako ETL používají mezifázové vrstvy, jako je oxid molybdeničitý (MoO<sub>x</sub>) a oxid wolframu (WO<sub>x</sub>), které zlepšují vyrovnání energetických hladin a usnadňují odvod náboje. Tyto materiály mají nízké pracovní funkce a mohou účinně extrahovat elektrony z aktivní vrstvy. Jejich tloušťku a morfologii je však třeba pečlivě kontrolovat, aby nedocházelo ke ztrátám energie. [25]

## 2.7 Metody nanášení tenkých vrstev

Metody depozice se týkají technik používaných k nanášení tenkých vrstev nebo povlaků materiálů na povrch. V kontextu organických solárních článků se depoziční metody používají k nanášení různých vrstev zařízení, jako je aktivní vrstva, elektrody a transportní vrstvy.

Při výrobě organických solárních článků se běžně používá několik depozičních metod, např:

- 1) Spin-coating: Tato metoda spočívá v nanesení roztoku materiálu na substrát, vytvoření tenké vrstvy. Spin-coating je jednoduchá a levná technika, kterou lze vyrábět vysoce kvalitní filmy s dobrou kontrolou tloušťky a morfologie filmu. Nemusí však být vhodná pro velkou výrobu. Metoda zahrnuje následující kroky:
  - Roztok materiálu, který má být nanesen, se připraví v rozpouštědle.
  - Substrát, kterým je obvykle skleněnou nebo plastovou bází potaženou vodivou vrstvou, jako je oxid indium a cín (ITO), se umístí na spin-coater.
  - Roztok je dávkován na střed substrátu při otáčení vysokou rychlostí (obvykle v rozmezí 1000-5000 ot./min.).
  - Odstředivá síla vytvářená rotujícím substrátem způsobuje, že se roztok rovnoměrně rozprostře po celém substrátu a vytvoří tenkou vrstvu.

\*Občas rozpouštědlo se odpaří pomocí zdroje tepla nebo proudu plynného dusíku a zanechá po sobě pevný film materiálu.

Tloušťku výsledného filmu lze regulovat nastavením rychlosti odstředování, koncentrace roztoku a objemu roztoku. Spin-coating je jednoduchá a levná metoda nanášení, která může vytvářet vysoce kvalitní filmy s dobrou kontrolou tloušťky a morfologie. Nemusí však být vhodná pro velkovýrobu a metoda může být citlivá na změny podmínek prostředí, jako je teplota a vlhkost. [26], [27]

- 2) Vakuové nanášení: Tato metoda spočívá v odpařování nebo naprašování materiálu ve vakuové komoře za účelem nanesení tenké vrstvy na substrát. Vakuová depozice může

produkovat filmy s vysokou čistotou a kontrolou tloušťky filmu, ale může být drahá a vyžaduje specializované vybavení.

- 3) Inkoustový tisk: Tato metoda zahrnuje tisk roztoku materiálu pomocí inkoustové tiskárny. Inkoustový tisk může vytvářet přesné vzory s vysokým rozlišením a je kompatibilní se širokou škálou materiálů. Nemusí však být vhodný pro velkokapacitní výrobu.
- 4) Nanášení nástřikem: Tato metoda zahrnuje stříkání roztoku materiálu na podklad pomocí stříkací pistole. Rozprašování je levná a škálovatelná technika, která může vytvářet rovnoměrné filmy s dobrou kontrolou tloušťky a morfologie filmu. [\[26\]](#)

### 3 Experimentální část

#### 3.1 Postup výroby

##### 3.1.1 Čištění substrátů

Výroba se začíná z čištění substrátů s už naloženou vrstvou ITO, protože ta je velmi pevná a odolná vůči různým vlivům. Substráty se čistí v různých rozpouštědlech v UZ lázni. Pro každé rozpouštědlo bylo použité stejné pořadí:

- 1) Substráty se vložily do malého speciálního plastového držáku
- 2) Držák se vkládal do kádinky
- 3) Kádinka se naplnila rozpouštědlem
- 4) Kádinka se vložila do UV lázně a ponechána na 15 minut
- 5) Po vyčištění se držák vyndal z kádinky
- 6) Kádinka a substrát se opláchly dalším použitým rozpouštědlem a vysušily se vzduchem pod tlakem.

Pořadí rozpouštědel:

- 1) Saponát
- 2) Voda
- 3) Aceton
- 4) Izopropylalkohol

Před spin-coating`em vysušené substráty se vloží do ozonové komory, ve které oni se ozařují UV lampami.

##### 3.1.2 Příprava roztoků pro aktivní a pomocné vrstvy

Suché části materiálů pro aktivní vrstvu se váží na analytických vahách a rozpouští se v žádaném rozpouštědle, víčko s roztokem se nechá míchat na magnetické míchače na dobu jednoho dne. Roztok materiálu pro transportní vrstvu se bere z lednici a hřeje se na pokojovou teplotu, ten se potom protřepává a přefiltruje přes stříkačku s filtrační rukojetí, dělá se to pro odstranění velkých částic z roztoku, velké částice způsobují hlavně skvrny, díry a další nerovnosti.

##### 3.1.3 Spin-coating

Substráty se po jedním loží do spin coateru „Model WS-650 MZ-8NPPB“ na stolek, zapíná se vakuová vývěva, nanáší se kapky požadovaného materiálu, nedotýká se povrchu substrátu stříkačkou, zapíná se spin coater. Když spin coater končí pracovat, vypíná se vakuová vývěva, dostava se článek a kontroluje se na skvrny a díry, jestli vrstva je tenká a homogenní, článek je vhodný pro sušení. Tamponem, smáčeným vodou, se utírá vrstva materiálu na velkém pasu ITO elektrody a článek se klade na ohřívací desku. Po vysušení, článek se trochu ochladí a vloží se do Petriho misky. Spin-coating materiálů pro aktivní vrstvu probíhá v speciální laboratoři čistých prostoru, v glove box`ach „M-Braun glovebox“, naplněných N<sub>2</sub>, protože oni jsou velmi citliví na O<sub>2</sub> a vodu. Vzorky se zavádí do glove box`u pomocí vakuové komory a operátor začíná deponovat. Depozice probíhá skoro stejným způsobem, s rozdílem v tom, že tampon se smáčí chloroformem a roztok, který se deponuje, nanáší se určitými dávkami (výpočet dávek (75 ml)).

\*Poznámka: bylo experimentálně zjištěno, že čím víc času uteklo po vyčištění článku v ozonové komoře, tím je snazší udělat „perfektní“ homogenní vrstvu beze skvrn a děr. Další užitečná metoda – co nejvíc zmenšit čas mezi nanášením roztoku PEDOT PSS a zapínáním spin coateru.

### 3.1.4 Napařování hliníku

Poslední vrstvou je druhá elektroda, která se skládá z napařovaného hliníku. Hliník se napařuje v glove box`u „M-Braun glovebox, s integrovanou napařovačkou“ v dusíkové atmosféře. Články se upevní na speciálním držáku a vloží se do vakuové pece. Takovým způsobem probíhá napařování hliníku. Principem napařování je co nejpomalejší napařování prvních vrstev hliníku (1 Å/s), první vrstvy zabírají 60-70 % času celkového napařování, dále intenzita napařování se zvyšuje. Děla se to pro unikání od děr, nerovností a pro lepší kvalitu výchozího produktu.

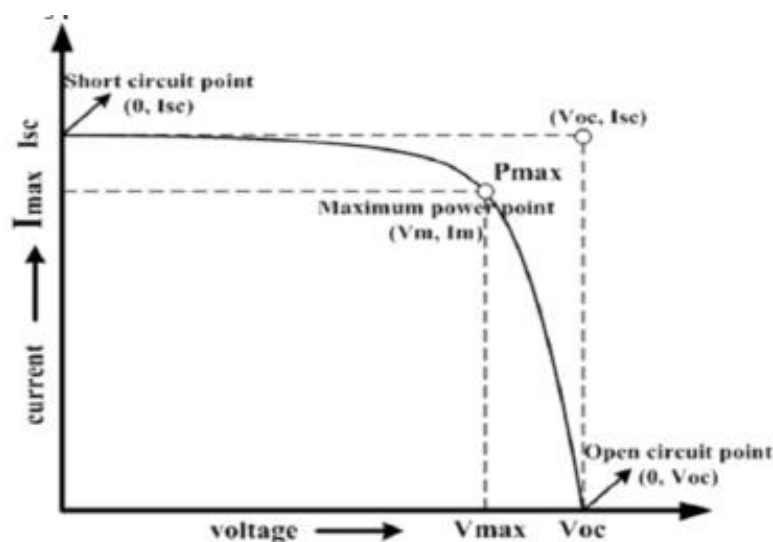
## 3.2 Enkapsulace článků

Posledním krokem výroby článku je jeho enkapsulace. Děla se to pro ochranu článku před vnějšími mechanickými vlivy. Enkapsulace taktéž probíhá v glove box`u, průhledné skličko se nasazuje a počínaje tímto okamžikem je článek ochráněn a hotový k testování/využití, alternativou může být měření ve speciálním testovacím boxu, do kterého se vloží každý článek přímo v glove box`u po jedním a otestuje se.

## 3.3 Metody charakterizace

### 3.3.1 Měření voltampérové charakteristiky

Voltampérová (I-V) charakteristika je závislost proudu protékajícího zařízením na přiloženém napětím. Z křivky I-V charakteristiky osvětleného článku lze stanovit stanovené parametry



Obrázek 7: Voltampérová křivka pro OSČ Převezato z [38]

- 1) Napětí naprázdno ( $V_{oc}$ ): Při nulovém proudu (otevřeném obvodu) vytváří solární článek napětí známé jako napětí otevřeného obvodu ( $V_{oc}$ ). Představuje maximální napětí, které může solární článek generovat, když z něj není odebírán žádný proud.

- 2) Zkratový proud ( $I_{sc}$ ): Při nulovém napětí (zkratu) vytváří solární článek maximální proud známý jako zkratový proud ( $I_{sc}$ ). Ten představuje maximální proud, který může solární článek dodávat, když jsou svorky přímo připojeny bez vnějšího zátěžového odporu.
- 3) Bod maximálního výkonu ( $P_{max}$ ): Křivka V-I solárního článku vykazuje bod maximálního výkonu ( $P_{max}$ ), který představuje kombinaci napětí a proudu, při níž může solární článek dodávat maximální výkon.  $P_{max}$  odpovídá optimálním provozním podmínkám solárního článku.

Z těchto naměřených hodnot lze dále vypočítat důležité parametry solárního článku.

Konkrétně jde o:

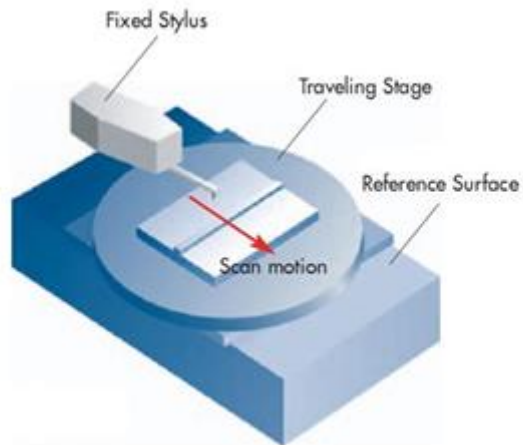
Faktor plnění (FF): Faktor naplnění je parametr, který kvantifikuje tvar křivky V-I a udává, jak moc se solární článek blíží svému maximálnímu výkonu. Vypočítá se jako poměr maximálního výkonu solárního článku k součinu  $V_{oc}$  a  $I_{sc}$ . Vyšší hodnoty fill factoru označují účinnější solární články. FF (vypočítá se podle vzorku  $\frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$ , nabývá hodnot od 0-1 nebo v procentech)

Učinnost: vypočítá se podle vzorku  $\frac{P_{max}}{E_0 \cdot S_{cell}}$ , kde  $E_0$  je intenzita záření světla a  $S_{cell}$  je plocha článku, nabývá hodnot od 0-1 nebo v procentech). To je poměr výkonu, který článek dodává k výkonu světla, který na něho dopadá.

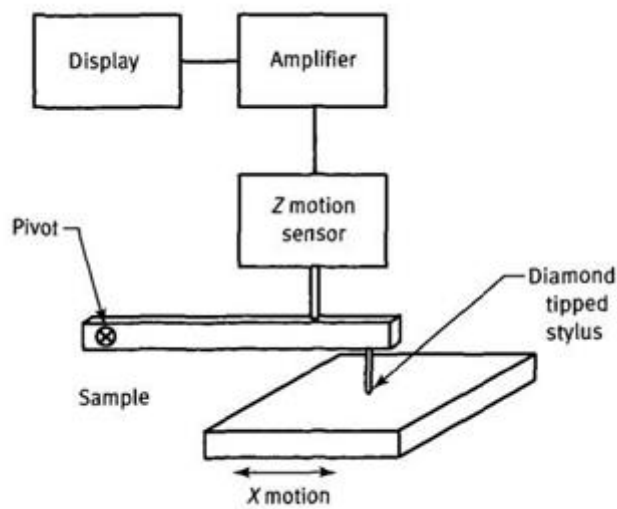
Testování probíhá pomocí testovací lampy „LOT Oriol, type: LS 0916 (spektrum AM1,5)“, která vyzařuje světlo, které imituje jasné slunečné záření. Články se otřou o smirkový papír a upevní se do speciálních nůžek, pomocí kterých články se umístí do testovacího místa pod lampou. Testují se každá elektroda. Testování probíhá v programu “Tracer2“

### 3.3.2 Testování tloušťky vrstev

Profilometrie je jeden ze způsobů analýzy morfologie povrchu. Cílem těchto měření je většinou zjištění tloušťky deponované tenké vrstvy. Profilometr je přístroj určený k měření profilu povrchu, za účelem zjištění jeho drsnosti, popřípadě ke změření dalších parametrů (tloušťka napařené vrstvy, tvary struktur a podobně). Vertikální rozlišení se obvykle pohybuje v řádu nanometrů, horizontální rozlišení bývá menší (obvykle od 20nm do 25  $\mu$ m) - záleží na konkrétních rozměrech stylusu a na nastavení parametrů měření. U mechanického profilometru dochází k přímému kontaktu stylusu (hrotu) se vzorkem, přítlačná síla může být nastavena (v profilometrii se udává v ekvivalentech mg a většinou se pohybuje v rozmezí od 1 mg do 50 mg). Tento fakt je považován za výhodu, protože zmírňuje vliv nečistot na výsledky měření. Naopak může dojít k mechanickému poškození (poškrábání) vzorků, pokud je vzorek měkký a síla neúměrně veliká. Při používání mechanického profilometru není potřeba provádět simulace měření, ani není potřeba rozmýšlet nad tím, jak vhodně sestavit aparaturu, jedná se o přímou metodu značně usnadňující manipulaci a lehce pochopitelnou. Při měření spočívá vzorek na podložce a je v přímém kontaktu se stylusem. Vzorek se pohybuje vůči nehybnému stylusu, který vykonává jen vertikální pohyb, tedy měří 1D nerovnosti na vzorku.



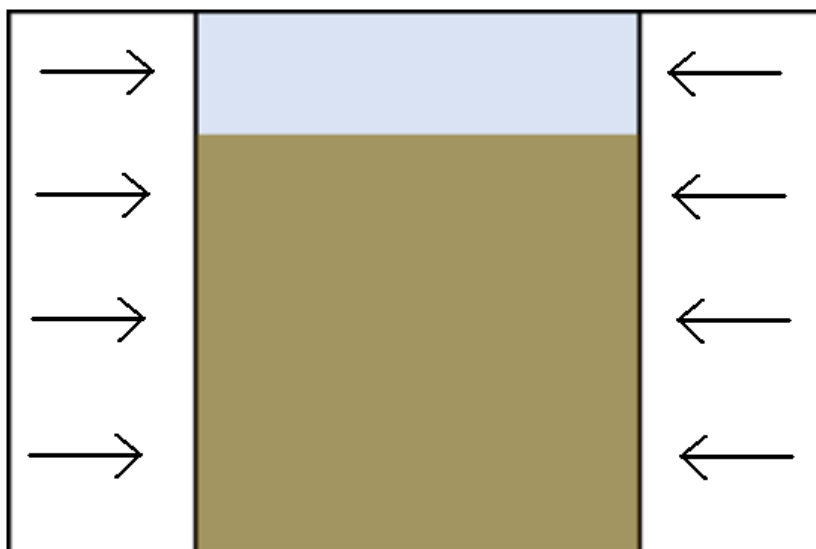
Obrázek 8: Schéma měření profilmetrem. Převzato z [35]



Obrázek 9: Princip měření profilmetrem. Převzato z [36]

Tloušťka vrstvy se měří pomocí zařízení Mechanický profilometr „Dektak XT“. Vzorek se vloží na testovací stolek, box se zavří a otevří se na počítače program “vision 64”





Obrázek 10: Schéma měření tloušťky studovaného materiálu, šedá část je Vrstva ITO, světle-hnědá vrstva je studovaný materiál

Měření se provádí na 8 místech, vždy z obou stran (levá a pravá) vrstvy: Na začátku se měří jedná oblast Sklo-ITO, dál se měří oblastí materiálu 1-3 z každé strany.

### 3.3.3 UV-Vis spektroskopie

Princip testování absorpční schopnosti organických solárních článků spočívá v měření schopnosti organické aktivní vrstvy absorbovat světlo při určitých vlnových délkách. Organické solární články využívají jako materiál pohlcující světlo organické polovodiče nebo polymery. Absorpční schopnost organické aktivní vrstvy přímo ovlivňuje účinnost solárního článku při přeměně světelné energie na energii elektrickou. Princip lze shrnout následovně: na vzorek dopadá světlo, část je absorbována měří se intenzita prošlého světla je různá pro různé vlnové délky.

Absorbance byla měřena na UV-Vis spektrofotometru Varian Carry 50 měřené vzorky (viz vzorky) byly změřeny podle standartního postupu, jako blank bylo použito čisté sklo s ITO vrstvou.

### 3.3.4 Testování fluorescence polymeru

Organické solární články často obsahují organické polovodiče nebo polymery, které mohou vykazovat fluorescenční vlastnosti (fluorofory). Tyto fluorofory mohou zahrnovat konjugované polymery, malé organické molekuly nebo barviva, která mají schopnost absorbovat světlo a po excitaci emitovat fluorescenci. Fluorescenční testování organických solárních článků je technika používaná k charakterizaci optických vlastností a výkonu organické aktivní vrstvy. Poskytuje cenné informace o přítomnosti a chování fluoroforů v organických materiálech. Princip fluorescenčního testování organických solárních článků lze shrnout takto:

- 1) Excitace: Při zkoušce fluorescence je organická aktivní vrstva excitována světlem o určité vlnové délce nebo rozsahu vlnových délek. Tato excitační vlnová délka se volí tak, aby odpovídala absorpčním vlastnostem fluorescenčních druhů ve vrstvě.
- 2) Emise: Při excitaci organické aktivní vrstvy absorbují fluorofory fotony a přecházejí do vyšších energetických stavů. Následně se vrátí do základního stavu vyzařováním

fluorescenčního světla o delší vlnové délce. Emitované fluorescenční světlo je charakteristické pro konkrétní fluorofory přítomné v organické aktivní vrstvě.

- 3) Spektrální analýza: Emitované fluorescenční světlo se obvykle analyzuje pomocí spektroskopických technik, jako je fluorescenční spektroskopie. Měřením intenzity a vlnové délky emitované fluorescence lze získat cenné informace o chování fluoroforů.

Měření probíhá na Spektrofluorimetru „HORIBA Jobin Yvon Fluorolog-3“



Obrázek 11: Spektrofluorimetru „HORIBA Jobin Yvon Fluorolog-3“. Převzato z [37]

### 3.4 Postupy výroby sérií OSČ

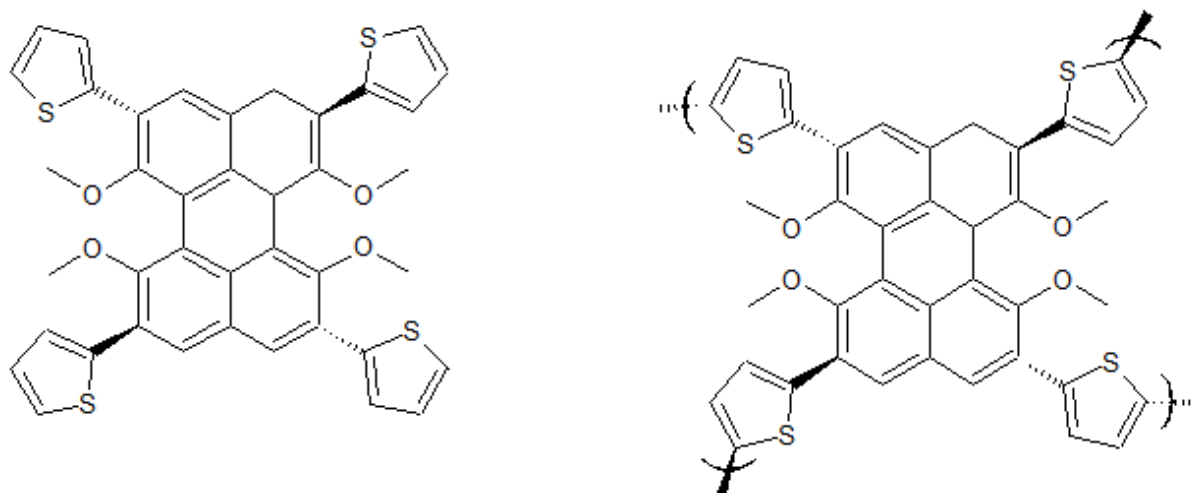
- První série:(standartní struktura) [1]: PEDOT PSS (Baztron PVP AI 4083) s tloušťkou kolem 40 nm při laboratorní teplotě byl přefiltrován přes 0,45  $\mu\text{m}$  (PTFE) a deponován při 3000 RPM, 40 s, vrstva se sušila 15 minut při 150 °C. Pro roztok PM6:Y6 s tloušťkou kolem 150 nm donorové (PM6) a akceptorové (Y6) materiály byly smíchané v poměru – D:A = 1:1,2 16 ml mL<sup>-1</sup> vyšlo celkem v chloroformu, potom roztok byl smíchán s 1-chrolnaftalenem (CN) (0,5%, v/v), roztok byl deponován v glove boxu při 3000 RPM, 30 s. Hliníková katoda byla napařena v glove boxu. Pro testování články byly enkapsulovány.
- Druhá série: (standartní struktura): (viz první série)
- Třetí série: (invertní struktura): ZnO (NP) při laboratorní teplotě byl deponován při 3000 RPM, 30 s, vrstva se sušila 20 minut při 180 °C. Pro roztok PM6:Y6 s tloušťkou kolem 150 nm donorové (PM6) a akceptorové (Y6) materiály byly smíchané v poměru – D:A = 1:1,2 16 ml mL<sup>-1</sup> vyšlo celkem v chloroformu, potom roztok byl smíchán s 1-chrolnaftalenem (CN) (0,5%, v/v), roztok byl deponován v glove boxu při 3000 RPM, 30 s . 3 nm MoO<sub>3</sub> a 100 nm Ag jako anoda byly napařeny při tlaku  $3 \times 10^{-7}$  torr v glove boxu. Pro testování články byly enkapsulovány.
- Čtvrtá série: (standartní struktura): (viz první série), při napařování katody (Al) bylo nejdřív napařeno 7 nm Ca
- Pátá série (články se studovaným materiálem): (standartní struktura): Připraven roztok Y6 v chloroformu (10 mg/ml) poté smíchán 30 min. Vzorky s naneseným polymerem byly na 24 hodin uloženy do vakuové pece (100 C, 200 mbar) pro

odstranění adsorbovaných plynů. Na vzorek umístěný na stolku spincoateru bylo rovnoměrně nanášeno 65 ul roztoku a po 20 s byl vzorek roztočen na 3000 RPM na 30 s. Pak byla napájena katoda (7 nm Ca a 100 nm Al).

## 4 Výsledky a diskuze

### 4.1 Studované vzorky

Vzorky se studovaným materiálem poly(tetrathiofen-tetramethoxy perylen) (p(tThTMP)) byly připravené partnery v Indii pomocí elektropolymerizací z roztoku na sklo/ITO substráty.



Obrázek 12: studovaný materiál poly(tetrathiofen-tetramethoxy perylen) (p(tThTMP))

Pro nanášení vrstvy použity různé hodnoty přeneseného náboje [nC]. Tabulka ukazuje studované vzorky a použité náboje:

Tabulka 1: Studované vzorky

| Číslo vzorku | Použitý náboj [nC] |
|--------------|--------------------|
| 1            | 5                  |
| 2            | 10                 |
| 3            | 15                 |
| 4            | 15                 |
| 5            | 20                 |
| 6            | 20                 |
| 7            | 25                 |
| 8            | 25                 |
| 9            | 30                 |
| 10           | 30                 |

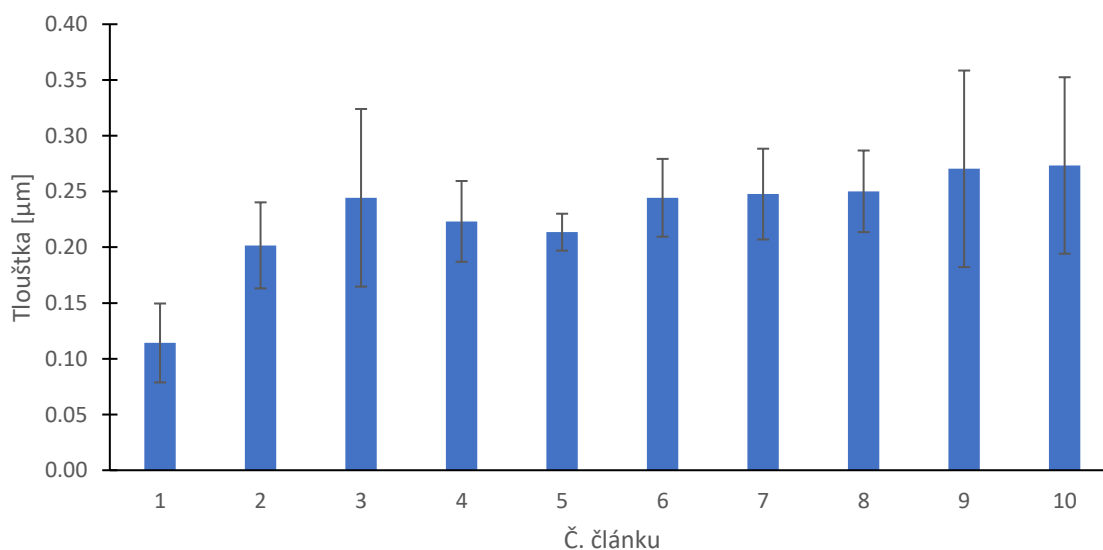
## 4.2 Měření tloušťky

Tabulka 2: Naměřené hodnoty tloušťky studovaného materiálu

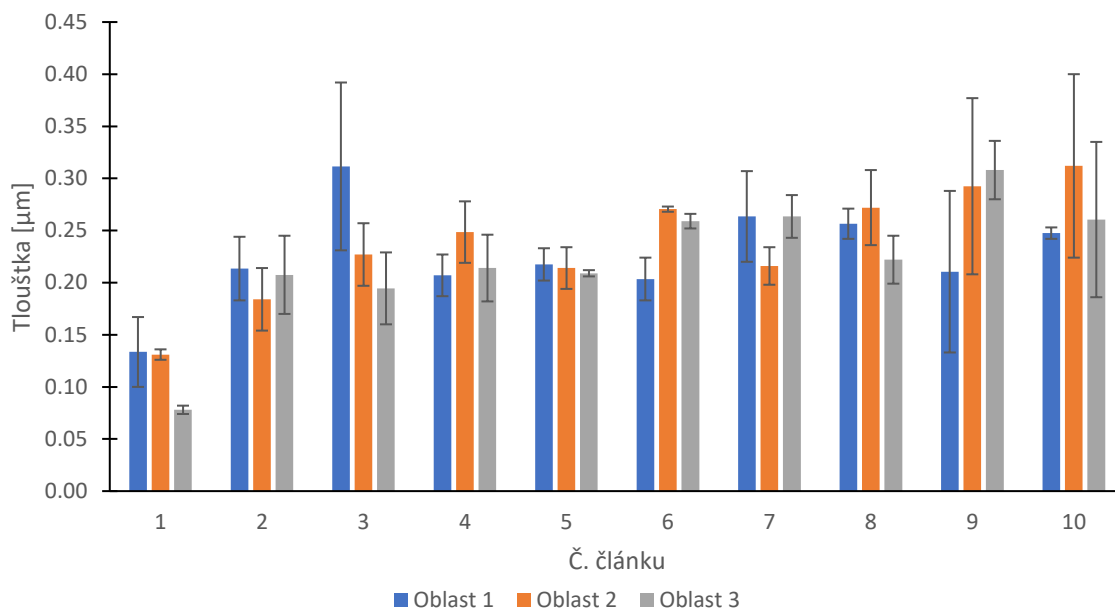
| Č. Članku | Tloušťka vrstvy p(tThTMP) |       |          |       |          |       | Průměr celkem | Směrodatná odchylka |
|-----------|---------------------------|-------|----------|-------|----------|-------|---------------|---------------------|
|           | oblast 1                  |       | oblast 2 |       | oblast 3 |       |               |                     |
|           | dolní                     | horní | dolní    | horní | dolní    | horní |               |                     |
| 1         | 0,1                       | 0,167 | 0,136    | 0,126 | 0,082    | 0,074 | 0,114         | 0,035               |
| 2         | 0,244                     | 0,183 | 0,154    | 0,214 | 0,17     | 0,245 | 0,202         | 0,039               |
| 3         | 0,392                     | 0,231 | 0,257    | 0,197 | 0,229    | 0,16  | 0,244         | 0,080               |
| 4         | 0,187                     | 0,227 | 0,219    | 0,278 | 0,182    | 0,246 | 0,223         | 0,036               |
| 5         | 0,202                     | 0,233 | 0,234    | 0,194 | 0,212    | 0,206 | 0,214         | 0,017               |
| 6         | 0,183                     | 0,224 | 0,273    | 0,268 | 0,252    | 0,266 | 0,244         | 0,035               |
| 7         | 0,307                     | 0,22  | 0,198    | 0,234 | 0,243    | 0,284 | 0,248         | 0,041               |
| 8         | 0,271                     | 0,242 | 0,308    | 0,236 | 0,199    | 0,245 | 0,250         | 0,037               |
| 9         | 0,288                     | 0,133 | 0,377    | 0,208 | 0,336    | 0,28  | 0,270         | 0,088               |
| 10        | 0,242                     | 0,253 | 0,224    | 0,4   | 0,186    | 0,335 | 0,273         | 0,079               |

Tabulka 3: Vypočítané hodnoty tloušťky studovaného materiálu

| Č. Članku | Tloušťka vrstvy p(tThTMP) [ $\mu\text{m}$ ] |          |           |          |           |          |
|-----------|---|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|           | oblast 1                                    |          | oblast 2  |          | oblast 3  |          |
|           | průměr LP                                   | Odchylka | průměr LP | Odchylka | průměr LP | Odchylka |
| 1         | 0,1335                                      | 0,0335   | 0,1310    | 0,0050   | 0,0780    | 0,0040   |
| 2         | 0,2135                                      | 0,0305   | 0,1840    | 0,0300   | 0,2075    | 0,0375   |
| 3         | 0,3115                                      | 0,0805   | 0,2270    | 0,0300   | 0,1945    | 0,0345   |
| 4         | 0,2070                                      | 0,0200   | 0,2485    | 0,0295   | 0,2140    | 0,0320   |
| 5         | 0,2175                                      | 0,0155   | 0,2140    | 0,0200   | 0,2090    | 0,0030   |
| 6         | 0,2035                                      | 0,0205   | 0,2705    | 0,0025   | 0,2590    | 0,0070   |
| 7         | 0,2635                                      | 0,0435   | 0,2160    | 0,0180   | 0,2635    | 0,0205   |
| 8         | 0,2565                                      | 0,0145   | 0,2720    | 0,0360   | 0,2220    | 0,0230   |
| 9         | 0,2105                                      | 0,0775   | 0,2925    | 0,0845   | 0,3080    | 0,0280   |
| 10        | 0,2475                                      | 0,0055   | 0,3120    | 0,0880   | 0,2605    | 0,0745   |



Graf 1: Tloušťka vrstev pro každý studovaný vzorek (průměr všech měření vrstvy p(tThTMP), chybové úsečky byly přidány pomocí funkce „směrodatná odchylka“



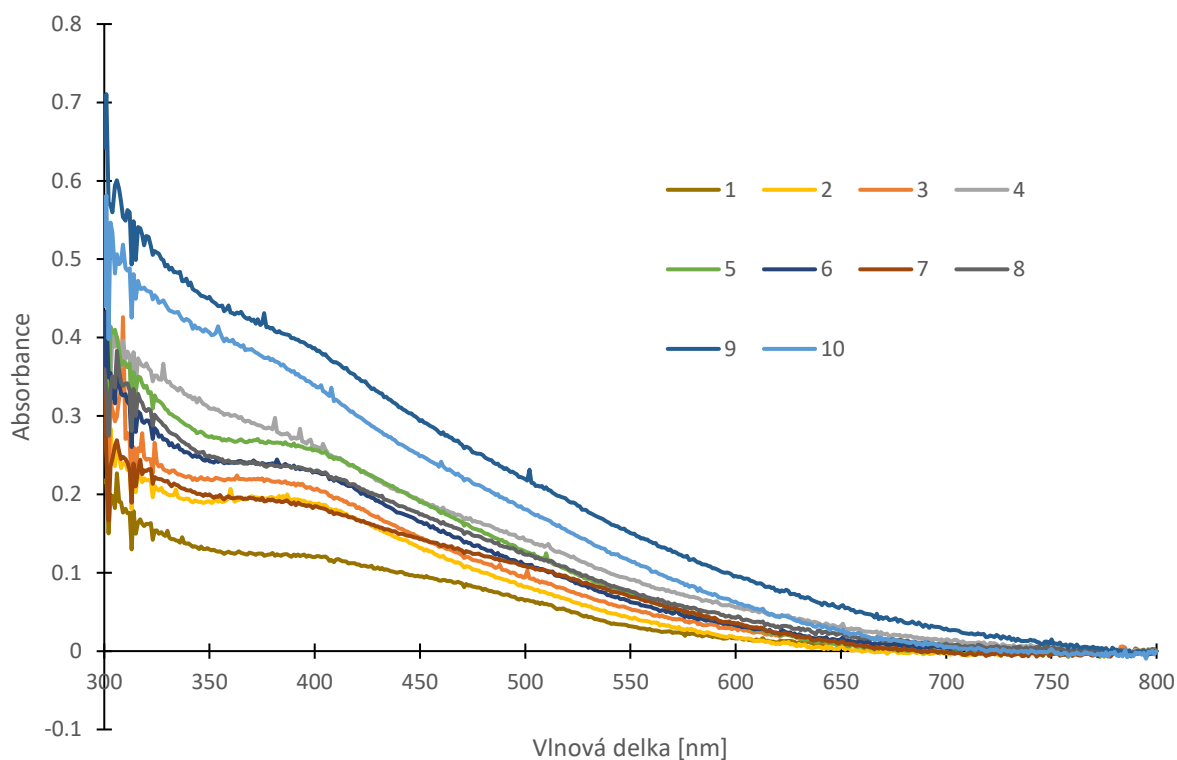
Graf 2: Tloušťka vrstev pro každou stranou každého studovaného vzorků (průměr z hodnot levé a pravé strany  $p(tThTMP)$ )

Pro ověření vlivu náboje, který byl použit při nanášení studovaného materiálu na substrát s ITO bylo provedeno měření tloušťky jednotlivých vrstev. Z naměřených a vypočítaných hodnot lze konstatovat, že obecně větší hodnotě náboje odpovídá vyšší hodnota tloušťky vrstvy materiálu, jenom vzorky číslo 3 a 5 přerušily tendenci nárůstu tloušťky vrstvy s rostoucím nábojem. Velkou roli v hodnocení parametru tloušťky vrstvy hraje nehomogenost nanášených vrstev, vzorky číslo 3, 9 a 10 prokázali největší nehomogenost vrstev (detailněji je lze pozorovat u hodnot pro levou a pravou stranu vzorků). Měření probíhalo celkem na 8 místech vzorku, měřila se zvlášť vrstva ITO a v třech oblastech zleva a zprava se měřila vrstva studovaného materiálu. Pro zobrazení jednotlivých oblastí v grafu byl vypočítán průměr hodnot při měření zprava a zleva. Nejistota byla stanovena jako polovina rozdílu těchto dvou hodnot, byla taky přidána směrodatná odchylka (viz [Graf 1](#)), pro detailnější popis tloušťky byla pro levou a pravou stranu vypočítána odchylka podle vzorce:  $\sigma = \left| \frac{a-b}{2} \right|$ , kde  $a$  je hodnota tloušťky levé strany, a  $b$  je hodnota pravé strany.

## 4.3 Optické vlastností

### 4.3.1 Absorbance

Na každém vzorku bylo provedeno měření absorbance pro zjištění závislostí mezi tloušťkou vrstev a absorbancí studovaných materiálů. Měření probíhalo standardním postupem: nejdříve byla vytvořena kalibrační křivka a podle ní byla naměřena zbývající data (viz. [UV-Vis spektroskopie](#)).



Graf 3: Závislost absorpce na vlnové délce studovaných materiálů

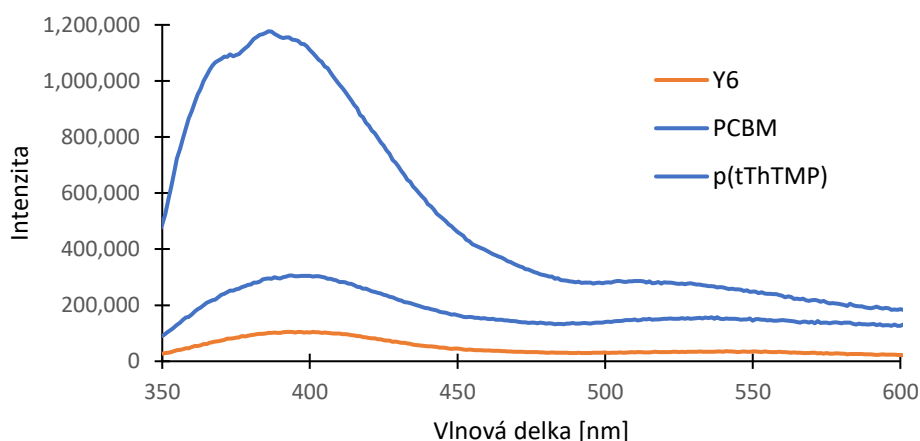
| č. vzorku | Absorbance | Tloušťka [ $\mu\text{m}$ ] |
|-----------|------------|----------------------------|
| 1         | 0,123      | 0,1142                     |
| 2         | 0,194      | 0,2017                     |
| 3         | 0,214      | 0,2443                     |
| 4         | 0,272      | 0,2232                     |
| 5         | 0,265      | 0,2135                     |
| 6         | 0,237      | 0,2443                     |
| 7         | 0,190      | 0,2477                     |
| 8         | 0,235      | 0,2502                     |
| 9         | 0,399      | 0,2703                     |
| 10        | 0,357      | 0,2733                     |

Tabulka 4: Absorbance p(ThTMP) vzorků při píku (390 nm) a porovnání dat s tloušťkou vrstev

Podle naměřených dat lze říct, že vyšší hodnoty absorpce v intervalu (360-420 nm) a hlavně v píku ( $\lambda=390$  nm) odpovídají vyšším hodnotám náboje (viz. [studované vzorky](#).) a rovněž vyšším hodnotám tlouštěk vrstev, a stejně naopak, nižší hodnoty absorpce odpovídají nižším hodnotám náboje a rovněž vyšším hodnotám tlouštěk vrstev. Nejvyšší hodnoty absorpce měli vzorky číslo 9 a 10, což odpovídá výše popsané závislosti, naopak, nejnižší hodnoty absorpce měly vzorky číslo 1 a 2, což zase odpovídá popsané závislosti. Z této závislosti se vylučuje vzorek číslo 4, který má příliš vysokou absorpce a 7, který má naopak příliš malou hodnotu absorpce. Závislost mezi absorpencí a nehomogennou tloušťkou vrstev nebyla zjištěná, lze **připustit**, že vzorky číslo 3, 9 a 10 mají méně patrné píky, protože dochází k rozptylu, což způsobuje nárůst absorpce bez ohledu na vlnovou délku kvůli nehomogenitě jejich vrstev.

### 4.3.2 Fluorescence

Pro ověření možného přenosu náboje bylo provedeno měření fluorescence dvou vybraných vzorků (číslo 7 a 8) se studovaným materiálem a článků se studovaným a referenčním materiálem pro zjištění efektivity akceptorových referenčních materiálů pro aktivní vrstvu a jejich vliv na absorbanci a emisi světelného záření v solárním článku a studovaném materiálu. Funguje to následně: Když světlo se absorbuje, vytvoří se v aktivní vrstvě excitovaný elektron, když se ten náboj nerozdělí na pár elektron-díra kvůli tomu, že Na aktivní vrstvu aplikujeme pouze donor, ten excitovaný elektron může jenom ztratit svoji energii a vyzářit fluorescence, ale pokud přidáme akceptorový materiál, mohou nastat dva případy: 1) dojde k rozdělení excitovaného elektronu na pár elektron-díra (fluorescence se nevyzáří) nebo 2) zase se vyzáří fluorescence. Tím pádem, čím větší je pokles intenzity fluorescence v materiálu, tím dochází k většímu přenosu náboje a tím je materiál lepší pro použití.



Graf 4: Závislost intenzity fluorescence na vlnové délce donorného studovaného materiálu x a článků s p(tThTMP) a další referenční materiály

| Název materiálu | Intenzita fluorescence |
|-----------------|------------------------|
| p(tThTMP)       | 1147566                |
| PCBM            | 305575                 |
| Y6              | 104273                 |

Tabulka 5: Naměřené hodnoty intenzity fluorescence materiálů při piku  $\lambda=394$  nm

Z naměřených dat lze říct, že intenzita fluorescence p(tThTMP) v solárním článku zřejmě závisí na přítomnosti akceptorového materiálu. Můžeme usoudit, že dochází k přenosu náboje. Bylo zjištěno, že nejnižší hodnoty intenzity fluorescence v celém intervalu vlnových délek měl akceptor Y6, proto jej používáme pro tvorbu solárních článků.

## 4.4 Solární články

### 4.4.1 Optimalizace referenčních článků

Pro vyhodnocení chování studovaného polymeru v solárních člancích bylo potřeba připravit nejen články s tímto polymerem, ale také referenční články se standardně používanými materiály pro srovnání. Přípravu referenčních článků bylo potřeba nejprve optimalizovat, abychom získali funkční vzorky.

- První série

Nefunkční, parametry  $V_{oc}$  a  $I_{sc}$  měli hodnotu 0, křivka I-V charakteristiky měla tvar diody, z čehož plyne, že kvůli příliš dlouhému napařování hliníku aktivní vrstva článku začíná degradovat kvůli příliš vysoké teplotě.

- Druhá série

Nefunkční, byly získány vyhovující hodnoty  $V_{oc}$ , ale příliš nízké hodnoty FF a  $I_{sc}$ , což způsobilo nefunkčnost článku, podle těchto dat a tvaru křivek, z čehož plyne, že problém spočívá v extrakci náboje a články pro lepší přenos proudu potřebují ETL.

Tabulka 6: Parametry I-V charakteristiky pro druhou sérii článků

| Device | $J_{sc}$<br>[mA/cm <sup>2</sup> ] | $V_{oc}$<br>[mV] | FF<br>[%] | Účinnost<br>[%] |
|--------|-----------------------------------|------------------|-----------|-----------------|
| 1_1    | 5,8                               | 681              | 14        | 0,05            |
| 1_2    | 6,8                               | 679              | 15        | 0,07            |
| 1_3    | 6,0                               | 682              | 15        | 0,06            |
| 1_4    | 3,4                               | 635              | 17        | 0,04            |
| 1_5    | 6,3                               | 653              | 15        | 0,06            |
| 1_6    | 5,1                               | 681              | 15        | 0,05            |

- Třetí série

Funkční, nejlepší hodnoty účinností

Tabulka 7: Parametry I-V charakteristiky pro třetí (invertní) sérii článků

| Device | $J_{sc}$<br>[mA/cm <sup>2</sup> ] | $V_{oc}$<br>[mV] | FF<br>[%] | Účinnost<br>[%] |
|--------|-----------------------------------|------------------|-----------|-----------------|
| 1_1    | 18,8                              | 723              | 38        | 5,1             |
| 1_2    | 20,2                              | 719              | 46        | 6,7             |
| 1_3    | 19,4                              | 713              | 47        | 6,6             |
| 1_4    | 19,0                              | 710              | 41        | 5,5             |
| 1_5    | 19,9                              | 707              | 47        | 6,6             |
| 1_6    | 18,9                              | 696              | 48        | 6,3             |

- Čtvrtá série

Funkční.

Tabulka 8: Parametry I-V charakteristiky pro čtvrtou sérii článků

| Device | $J_{sc}$<br>[mA/cm <sup>2</sup> ] | $V_{oc}$<br>[mV] | FF<br>[%] | Účinnost<br>[%] |
|--------|-----------------------------------|------------------|-----------|-----------------|
| 1_1    | 20,4                              | 702              | 24        | 3,5             |
| 1_2    | 21,0                              | 750              | 27        | 4,2             |
| 1_3    | 20,8                              | 710              | 26        | 3,9             |
| 1_4    | 20,2                              | 692              | 26        | 3,6             |
| 1_5    | 20,4                              | 720              | 26        | 3,9             |
| 1_6    | 19,3                              | 678              | 24        | 3,1             |



#### 4.4.2 Články se studovaným materiálem

Funkční články, byly získány dostatečné hodnoty  $V_{oc}$ , ale velmi nízké hodnoty FF a  $I_{sc}$ , což způsobilo velmi nízké hodnoty účinností, předpokládá se, že nízká účinnost sérii byla způsobena neúspěšným napařováním vápníku a hliníku ve vakuové peci. Vrstvy kovů se napařovaly nehomogenně, ale skoky kvůli závadě zařízení, po napařování každý článek měl popáleniny v blízkosti elektrod.

Tabulka 9: Parametry I-V charakteristiky pro sérii článků s p(iThTMP)

| Device | $J_{sc}$<br>[mA/cm <sup>2</sup> ] | $V_{oc}$<br>[mV] | FF<br>[%] | Účinnost<br>[%] |
|--------|-----------------------------------|------------------|-----------|-----------------|
| 1_1    | 2,4                               | 753              | 20        | 0,5             |
| 1_2    | 2,2                               | 700              | 20        | 0,5             |
| 1_3    | 2,1                               | 710              | 20        | 0,4             |
| 1_4    | 2,5                               | 757              | 19        | 0,4             |
| 1_5    | 2,0                               | 698              | 19        | 0,4             |
| 1_6    | 2,0                               | 735              | 20        | 0,4             |

## 5 Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na studium nových materiálů a jejich vlastností pro organické solární články. V teoretické části této práce byla provedena rešerše současného stavu poznání organických solárních článků a organické fotovoltaice obecně. Stručně bylo popsáno téma anorganických solárních článků, hlavně jejich struktura a princip funkce, včetně krátkého porovnání anorganických a organických solárních článků. Detailně byla popsána struktura a princip funkce organických solárních článků, zejména byly popsány donorové a akceptorové materiály, které se využívají pro aktivní vrstvu článků. Nakonec byly připomenuty metody nanášení tenkých vrstev.

Studovaným materiálem byl poly(tetrathiofen-tetramethoxy perylen) (p(tThTMP)), byla provedena charakterizace jeho optických vlastností (UV-VIS a fluorescenční spektroskopie) a tloušťky, materiál byl použit jako donor pro aktivní vrstvu série organických solárních článků, které potom byly vyrobeny metodou spin-coating a charakterizovány pomocí voltampérové charakteristiky, byla určena hlavně jejich účinnost – schopnost absorbovat slunečné záření a přeměňovat ho na elektrickou energii.

Pro charakterizace tloušťky vrstev materiálu p(tThTMP), který byl nanášen pomocí elektropolymerizací z roztoku na sklo/ITO substráty za různých hodnot přeneseného náboje, byla použita metoda mechanické profilmetrie a byla zjištěna závislost mezi nábojem, který byl použit, a tloušťkou vrstvy, která se vytvořila během nanášení materiálu na sklo/ITO. Bylo zjištěno, že vyšší hodnotě náboje odpovídá vyšší hodnota tloušťky vrstvy, jenom vzorky číslo 3 a 5 přerušily tendenci nárůstu. Byla také pozorována nehomogenost tlouštěk pomocí směrodatné a vlastní odchylky (viz. [měření](#)).

Optické vlastnosti, konkrétně excitace, emise a absorbance, byly provedeny metodou UV-VIS a fotofluorescenční spektroskopií. Absorbance byla měřena pro zjištění závislosti mezi absorpcí, nábojem a tloušťkou materiálu. Bylo zjištěno, že vyšší hodnoty absorbance v intervalu (360-420 nm) a hlavně v píku ( $\lambda=390$  nm) odpovídají vyšším hodnotám náboje (viz stud. mat.) a rovněž vyšším hodnotám tlouštěk vrstev, a stejně naopak, nižší hodnoty absorbance odpovídají nižším hodnotám náboje a rovněž vyšším hodnotám tlouštěk vrstev. Nejvyšší hodnoty absorbance měli vzorky číslo 9 a 10, což odpovídá výše popsané závislosti, naopak, nejnižší hodnoty absorbance měly vzorky číslo 1 a 2, což zase odpovídá popsané závislosti. Z této závislosti se vylučuje vzorek číslo 4, který má příliš vysokou absorbance a 7, který má naopak příliš malou hodnotu absorbance. Závislost mezi absorpční a nehomogenitou tloušťky vrstev nebyla zjištěná.

Měření fluorescence bylo provedeno pro ověření možného přenosu náboje, bylo provedeno měření fluorescence pár vzorků (číslo 7 a 8) se studovaným materiálem a článků se studovaným a referenčním materiálem pro zjištění efektivity akceptorových referenčních materiálů pro aktivní vrstvu a jejich vliv na absorbanci a emisi světelného záření v solárním článku a studovaném materiálu. Z naměřených dat lze říct, že intenzita fluorescence p(tThTMP) v solárním článku zřejmě závisí na přítomnosti akceptorového materiálu. Můžeme usoudit, že dochází k přenosu náboje. Bylo zjištěno, že nejmenší hodnoty intenzity fluorescence v celém intervalu vlnových délek měl akceptor Y6, proto jej používáme pro tvorbu solárních článků.

Dále, ze studovaného materiálu p(tThTMP) a referenčního materiálu Y6 byla vytvořena a charakterizovaná pomocí I-V charakteristiky série článků, výsledný  $I_{sc}$ , rovněž faktor plnění a účinnost každého článku byla nevyhovující. Předpokládá se, že nízká účinnost série byla způsobena neúspěšným napařováním vápníku a hliníku ve vakuové peci. Vrstvy kovů se napařovaly nehomogenně, ale skoky kvůli závadě zařízení, po napařování každý článek měl popáleniny v blízkosti elektrod.

V budoucnu se plánuje další optimalizace organických solárních článků a článků s materiálem poly(tetrathiofen-tetramethoxy perylen) (p(tThTMP)). Cílem bude dosáhnout vyšší účinnosti článků.

## 6 Seznam použitých zdrojů:

- [1] YUAN, Jun, Yunqiang ZHANG, Liuyang ZHOU, et al. Single-Junction Organic Solar Cell with over 15% Efficiency Using Fused-Ring Acceptor with Electron-Deficient Core. *Joule*. 2019, 11. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.01.004>
- [2] TRUNG DANG, Minh, Lionel HIRSCH a Guillaume WANTZ. P3HT:PCBM, Best Seller in Polymer Photovoltaic Research. *Advanced Materials*. 2011, 6. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/adma.201100792>
- [3] SCHOVANCOVÁ, Petra. Barvivy senzibilizované solární články [online]. Brno, 2009 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/12990>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Petr Dzik.
- [4] HOPPE, Harald a N. Serdar SARICIFTCI. Polymer Solar Cells. In: MARDER, Seth R. a Kwang-Sup LEE, ed. *Photoresponsive Polymers II* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, 2007-10-17, s. 1-86 [cit. 2023-02-19]. ISBN 978-3-540-69452-6. Dostupné z: doi:10.1007/12\_2007\_121
- [5] HOANG, P., V. BOURDIN, Q. LIU, G. CARUSO a V. ARCHAMBAULT. Coupling optical and thermal models to accurately predict PV panel electricity production. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014, 13.
- [6] ČEPPAN, M.; LAPČÍK, L.; PELIKÁN, P. *Fotochemické procesy*. 1.st ed. Bratislava : Alfa, 1989. 424 p. ISBN 80-05-00049-9. [cit. 2009-03-27].
- [7] MIKULČÁK, Jiří, et al. *Matematické fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 3. vyd. Praha: Prometheus, spol. s. r. o., 2002. 212 s. ISBN 80-85849-84-4.
- [8] FAN, Yan, Tao WANG, Yinwei QIU, et al. Pure Graphene Oxide Vertical p–n Junction with Remarkable Rectification Effect. *MDPI*. 2021, 12. Dostupné z: doi:10.3390/molecules26226849
- [9] ŠEDINA, M. *Organické solární články pro fotovoltaickou přeměnu sluneční energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2009. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
- [10] DIVYA, Sharma, Raj BALWINDER a Mehra RAJESH. Design and Analysis of Various Solar Cell Technologies for Improvements in Efficiencies. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 2022. Dostupné z: doi:10.56042/ijems.v29i5.51066
- [11] TATSUO, Saga. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. *NPG Asia Materials*. Japan, 2010, 7. Dostupné z: doi:10.1038/asiamat.2010.82
- [12] LABERGE, Madison. Thin-Film Solar Panels (2023 Guide) Thin-Film Solar Panels (2023 Guide). *EcoWatch* [online]. 02.04.2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.ecowatch.com/solar/thin-film-solar-panels>

- [13] Sweet Answers to Solar Questions. *Solar Mango* [online]. WordPress, 2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.solarmango.com/ask/2016/11/03/what-is-the-difference-between-organic-and-inorganic-solar-cells/>
- [14] HASHMI, Galib a Masudul HAIDER IMTIAZ. Towards high efficiency solar cells: Composite metamaterials. *Global Journal of Researches in Engineering Electrical and Electronics Engineering*. USA, 2013, 8. ISSN 2249-4596. Dostupné z: doi:10.1002/pip.2163.
- [15] P. J. Reddy, Science and Technology of Photovoltaics, 2nd edition, CRC Press, Leiden (2010).
- [16] OSENI, Saheed O. a Genene Tessema MOLA. Properties of functional layers in inverted thin film organic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. South Africa, 2017, 16. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.10.036>
- [17] Tzung - Han Lai, Sai - Wing Tsang, Jesse R. Manders, Song Chen, Franky So, Properties of interlayer for organic photovoltaic, *Mater. Today* 16 (11) (2013) 424-432.
- [18] UDDIN, Ashraf. Chapter 2 - Organic solar cells. In: UDDIN, Ashraf. *Comprehensive Guide on Organic and Inorganic Solar Cells*. Australia, 2022, s. 31. ISBN <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85529-7.00006-2>.
- [19] HEINRICHOVA, P. *Fotogenerace naboje v organických polovodičích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2014. 172 s. Vedoucí dizertační práce Prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
- [20] WANG, Kai, Chang LIU, Chao YI, Xiaowen HU, Steven S. C. CHUANG a Xiong GONG. Effects of Magnetic Nanoparticles and External Magnetostatic Field on the Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells. *PubMed*. 2015, 10. Dostupné z: doi:10.1038/srep09265
- [21] Working Principles of OSCs. *Ebrary.net* [online]. 2023 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: [https://ebrary.net/191936/engineering/working\\_principles\\_OSCs](https://ebrary.net/191936/engineering/working_principles_OSCs)
- [22] SHABANI, Leila, Ahmad MOHAMMADI a Tahmineh JALALI. Numerical Study of Plasmonic Effects of Ag Nanoparticles Embedded in the Active Layer on Performance Polymer Organic Solar Cells. *Springer Nature*. Persia, 2022. ISSN 1557-1963. Dostupné z: doi:10.1007/s11468-021-01539-x
- [23] KHALIL, Asma, Zubair AHMAD, Farid TOUATI a Mohamed MASMOUDI. Optical Absorption Enhancement in Polymer BHJ thin Film Using Ag Nanostructures: A Simulation Study. *Bentham Science Publishers*. Qatar, 2020, 12. ISSN 1573-4137. Dostupné z: doi:10.2174/1573413715666190125163438
- [24] ANRANGO-CAMACHO, Cinthya, Karla PAVÓN-IPIALES, Bernardo A. FRONTANA-URIBE a Alex PALMA-CANDO. Recent Advances in Hole-Transporting Layers for Organic Solar Cells. *Nanomaterials (Basel)*. 2022, 12. Dostupné z: doi:10.3390/nano12030443

- [25] KUMAR, Aditya, Saurav Kumar OJHA, Nidhi VYAS a Animesh K. OJHACOR. Designing Organic Electron Transport Materials for Stable and Efficient Performance of Perovskite Solar Cells: A Theoretical Study. *ACS Omega*. 2021, 6. Dostupné z: doi:10.1021/acsomega.1c00062
- [26] CHAUDHARI, Mandakini N, Rajendrakumar AHIRRAO a Sanabhau D BAGUL. Thin film Deposition Methods: A Critical Review. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 2021, 20. ISSN 2321-9653. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.36154>?
- [27] MISHRA, Abhilasha, Neha BHATT a A.K. BAJPAI. Chapter 12 - Nanostructured superhydrophobic coatings for solar panel applications. In: *Nanomaterials-Based Coatings: Fundamentals and Applications Micro and Nano Technologies*. India, 2019, s. 27. ISBN 978-0-12-815884-5.
- [28] CPV TECHNOLOGY – BSQ SOLAR. *BSQ Solar beyond the limits* [online]. 2022, 2022 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.bsq solar.com/technology/>
- [29] Solar explained: Photovoltaics and electricity. *Independing Statistics and Analysis: U.S. Energy Information Administration* [online]. USA, 2023 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>
- [30] ZAREI, Khojasteh a Farzin EMAMI. Absorption enhancement and efficiency improvement of an organic solar cell embedded with core–shell Au@ITO nanoparticles. *Optical and Quantum Electronics*. 2020, 6. Dostupné z: doi:10.1007/s11082-020-02401-w
- [31] LI, Yang, Wei HUANG, Dejiang ZHAO, et al. Recent Progress in Organic Solar Cells: A Review on Materials from Acceptor to Donor. *Molecules*. 2022, 6. ISSN 1420-3049. Dostupné z: doi:10.3390/molecules27061800
- [32] HSIEH, Cheng-Ming, Huan-Chang HSIAO, Yuto YAMADA, et al. Promoting the Efficiency and Stability of Nonfullerene Organic Photovoltaics by Incorporating Open-Cage [60]Fullerenes in the Nonfullerene Nanocrystallites. *American Chemical Society*. 2022, 11. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1021/acsmi.2c06354>
- [33] LUO, Dou, Woongsik JANG, Dickson D. BABU, Min Soo KIM a Aung Ko Ko KYAW. Recent progress in organic solar cells based on non-fullerene acceptors: materials to devices. *Journal of Materials Chemistry A*. 2022. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1039/D1TA10707K>
- [34] SPANGGAARD, Holger a Frederik C. KREBS. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2004, 22. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.02.021>
- [35] Veeco: Geometric Considerations of Surface Profilers and Pivoting Step Measurers (2004); dostupné na [www.veeco.com/pdfs/appnotes/AN518\\_GeometricAdvantages\\_Rev2\\_94.pdf](http://www.veeco.com/pdfs/appnotes/AN518_GeometricAdvantages_Rev2_94.pdf)
- [36] The American society of Mechanical engineers: Surface texture (surface roughness, waviness and lay) (2002)

[37] Fluorescence Spectrometer (HORIBA Jobin Yvon Fluorolog-3). *FREIE UNIVERSITÄT BERLIN* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.physik.fu-berlin.de/en/einrichtungen/ag/ag-reich/ausstattung/fluoreszenz/index.html>

[38] EL-AHMAR, Mohamed, Abou-Hashema AHMED a Ashraf Mohamed HEMEIDA. Mathematical modeling of Photovoltaic module and evaluate the effect of varoius paramenters on its performance. *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. 2016, 7. Dostupné z: doi:10.1109/MEPCON.2016.7836976

[39] CHEN, Jianhua, Yao CHEN, Liang-Wen FENG, et al. *Hole (donor) and electron (acceptor) transporting organic semiconductors for bulk-heterojunction solar cells*. 2020. Diplomová práce. Northwestern University, Lamon Avenue, Southern University of Science and Technology (SUSTech).