



# 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

## PŘÍPRAVA TENKOVRSŤVÝCH SYSTÉMŮ PRO SEMITRSPARENTNÍ SOLÁRNÍ ČLÁNKY

DEPOSITION OF THIN FILMS FOR SEMITRSPARENT SOLAR CELLS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Horák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matouš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO 2025

## Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1980/2024 Akademický rok: 2024/25  
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie  
Student: **Adam Horák**  
Studijní program: Chemie a chemické technologie  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Matouš Kratochvíl, Ph.D.**

### Název bakalářské práce:

Příprava tenkovrstvých systémů pro semitransparentní solární články

### Zadání bakalářské práce:

- Prostudujte relevantní literární zdroje a sestavte rešerši shrnující současný stav poznání o přípravě organických solárních článků, se zaměřením na technologie přípravy vrstev v semitransparentních solárních člancích.
- Vytipujte vhodné tenké vrstvy pro využití jako transparentní elektrody v semitransparentním solárním článku. Připravte tenké vrstvy transparentních elektrod a charakterizujte jejich vlastnosti.
- Seznamte se s výrobou a charakterizací organických solárních článků.
- Připravte referenční organické solární články a studujte jejich parametry. Připravte organické solární články využívající studované transparentní vrstvy, prozkoumejte jejich funkčnost s ohledem na dříve stanovené vlastnosti.

### Termín odevzdání bakalářské práce: 26.5.2025:

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

Adam Horák  
student

Ing. Matouš Kratochvíl, Ph.D.  
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 3.2.2025

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.  
děkan

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem a charakterizací transparentních elektrod pro použití v semitransparentních organických solárních článcích (ST-OSC). V rešersní části jsou popsány principy fungování organických solárních článků, jejich architektury a přehled materiálů vhodných pro transparentní elektrody. V experimentální části byly připraveny tenké vrstvy stříbrných nanodrátků (AgNW), oxidu cíničitého ( $\text{SnO}_2$ ) a oxidu zinečnatého (ZnO) metodou spin coatingu. Jednotlivé vrstvy byly hodnoceny z hlediska tloušťky, elektrické vodivosti a optických vlastností pomocí profilometrie, čtyřbodového měření a UV-Vis spektrometrie. AgNW prokázaly výbornou vodivost i propustnost, ale problémy s disperzí omezily jejich praktické využití. ZnO vykazovalo nedostatečnou elektrickou vodivost, proto nebylo použito pro přípravu ST-OSC. Jako nejvhodnější materiál se ukázalo  $\text{SnO}_2$ , které bylo použito při přípravě funkčních ST-OSC, jejichž parametry byly porovnány s referenčními články. Výsledky ukazují potenciál  $\text{SnO}_2$  jako transparentní elektrody, i když s mírně sníženou účinností oproti referenci.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the development and characterization of transparent electrodes for use in semitransparent organic solar cells (ST-OSC). The research section describes the principles of organic solar cells function, their architectures and a review of materials suitable for transparent electrodes. In the experimental part, thin films of silver nanowires (AgNW), tin oxide ( $\text{SnO}_2$ ) and zinc oxide (ZnO) were prepared by spin coating method. The individual layers were evaluated in terms of thickness, electrical conductivity and optical properties using profilometry, four-point measurement and UV-Vis spectrometry. AgNWs showed excellent conductivity and transmittance, but dispersion problems limited their practical application. ZnO exhibited poor electrical conductivity, so they were not used for the preparation of ST-OSC.  $\text{SnO}_2$  proved to be the most suitable material and was used in the preparation of functional ST-OSCs, whose parameters were compared with reference cells. The results show the potential of  $\text{SnO}_2$  as a transparent electrode, albeit with a slightly reduced efficiency compared to the reference.

## **Klíčová slova**

Semitransparentní organické solární články, fotovoltaika, organická elektronika, ST-OSC, AgNW, ZnO,  $\text{SnO}_2$

## **Keywords**

Semitransparent organic solar cells, photovoltaics, organic electronics, ST-OSC, AgNW, ZnO,  $\text{SnO}_2$

HORÁK, Adam. *Příprava tenkovrstvých systémů pro semitransparentní solární články*. Online, bakalářská práce. Matouš KRATOCHVÍL (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/162547>. [cit. 2025-05-22].

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***

*Chtěl poděkovat především vedoucímu své bakalářské práce, Ing. Matouši Kratochvilovi, Ph.D., za cenné rady při zpracování, nekonečnou trpělivost, přátelský přístup a možnost se přiučit metodám nad rámec práce.*

## Obsah

1	Úvod.....	6
2	Teoretická část.....	7
2.1	Organické polovodiče .....	7
2.2	Organické solární články .....	9
2.3	Aktuální stav řešené problematiky.....	14
3	Experimentální část .....	15
3.1	Příprava vzorků.....	15
3.2	Měření .....	18
3.3	Příprava ST-OSC .....	19
4	Výsledky a diskuse.....	20
4.1	AgNW .....	20
4.2	ZnO .....	26
4.3	SnO <sub>2</sub> .....	30
4.4	Referenční články .....	37
4.5	Články s využitím SnO <sub>2</sub> .....	39
4.6	Články se použitím AgNW .....	41
5	Závěr.....	45
6	Zdroje .....	46
7	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	50

# 1 Úvod

V současnosti je celosvětově patrná snaha o rozvoj obnovitelných zdrojů energie a hledání nových technologií, které by umožnily ekologickou a ekonomicky dostupnou výrobu elektrické energie. Jednou z perspektivních oblastí jsou organické solární články (OSC), které nabízejí řadu výhod oproti klasickým křemíkovým článkům, jako je nízká hmotnost, flexibilita, možnost výroby na velkých plochách a nižší energetická náročnost výroby.

Specifickou kategorií jsou semitransparentní organické solární články (ST-OSC) díky své transmitanci představují obrovský potenciál v integraci do budov jako fotovoltaická okna, střešní okna, fasády nebo v podobě fotovoltaických skleníků[1]. Za posledních několik let výzkum pokročil ve zvýšení průměrné transmitance viditelného světla (AVT) a účinnosti konverze energie (PCE). S rychlým výzkumem akceptorových materiálů s úzkým pásovým rozpětím (band gap), PCE u ST-OSC dosahuje mezi 10 až 13 % a AVT mezi 20 až 40 % [5][2].

ST-OSC jak bylo řečeno lze využít v zemědělství, kde se dají integrovat do skleníků umožňující kombinovat produkci plodin s výrobou elektrické energie. Díky možnosti ladění absorpčního spektra organického materiálu lze navrhnout ST-OSC, které propouštějí fotosyntetické aktivní záření (PAR) potřebné pro růst rostlin (zejména modré a červené záření) a současně absorbují infračervenou část spektra pro fotovoltaickou konverzi. Tím se minimalizuje negativní vliv na fotosyntézu. Nově vyvíjené OSC dosahují transmitance přes 20 % a účinností nad 13 %, přičemž lze využít flexibilní a lehké substráty kompatibilní s běžnými materiály skleníků. Dále jejich netoxické složení přispívá k ochraně půdy a vody. Tyto integrované OSC mohou vést k „Net Zero Energy“ provozům, kdy budovy spotřebovávají energii, kterou si sami vyprodukují. [3]

Tato bakalářská práce se zaměřuje na přípravu a charakterizaci tenkých vrstev vhodných pro transparentní elektrody v ST-OSC. V aktuální stavu řešené problematiky je shrnut současný stav poznání v oblasti přípravy vrstev a technologie organických solárních článků. Experimentální část se věnuje přípravě tenkých vrstev stříbrných nanodrátků (AgNW), oxidu cíničitého ( $\text{SnO}_2$ ) a oxidu zinečnatého (ZnO), jejich charakterizaci z hlediska elektrických a optických vlastností a následnému využití vybraných materiálů při výrobě funkčních OSC a změření vlastností článků. Ve výsledkové části jsou shrnuty a diskutovány výsledky a postupy jednotlivých pokusů s porovnáním jednotlivých vzorků ku referenčnímu článku.

Cílem práce je ověřit vhodnost jednotlivých materiálů pro použití jako transparentní elektrody, zhotovit funkční zařízení a zhodnotit jejich parametry s ohledem na vlastnosti použitých vrstev.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Organické polovodiče

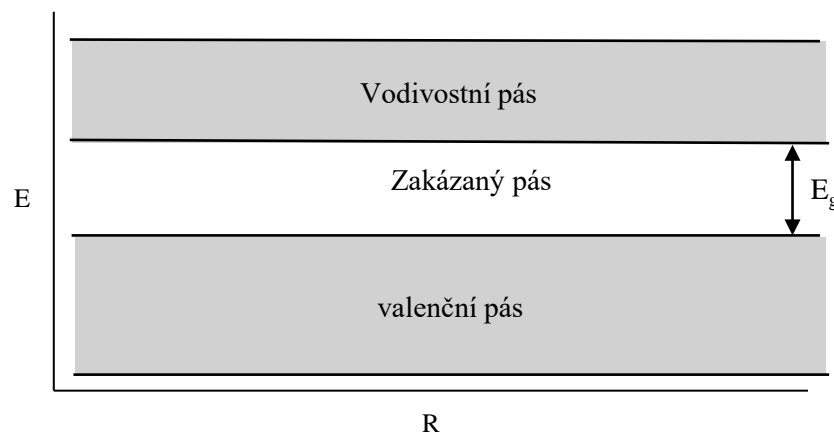
Organické polovodiče představují třídu materiálů s unikátními elektronickými a optickými vlastnostmi, díky nimž se využívají v široké škále zařízení, jako jsou organické světelné diody (OLED), organické fotovoltaické články (OSC) nebo organické polem řízené tranzistory (OFET). Tyto materiály jsou založené na molekulách nebo polymerech, které obsahují  $\pi$ -elektronové konjugace zodpovědné za jejich vodivé vlastnosti. Organické polovodiče nabízejí výhody, jako je nízká výrobní náročnost, flexibilita a možnost přizpůsobení jejich vlastností molekulárním designem[4].

#### 2.1.1 Elektronová struktura

Elektronické vlastnosti organických polovodičů jsou do značné míry určeny jejich elektronovou strukturou, kterou lze popsat pojmy jako jsou valenční pás, vodivostní pás a zakázaný pás (band gap). U organických polovodičů je ekvivalentem valenčního pásu orbital HOMO (nejvyšší obsazený molekulární orbital) a ekvivalentem vodivostního pásu orbital LUMO (nejnižší neobsazený molekulární orbital). Základní charakteristikou je šířka zakázaného pásu, která ovlivňuje absorpci světla a vodivost. Pro organické polovodiče je typické, že mají relativně úzký zakázaný pás (např. 1–4 eV), což umožňuje snadnou excitaci elektronů a vznik náboje při osvětlení[4].

#### 2.1.2 Zakázaný pás

Zakázaný pás je klíčovým parametrem, který určuje elektronické a optické vlastnosti polovodičů. Definuje energetickou mezeru (hodnota  $E_g$ ) mezi nejvyšší obsazenou energetickou hladinou (valenční pás) a nejnižší neobsazenou energetickou hladinou (vodivostní pás), graficky ukázáno v **Obr 1**. Velikost zakázaného pásu ovlivňuje schopnost materiálu absorbovat světlo, vést elektrický proud a jeho využitelnost v různých zařízeních, jako jsou fotovoltaické články, diody nebo tranzistory.[5]



**Obr 1** Schéma zakázaného pásu

#### Význam zakázaného pásu

1. Optické vlastnosti: Zakázaný pás určuje vlnovou délku světla, která materiál absorbuje nebo vyzařuje. Například materiály s úzkým zakázaným pásmem mohou absorbovat infračervené záření, zatímco široký zakázaný pás umožňuje absorpci ultrafialového záření.[5]
2. Elektronické vlastnosti: Šířka zakázaného pásma ovlivňuje teplotní aktivaci vodivosti. Polovodiče s menším zakázaným pásmem vykazují vyšší vodivost při pokojové teplotě.[5]
3. Stabilita a výkon zařízení: Optimalizace šířky zakázaného pásma je klíčová pro dosažení vysoké účinnosti a stability v zařízeních, jako jsou solární články nebo světelné diody.[5]

### Stanovení šířky zakázaného pásu

Existují dvě metody pro stanovení šířky zakázaného pásu, a to metody teoretické a experimentální. Pro teoretický výpočet se používají kvantově-chemické výpočty, například v rámci teorie funkcionálu hustoty (DFT), které poskytují informace o elektronických hladinách. Analogově k této metodě, experimentální metoda spočívá na zařízení pro zjištění šířky pásu, jako je UV-Vis absorpční spektroskopie, fotoluminiscenční spektroskopie nebo elektrochemické metody.[6]

### 2.1.3 Typy zakázaného pásu

Zakázaný pás může mít u polovodičů dva základní charakteristické typy podle vzájemné polohy maximální energie valenčního pásu a minimální energie vodivostního pásu v závislosti na vlnovém vektoru  $k$  v recipročním prostoru.[5; 7]

#### Přímý (direct band gap)

U materiálů s přímým zakázaným pásem se maximum valenčního pásu a minimum vodivostního pásu nachází při stejné hodnotě vlnového vektoru  $k$ . Díky tomu může elektron při přechodu mezi těmito pásy absorbovat nebo emitovat foton bez potřeby změny hybnosti (tedy bez zapojení fononu — kvanta mřížkových vibrací), jak je znázorněno v **Obr 2 (a)**. [5; 7]

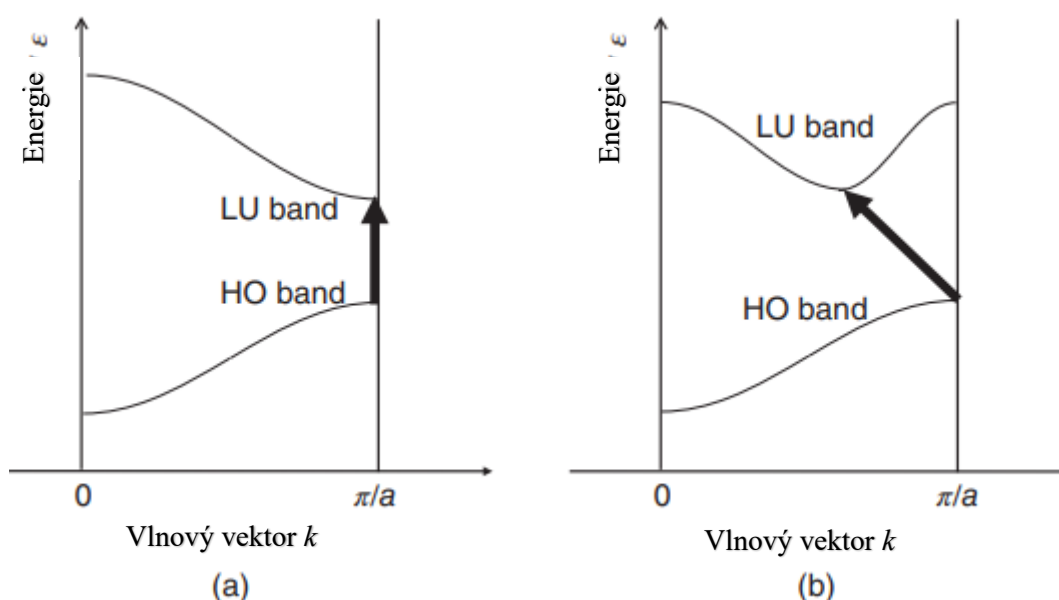
Přímý zakázaný pás je zásadní pro efektivní světelné emise a absorpci. Materiály s tímto typem pásu se uplatňují v OLED a OSC. Díky absenci nutnosti současné účasti fononu je radiační přechod rychlý a účinný.[5]

Většina  $\pi$ -konjugovaných organických polymerů a nízkomolekulárních polovodičů má přímý zakázaný pás, což je důvod jejich využití v organické elektronice.[5]

#### Nepřímý (indirect band gap)

U materiálů s nepřímým zakázaným pásem se maximum valenčního pásu a minimum vodivostního pásu nachází při odlišných hodnotách vlnového vektoru  $k$ . To znamená, že elektron při přechodu mezi těmito pásy musí kromě absorpce nebo emise fotonu absorbovat nebo emitovat i fonon, aby byl zachován zákon zachování hybnosti **Obr 2 (b)**. [5; 7]

Přechody jsou méně pravděpodobné a tím pádem světelná emise méně efektivní. Nepřímý zakázaný pás snižuje kvantovou účinnost emise a zpomaluje přechodové procesy.[5]



**Obr 2** Přímý (a) a nepřímý (b) zakázaný pás upraveno z [4]

Organické polovodiče většinou vykazují přímý zakázaný pás, což je jedna z jejich hlavních výhod oproti tradičním anorganickým polovodičům, jako je křemík. Díky tomu mohou efektivně absorbovat i emitovat světlo, což umožňuje konstrukci tenkých a flexibilních OLED panelů, organických laserů nebo fotovoltaických článků s vysokým poměrem mezi absorpcí a transmitancí.[4; 7; 5]

#### *Zakázaný pás v organických polovodičích*

Organické polovodiče mají typicky zakázaný pás v rozmezí 1–4 eV[8], což je užší než u většiny anorganických polovodičů. Tato vlastnost z nich činí ideální kandidáty pro optoelektronické aplikace, zejména v blízké infračervené, viditelné a ultrafialové oblasti spektra. Šířka zakázaného pásu v organických polovodičích je ovlivněna [9]

1. Typem molekul nebo polymerů. Například  $\pi$ -konjugované systémy, jako jsou polyacetylen nebo polythiofen, vykazují relativně úzký zakázaný pás díky efektivní delokalizaci elektronů.
2. Molekulární strukturou. Zakázaný pás může být modulováno chemickou substitucí, která ovlivňuje elektronovou hustotu a energetické hladiny.
3. Krystalinitou a uspořádáním. V dobře uspořádaných materiálech dochází k silnějšímu překryvu molekulárních orbitalů, což zmenšuje šířku zakázaného pásma.

#### 2.1.4 Hraniční molekulové orbitály

V molekulové kvantové chemii se energetické úrovně elektronů v organických polovodičích popisují pomocí molekulárních orbitalů a jedná se o analog k zakázanému pásu v pásové teorii. Nejvyšší obsazený molekulární orbital (HOMO – *Highest Occupied Molecular Orbital*) a nejnižší neobsazený molekulární orbital (LUMO – *Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) tvoří základní rámec pro pochopení optických a elektronických vlastností materiálů použitých v organických solárních článcích.[10]

Energetická mezera mezi HOMO a LUMO (tzv. *HOMO–LUMO gap*) určuje minimální energii, kterou musí foton mít, aby došlo k excitaci elektronu z HOMO do LUMO a tím i ke generování excitonu, vázaného páru elektron-díra. Tato mezera je tak klíčovým parametrem pro spektrální absorpci a účinnost fotoaktivního materiálu.[11]

#### 2.1.5 Vodivost a pohyblivost

Pohyblivost je ovlivněna především strukturními vlastnostmi materiálu, jako je uspořádanost molekul, defekty nebo přítomnost příměsí. Pro amorfni organické materiály je typická nižší mobilita v porovnání s krystalickými materiály.[4]

Vodivost organických polovodičů závisí na pohyblivosti nosičů náboje, kterou lze popsat vztahem:

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu \quad 1$$

kde  $\sigma$  je vodivost,  $n$  koncentrace nosičů,  $e$  elementární náboj a  $\mu$  pohyblivost nosičů.

## 2.2 Organické solární články

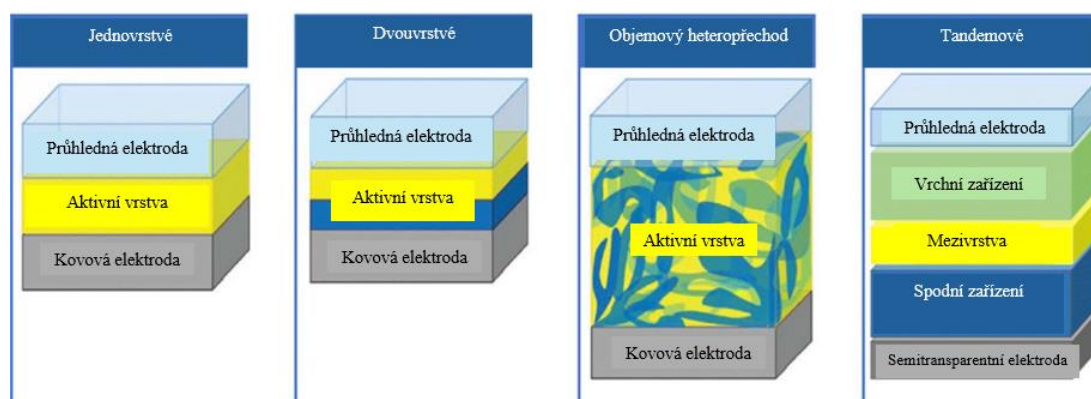
Zajímavé optické a elektrické vlastnosti organických polovodičů jsou dány přítomností konjugovaného  $\pi$  elektronového systému. Nejdůležitější vlastností související s touto konjugací jsou  $\pi$  elektrony, které způsobují vyšší pohyblivost než  $\sigma$  elektrony. To má za následek snížení energetického rozdílu mezi HOMO-LUMO hladinami organických molekul, což způsobuje, že mohou fungovat jako absorbéry světla v případě organických solárních článků nebo emitory světla jako v organických světelných diodách.[4][9]

### 2.2.1 Fungování OSC

Základní kroky fungování organických solárních článků zahrnují absorpci světelného záření organickými polovodičovými molekulami, které generují elektrostaticky vázaný pár elektronů a děr zvaný exciton. Pro rozdělení excitonů v OSC je preferovanější heteropřechod dvou materiálů s různou elektronovou afinitou pro separaci náboje, což způsobuje hlavní rozdíl v mechanismu fungování organických solárních článků ve srovnání s anorganickými alternativami. Dalším důležitým krokem je tedy difuze excitonů z místa, kde vznikají, na rozhraní heteropřechodu, a zde dochází k jejich štěpení na volné náboje a ty jsou pak transportovány k příslušným elektrodám.[4]

### 2.2.2 Typy OSC

OSC lze rozdělit do několika typů podle architektury aktivní vrstvy a způsobu uspořádání donorových a akceptorových materiálů. S postupným vývojem od jejich počátku v 80. letech došlo k výraznému zlepšení jejich struktury a účinnosti. Nejstarším typem je jednovrstvý článek a nejmodernějším a nejkomplicovanějším je architektura tandemová. Typy jsou graficky zobrazeny v **Obr 3**.



**Obr 3** Struktura OSC, převzato z [12]

#### *Jednovrstvé (Single layer)*

Jednovrstvý OSC obsahující vrstvu fotoaktivního materiálu obklopen elektrodami (katoda a anoda). Tyto články mají nízkou efektivitu ze dvou důvodů: elektrické pole potřebné pro disociaci excitonu je příliš nízké a oddělené náboje musí projít stejným prostředím, aby se dostaly k elektrodám, což vede k vysokým rekombinačním ztrátám.[12]

#### *Dvouvrstvé (Bilayer)*

Dvouvrstvé heteropřechody, jak název napovídá, používají k oddělení náboje dva různé materiály, tzv. donor a akceptor. Přestože tyto články dosahují lepších výkonů než jednovrstvá zařízení, neschopnost větší části excitonů dosáhnout donor-akceptorového přechodu omezuje jejich výkon.[12]

#### *Objemový heteropřechod (Bulk heterojunction)*

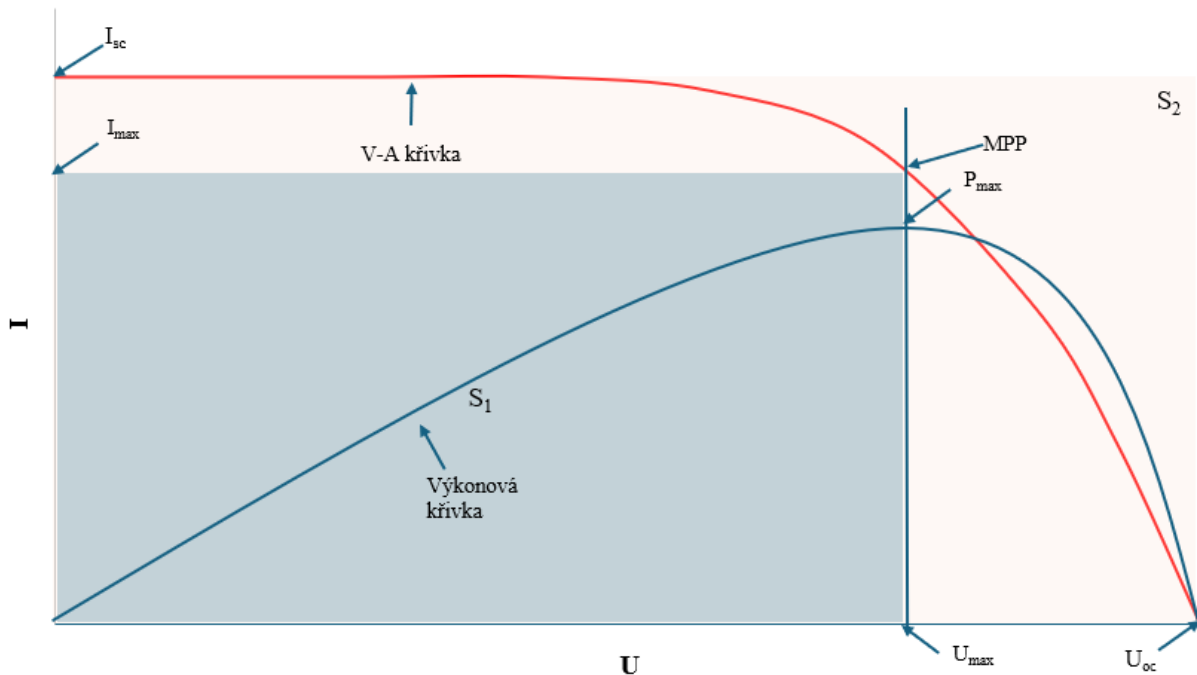
OSC s objemovým heteropřechodem využívá směs akceptorového a donorového materiálu tak, že efektivní délková škála směsi je podobná délce difuze excitonů. To vede k účinnému odvádění nábojů a výrazně vyššímu výkonu. Aby se snížily ztráty proudu, protože donorové i akceptorové materiály by byly v kontaktu s oběma elektrodami, lze použít další vrstvy, jako jsou vrstvy blokující elektrony nebo díry.[12]

### Tandemová struktura (Tandem)

Tandemové OSC se skládají ze dvou nebo více sériově propojených subčlánků, které zvyšují účinnost zařízení díky lepšímu využití slunečního spektra. Každý subčlánek obsahuje absorpční a transportní materiál. Absorpční materiál zachycuje fotony a generuje elektron-děrové páry, zatímco transportní materiál zajišťuje separaci a přenos generovaných nosičů náboje. Efektivní přenos náboje mezi subčlánsky zajišťuje jejich vzájemné rozhraní. První subčlánek obvykle disponuje vyšší šířkou zakázaného pásu než druhý, což umožňuje absorpci vysokoenergetických fotonů, zatímco nízkoenergetické fotony jsou absorbovány druhým subčlánskem. Tento design umožňuje širší pokrytí spektra slunečního záření a významně zvyšuje celkovou účinnost přeměny energie.[12]

### 2.2.3 Charakterizace solárního článku

Pro charakterizaci se používá měření volt-ampérových (V-A) charakteristik, ze kterých lze získat následující veličiny.



Obr 4 Graf V-A charakteristika s výkonovou křivkou.

#### Napětí naprázdno – $U_{oc}$

Napětí naprázdno  $U_{oc}$  je maximální napětí na výstupních svorkách fotovoltaického článku při nulovém proudu a bez připojené zátěže.  $U_{oc}$  je to maximální napětí fotovoltaického článku při dané teplotě a intenzitě osvětlení. Velikost napětí naprázdno se pohybuje v desítkách až stovkách mV.

#### Proud nakrátko – $I_{sc}$

Proud nakrátko nebo také zkratový proud je běžně uváděn v prodejních katalogích u vlastností pro solární panely nebo je možno jednoduše odečíst z voltampérové charakteristiky. Značí se jako  $I_{sc}$  a jedná se o maximální možný proud, který je schopen solární článek při určitém osvětlení (pro danou lokalitu) a nulovém napětí dodávat. U článků se hodnota proudu nakrátko řádově pohybuje od desítek mA až po jednotky A, a je ovlivňována intenzitou záření, spektrální citlivostí článku, teplotou a velikostí plochy článku. Tvar V-A charakteristiky jako takové proud nakrátko téměř neovlivňuje, udává pouze počáteční bod křivky na proudové ose.

S  $I_{sc}$  také závisí hustota zkratového proudu ( $J_{sc}$  – Short-circuit current density), které se vztahuje k ploše daného článku a proudu, podle rovnice 2, kde A představuje plochu článku.[13]

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{A}$$

2

### *Proud při maximálním výkonu – $I_{\max}$*

Je to proud, při kterém solární článek dodává svůj maximální výkon. Hodnota tohoto proudu je udávána v katalogových listech a je vždy menší než hodnota zkratového proudu  $I_{sc}$ . S pomocí hodnoty  $I_{\max}$  lze matematicky dopočítat maximální elektrický výkon článku. Profil V-A charakteristiky velikost proudu  $I_{\max}$  nijak nemění, naopak důsledkem změn jiných parametrů ovlivňujících V-A charakteristiku může růst či klesat hodnota proudu  $I_{\max}$ . [13]

### *Napětí při maximálním výkonu – $U_{\max}$*

Dalším parametrem potřebným k matematickému výpočtu maximálního elektrického výkonu a efektivity solárního článku. Obdobně jako proud při maximálním výkonu můžeme najít v katalogovém listu také hodnotu  $U_{\max}$ , ta bude také nižší v porovnání s hodnotou napětí naprázdno  $U_{oc}$ . Stejně jako v případě  $I_{\max}$  ani hodnota  $U_{\max}$  na tvar V-A charakteristiky nemá vliv.[13]

### *Maximální elektrický výkon – $P_{\max}$*

Maximální výkon je hodnota výkonu, kterou je schopen článek dodávat. Bod  $P_{\max}$  je přibližně ve středu ohybu voltampérové charakteristiky. Hodnota maximálního výkonu je dána vztahem[13]

$$P_{\max} = U_{\max} \cdot I_{\max} \quad 3$$

Všechny parametry měření jsou graficky znázorněné v **Obr 4**.

### *Faktor plnění – FF*

Fill Factor, neboli faktor plnění, představuje poměr mezi maximálním elektrickým výkonem solárního článku v bodě maximálního výkonu ( $P_{\max}$ ) a výkonem, který odpovídá součinu napětí naprázdno a proudu nakrátko. Tento poměr lze v grafu (V-A) charakterizace znázornit pomocí obdélníkových ploch, které jsou označeny jako  $S_1$  a  $S_2$ . Hodnota faktoru plnění závisí na kvalitě kontaktů, vlastnostech použitého materiálu a odporu aktivní polovodivé vrstvy, což z něj činí důležitý ukazatel celkové kvality solárního článku. Teoreticky může dosahovat maximální hodnoty 1 (100 %), avšak v reálných podmínkách je vždy nižší. Vyšší hodnota FF znamená efektivnější přenos výkonu do zátěže. U monokrystalických a polykrystalických solárních článků se tento parametr obvykle pohybuje mezi 0,7 a 0,85, zatímco u amorfních článků dosahuje přibližně 0,6. Jelikož se jedná o výpočtovou veličinu, je daná tvarem charakteristiky článku z V-A měření.[14; 13]

Faktor plnění fotovoltaického článku je definován jako poměr maximálního výkonu ( $P_{\max}$ ) a součinu napětí naprázdno ( $U_{oc}$ ) a proudu nakrátko ( $I_{sc}$ ).

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{sc} \cdot U_{oc}} = \frac{I_{\max} \cdot U_{\max}}{I_{sc} \cdot U_{oc}} \quad 4$$

### *Účinnost přeměny energie ( $\eta$ , PCE)*

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_0} = \frac{|U_{\max} \cdot I_{\max}|}{P_0} = \frac{|U_{oc} \cdot I_{sc}| \cdot FF}{S \int_0^{\infty} M(\lambda) \frac{h \cdot c}{\lambda} d\lambda} = \frac{|U_{oc} \cdot I_{sc}| \cdot FF}{S \cdot E_0} \quad 5$$

kde  $P_0$  je výkon záření dopadajícího na článek o ploše  $S$  (zářivý tok ve watttech),  $P_{\max}$  je maximální výkon získávaný z článku (odpovídá mu hodnota největšího součinu hodnot napětí  $U_{\max}$  a proudu  $I_{\max}$ ),  $U_{oc}$  (Open Circuit) je napětí naprázdno (při nulovém proudu),  $I_{sc}$  (Short Circuit) je elektrický proud nakrátko (při nulovém napětí), a FF je tzv. faktor plnění (Fill Factor).[13]

Jak bylo zmíněno dříve, účinnost je důležitý parametr využívaný ke srovnávání fotovoltaických článků a panelů. Jedná se o účinnost článku přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Lze ji tedy definovat jako poměr elektrického výkonu článku v bodě MPP a výkonu dopadajícího slunečního záření, který je dán intenzitou ozáření  $E$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] a plochou solárního článku  $A$  [ $\text{m}^2$ ]. Účinnost solárních článků je značně ovlivňována vlastnostmi materiálu, ze kterého je článek vyroben, každý materiál je totiž schopen různé vlnové délky dopadajícího slunečního záření využívat s různou účinností (spektrální citlivost článku). [13]

V roce 2022 bylo dosaženo efektivity 47,6 % a jedná se o čtyřspojový koncentrátorový fotovoltaický (CPV) článek, který využívá kombinaci různých polovodičových materiálů na bázi III-V sloučenin (např. GaInP, GaAs, GaInAs atd.). Tento výsledek nebyl do dnešního dne překonán [15; 13].

### *Semitransparentní solární články*

ST-OSC jsou specifickým typem fotovoltaické technologie, která je navržena tak, aby současně generovala elektrickou energii a propouštěla viditelné světlo. To je činí ideálními pro aplikace, jako jsou fotovoltaické integrované stavební prvky, například okna, střešní světlíky nebo skleníky. Tyto články jsou navrženy s cílem vyvážit PCE a AVT což jim umožňuje zachytávat energii především v ultrafialové a blízké infračervené části spektra, zatímco viditelné světlo prochází. Díky této dvojí funkci představují semitransparentní solární články slibné řešení pro udržitelnou výrobu energie v moderní architektuře. [5]

### *Průměrná viditelná transmitance – AVT [%]*

Average Visible Transmittance (AVT) je veličina, která udává průměrné procentuální množství viditelného světla (v rozsahu vlnových délek přibližně 380–780 nm), které projde daným materiálem. Tato hodnota je klíčovým parametrem při charakterizaci optických vlastností průhledných a poloprůhledných materiálů, zejména ve stavebnictví (např. u okenních skel) a ve fotovoltaice, především u semitransparentních solárních článků. AVT umožňuje posoudit míru průhlednosti zařízení z pohledu lidského oka a tím i jejich estetické a praktické využití v integrovaných aplikacích, jako jsou například BIPV (Building-Integrated Photovoltaics). [1; 16] Výpočet AVT se provádí jako vážený průměr spektrální propustnosti v rozsahu viditelného světla, přičemž se bere v úvahu spektrální citlivost lidského oka. Matematicky se AVT definuje pomocí následující rovnice:

$$AVT = \frac{\int_{380}^{780} T(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) d\lambda} \quad 6$$

kde  $T(\lambda)$  je spektrální propustnost při vlnové délce  $\lambda$ ,  $V(\lambda)$  je spektrální citlivost lidského oka (tzv. fotopická funkce) a integrační meze odpovídají rozsahu viditelného světla. Využití AVT je zásadní pro nalezení rovnováhy mezi energetickým ziskem a vizuální komfortností při návrhu transparentních solárních zařízeních. [16]

### *Účinnost využití světla (LUE)*

Vysoce výkonnostní ST-OSC zařízení potřebuje dosáhnout vysoké PCE, tak i AVT. Nejde však dosáhnout vysokých hodnot pro oboje veličiny, proto se LUE využívá pro zjištění balance mezi těmito vlastnostmi. LUE je hlavním indikátorem pro vyjádření technické výkonu ST-OSC. PCE a AVT lze optimalizovat pro získání nejlepšího LUE. Aktuálně většina jednovrstvých ST-OSC může dosáhnout přes 3 % LUE. [1]

$$LUE = AVT \cdot PCE \quad 7$$

## 2.3 Aktuální stav řešené problematiky

Transparentní vrchní elektrody (TTE) jsou klíčovou komponentou ST-OSC. Tyto elektrody musejí kombinovat vysokou elektrickou vodivost s propustností viditelného světla, aby zařízení mohlo efektivně generovat energii a zároveň plnilo estetické požadavky, například v architektuře. Mezi nejčastější studované třídy materiálů patří: kovové nanodrátky, ultratenké kovové vrstvy, vodivé polymery a uhlíkové nanomateriály, které jsou níž rozepsané.

Kovové nanodrátkové elektrody, zejména na bázi stříbra (AgNW), představují atraktivní řešení díky kombinaci vysoké propustnosti (až 90 %) a nízkého odporu ( $<10 \Omega \text{ sq}^{-1}$ ), které konkurují ITO elektrodám. V roce 2012 Yang a kol. využili metodu sprejování pro dosažení vysokých výsledků jako vrchní transparentní elektroda[17]. Tyto elektrody lze snadno integrovat do ST-OSC pomocí levných metod, jako jsou spray coating nebo spin coating. Klíčem k jejich efektivitě je zajištění homogenní distribuce nanodrátek a jejich pevnosti na aktivní vrstvě. Modifikační vrstvy, jako ZnO/PDINO[18], zlepšují adhezi nanodrátek a chrání aktivní vrstvu před mechanickým poškozením. Kombinace AgNW s antireflexními vrstvami navíc dokáže dále zvyšovat propustnost viditelného světla a celkovou účinnost zařízení. [1]

Ultratenké kovové vrstvy (například Au nebo Ag) jsou další populární volbou pro TTE díky jejich vysoké propustnosti a vodivosti. Tloušťka těchto vrstev je obvykle  $< 15 \text{ nm}$ , aby byla zajištěna minimální absorpce světla. Homogenita vrstvy je klíčová pro dosažení nízkého odporu ( $< 20 \Omega \text{ sq}^{-1}$ ) a vyšší propustnosti. K tomu se využívají "seed" vrstvy, jako například Ca nebo Al, které napomáhají růstu souvislého filmu. Jedna z neúčinnějších kombinací, Au/Ag transparentní elektroda, dosahuje propustnosti až 83 % v oblasti viditelného spektra a je vhodná pro vysokovýkonné ST-OSC[19]. Skupina Ma a kol. připravili článek s aktivní vrstvou PTB7-Th:PC<sub>71</sub>BM a kompozitními elektrodami MoO<sub>3</sub> (10 nm)/Ag (15 nm)/MoO<sub>3</sub>(30 nm) dosáhli 5,01 % PCE a 50,3 % AVT. [1]

Mezi nejpoužívanější vodivé polymery patří PEDOT:PSS, který se vyznačuje vysokou propustností (90 % ve viditelném spektru), flexibilitou a snadným zpracováním[20]. Aby se zlepšila jeho vodivost, je možné modifikovat iontovými kapalinami nebo hybridizovat s dalšími materiály. Nicméně dlouhodobá stabilita PEDOT:PSS při vystavení vlhkosti a kyslíku zůstává výzvou. Nové strategie, jako je sekvenční depozice nebo ochranné vrstvy, řeší této problémy a vedou k zařízením s vyšší stabilitou. Příkladem jsou zařízení dosahující 6,32 % PCE a 35,4 % AVT, které byly připraveny skupinou Lee a kol. Ty byly založeny na struktuře ITO/ZnO/PTB7-Th:IDTBR/PEDOT:PSS/IL[21]. [1]

Uhlíkové nanomateriály, jako jsou grafen a uhlíkové nanotrubičky (CNTs), nabízejí výhody v podobě nízkých nákladů, vysoké propustnosti (až 90 %) a vodivosti ( $R_s < 30 \Omega \text{ sq}^{-1}$ )[22]. CNTs lze laminovat na zařízení pomocí metod kompatibilních s organickými materiály, přičemž jejich vodivost lze zlepšit dopováním (např. HNO<sub>3</sub> nebo MoO<sub>3</sub>)[23]. Grafen lze vrstvit pro vytvoření transparentní anody a katody, přičemž kombinace n-typového a p-typového grafenu umožňuje dosáhnout účinností přes 3 % PCE. [1]

Přestože současné transparentní elektrody poskytují výborné parametry, výzvou zůstává jejich stabilita při dlouhodobém provozu a kompatibilita s velkoškálovou výrobou. Kromě toho je potřeba dále zlepšit jejich vlastnosti, aby bylo možné překonat limity účinnosti a transparentnosti. Mezi perspektivní směry patří kombinace nových materiálů, jako jsou perovskity nebo hybridní organické-anorganické struktury, a pokročilé metody depozice, jako je roll-to-roll technologie.

## 3 Experimentální část

### 3.1 Příprava vzorků

#### 3.1.1 Čištění substrátů

Postup čištění substrátu probíhá v několika krocích. Prvním krokem se mechanicky očistí substráty za pomoci Neodisher a případně kartáčkem na zuby. Poté byly opláchnuty destilovanou vodou, následně vloženy do kádinky s Neodisher která byla vložena do ultrazvuku po dobu 15 minut. Tento proces byl proveden následně ve vodě a v IPA (isopropylalkohol) po stejnou dobu. Mezi kroky byly substráty omyty příslušným médiem. Po čistících cyklech substráty byly osušeny stlačeným vzduchem a vloženy do petriho misky, která byla uzavřena parafilmem pro zamezení zanesení substrátů cizími částicemi.

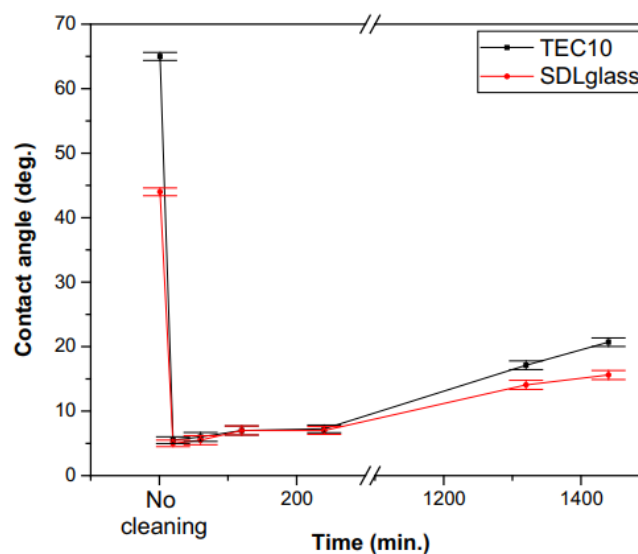
#### 3.1.2 Úprava povrchu

##### *Atmosférické plazma*

Použití plazmatu k úpravě substrátu pro depozici tenkých vrstev je efektivní metoda zlepšení adheze (smáčivosti) a kvality nanášených materiálů, zejména v oblasti solárních článků. Plazmová úprava substrátu, například pomocí atmosférického tlakového plazmatu (jak je použita v tomto případě), zvyšuje povrchovou energii substrátu, odstraňuje organické nečistoty a zlepšuje homogenitu depozice. Tento proces je obzvláště výhodný pro metody nanášení jako chemická depozice z roztoku, spin coating nebo tisk, kde kvalitní přilnavost vrstvy k podkladu je klíčová pro elektrické a optické vlastnosti výsledného zařízení.[24]

Mezi hlavní výhody využití atmosférické plazmové úpravy substrátu patří eliminace nutnosti použití vakuového systému, což snižuje výrobní náklady a umožňuje integraci do průmyslové výroby solárních panelů. Plazmová aktivace substrátu zlepšuje uniformitu nanášených vrstev, snižuje počet defektů, jako jsou pinhole defekty, a vede k lepším optickým a elektrickým vlastnostem materiálů. Například v případě vrstvy CdS bylo prokázáno, že plazmově ošetřený substrát vede k rychlejší depozici a vyšší kvalitě tenké vrstvy oproti konvenčně čištěným substrátům.[24]

Nevýhoda plazmové úpravy může být citlivost na atmosférické podmínky, jako je vlhkost a složení plynné směsi ovzduší. Dále vzdálenost od zdroje plazmatu a doba expozice, což může způsobit rozdíly v uniformitě vrstvy. V poslední řadě stárnutí po plazmovém ošetření, kde bylo zjištěno, že po určité době (24 hodin) se snižuje efekt ošetření, přesněji při měření WCA (kontaktního úhlu s vodou) se úhel smáčivosti pomalu vrací do původních hodnot, jak je patrné v **Obr 5**. [24]



**Obr 5** WCA měření s odchylkami měření ukazuje stárnutí efekt pro úpravy atmosférickým plazmatem na TEC10 a sodnovápenatým skleným povrhu [24]

## Ozón

Ozonová úprava ( $O_3$ -UV) je metoda povrchové úpravy, při níž je povrch materiálu vystaven působení ozonu ( $O_3$ ) v kombinaci s ultrafialovým (UV) zářením. Tato technika je často využívána k čištění, sterilizaci, dopování a oxidaci povrchů široké škály materiálů.

$O_3$ -UV probíhá za pomoci ultrafialového záření o vlnové délce 184 nm a 254 nm. Záření o vlnové délce 184 nm rozkládá molekuly dvojmocného kyslíku ( $O_2$ ) na radikály singletního kyslíku ( $O$ ), které následně reagují s molekulami kyslíku za vzniku ozonu ( $O_3$ ). Ozon má vysokou oxidační schopnost a při kontaktu s povrchem materiálu dochází k oxidaci, čištění a dopování.[25]

Využívá se v mnoha oblastech vědy a průmyslu. V elektronice se uplatňuje při dopování polovodičů, jako jsou dvourozměrné materiály (např.  $MoS_2$ ), kde dochází ke změně typu vodivosti z n-typu na p-typ. V optoelektronice pomáhá ozonová úprava jemně ladit fotoluminiscenční vlastnosti materiálů a v biomedicínských aplikacích se využívá k povrchové sterilizaci.[25]

Má schopnost efektivně odstranit organické nečistoty a zlepšit smáčivost povrchu. Je využita jako bezkontaktní proces, kde ozon působí bez nutnosti mechanického kontaktu, což snižuje riziko poškození povrchu. Lze jej aplikovat na široké spektrum materiálů, včetně polovodičů a biomateriálů, díky tomu se jedná o univerzální použití. Taky lze kontrolovat dopování a díky tomu umožňuje jemně ladit optické a elektrické vlastnosti materiálů.[25; 26]

Oxidace a poškození povrchu, kdy příliš dlouhá expozice může způsobit oxidaci a strukturální poškození materiálu. Citlivost na délku expozice, optimální délka ozáření je klíčová. Závislost na substrátu, kdy efekt ozonové úpravy je ovlivněn typem substrátu, což komplikuje predikci výsledných vlastností. Také záleží na dopovaném materiálu, ne pro všechny lze použít tato metoda, protože u některých je efekt kontraproduktivní, jako bylo prokázáno u  $SnO_2$ , kdy se vrstva vůbec nevytvořila na substrátu. [25; 26]

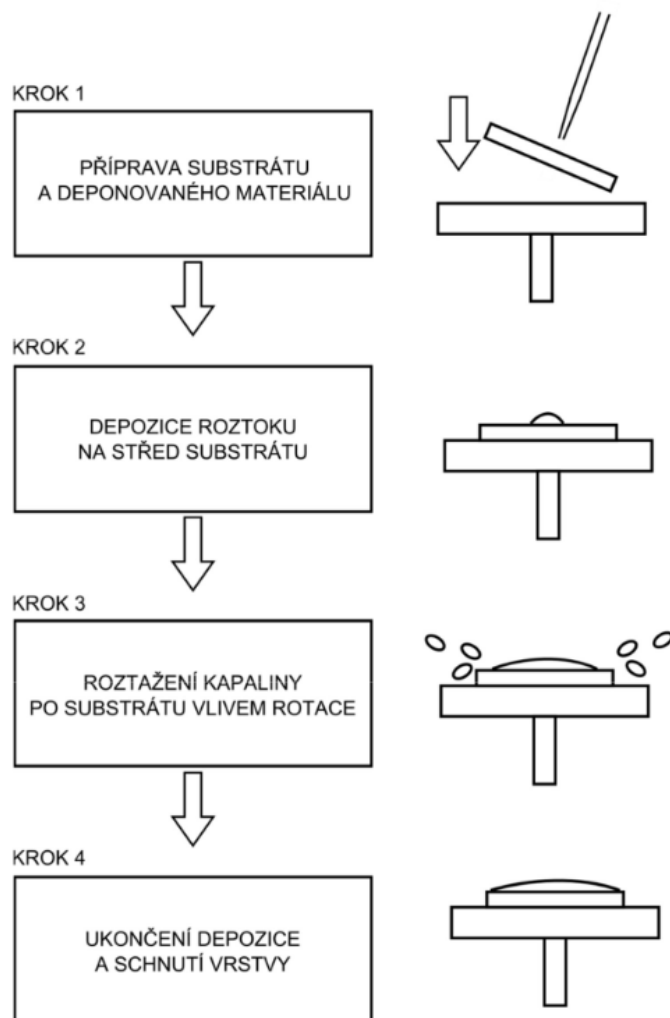
Ozonová úprava je flexibilní a efektivní metoda pro modifikaci povrchů, zvláště v oblastech polovodičů a optoelektroniky. Schopnost jemně ladit elektrické a optické vlastnosti materiálů nabízí potenciál pro využití v různorodých aplikacích. Správná optimalizace délky expozice a zvážení typu substrátu jsou klíčové pro dosažení požadovaných vlastností. [25; 26]

### 3.1.3 Spin coating

Spin coating (rotační nanášení) je široce využíván, jako reprodukovatelná technologie pro depozici materiálu pro přípravu tenkých uniformních anorganických nebo organických vrstev na substrát o větších, ale i menších plochách (desetiny až desítky  $cm^2$ ). Patří mezi metody depozice z roztoku, tedy postupy nanášení materiálu v kapalně fázi. Pro specifické potřeby depozice je materiál rozpouštěný nebo dispergovaný ve vhodném prostředí (voda, ethanol, organická rozpouštědla). Pro specifický účel depozice, ať za horka či za studena pro snížení povrchového napětí nebo urychlení vypařování[27; 28].

Princip spin coatingu je jednoduchý a spočívá v nanesení objemu deponovaného materiálu na střed horizontálně uchyceného substrátu. Odstředivé síly vzniklé rotací substrátu (od stovek až po tisíce otáček za minutu) způsobí rovnoměrné roztáhnutí materiálu po celém povrchu substrátu. Na základě parametrů, jako je rychlost otáčení, zrychlení nebo vlastností materiálu, lze upravovat podmínky nanášení a připravit tak vrstvy různé tloušťky i pro stejný materiál. Z těchto důvodů je tato technologie využívána v laboratorních podmínkách pro opakování pokusů a opětovné získávání stejných výsledků. Je však nutné dodržet stejné parametry depozice, jinak malá změna například v rychlosti nebo zrychlení způsobí změnu tloušťky vrstvy nebo neuniformitu vrstvy. Používá se pro výrobu struktur solárních článků, jako v tomto případě nebo pro výrobu mikrostruktur.[27]

Depoziční proces se skládá z několika kroků. V prvním kroku je do spin coateru vložen předem očištěný a upravený substrát (viz předešlé kapitoly) a zároveň je připraven roztok deponovaného materiálu, který byl předem vložen do ultrazvuku pro zhomogenizování a promíchání. Druhý krok je vlastní depozice malého objemu (v desítkách  $\mu\text{l}$ ) roztoku materiálu na střed substrátu, v případě špatných adhezních sil je možné roztáhnout roztok do všech okrajů. Ve třetím kroku je vlivem odstředivých sil roztažená vrstva po povrchu substrátu. Během odstředování dochází k postupnému odpařování rozpouštědla, vrstva zvyšuje svoji viskozitu a usychá. Postupným schnutím se vlivem adheze a zvyšování viskozity vrstvy zpomaluje a vrstva získává svoji finální morfologii. Všechny kroky jsou zobrazeny v **Obr 6**. [27]



**Obr 6** Schéma spin coatingu převzato z [29]

## 3.2 Měření

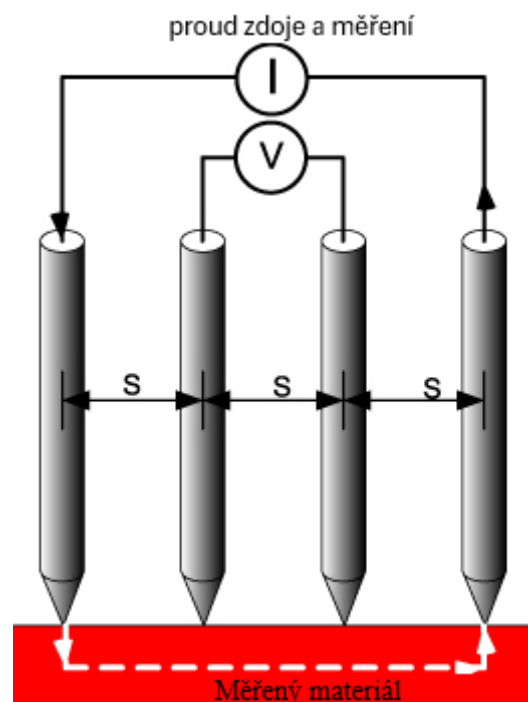
### 3.2.1 Absorbance (UV-Vis spektrometrie)

Měření absorbance díky technologii UV-Vis spektrometrie je v dnešní době často využívané pro stanovení optických vlastností materiálů, ale nepoužívá se pouze v materiálové chemii, ale i v medicíně, forenzních vědách nebo v potravinářství. Spektrofotometr měří a zaznamenává absorbanci v závislosti na vlnové délce dopadajícího záření. Tuto závislost lze graficky zobrazit v podobnosti absorpčního spektra. Existují dva typy spektrofotometrů, a to jednopaprskový a dvoupaprskový spektrofotometr. Jednopaprskový spektrofotometr měří pouze vzorek a je nutné před měřením vynulovat přístroj na referenci, zatímco u dvoupaprskového prochází jeden paprsek přes blank a druhý přes vzorek, tímto se docílí jednoduššího měření, především kvůli tomu že není nutné vždy po měření přeměřovat referenci pro každou vlnovou délku kvůli možnosti rozdílu. Pro měření absorbance byl v této práci využíván spektrofotometr Varian Cary 50.[30]

Pro využití na měření absorbance použité materiály se vyčistily substráty skla a křemenného skla, kde substrát skla byl použit při materiálech AgNW a ZnO, zatímco křemenný substrát byl použit při měření materiálu SnO<sub>2</sub>.

### 3.2.2 Čtyřbodové měření elektrického odporu (4W)

Čtyřbodová metoda měření odporu, také jiným názvem Kelvinova metoda, eliminuje vliv odporu přívodu a přechodových odporů svorek: Dva vodiče se používají k přivedení elektrického proudu do vzorku. Další dva vodiče měří napětí na vzorku. Tímto způsobem se minimalizuje vliv odporu vodičů a kontaktů, protože proud prochází vzorkem a napětí se měří na místech, kde není žádný (nebo jen minimální) vliv odporu. To umožňuje získat přesnější hodnotu měřeného odporu, zejména u malých hodnot. Aparatura pro měření je znázorněna v **Obr 7**. [31]



**Obr 7** Schéma 4W metody převzato z [32]

### 3.2.3 Měření tloušťky vrstev

Existuje několik metod stanovení tloušťky vrstev, jako je například profilometrie, mikroskopie nebo rentgenová reflexe. Pro naše účely byla využita mechanická profilometrie. Profilometrie je technologie pro analýzu morfologie povrchu. Cílem je zjištění tloušťky, uniformity, drsnosti a tvaru vrstvy. Vertikální rozlišení se obvykle pohybuje od řádu nanometrů až po mikrometry, záleží na nastavení profilometru. Pro účely tohoto měření vrstev bylo využité následující nastavení pro Bruker DektakXT:

*Tab 1 Nastavení profilometru pro měření tloušťky vrstev*

Profile	Hills And Valleys
Scan Duration	10 s
Scan Length	1 000 $\mu\text{m}$
Scan Resolution	0,333111 $\mu\text{m}$
Scan Type	Standat Scan
Stylus Force	3 mg
Stylus Scan Range	6,5 $\mu\text{m}$
Stylus Type	Radisu: 12,5 $\mu\text{m}$

U mechanického profilometru dochází k přímému kontaktu stylusu (hrotu) se vzorkem, přitlačná síla může být nastavena (udává se v mg a pohybuje se v rozmezí od 0,03 mg do 15 mg). Tento fakt je velice užitečný pro nastavení pro každý materiál, abychom mohli eliminovat přítomnost nečistot, a pro zjištění, jestli vrstva je více hrbolatá nebo s plynulejšími přechody tloušťky. Naopak při špatném nastavení lze poškodit vzorek, pokud je vzorek měkký a síla neúměrně veliká.

Při měření je vzorek vložen na podstavec a je v přímém kontaktu se stylusem. Vzorek se pohybuje s podstavcem, který vykonává horizontální pohyb a stylus vertikální, tím měří nerovnosti na vzorku.

Pro stanovení tloušťky bylo měřeno na třech místech substrátu, a to pro levou (L), střední (S) a pravou (P) část.

### 3.3 Příprava ST-OSC

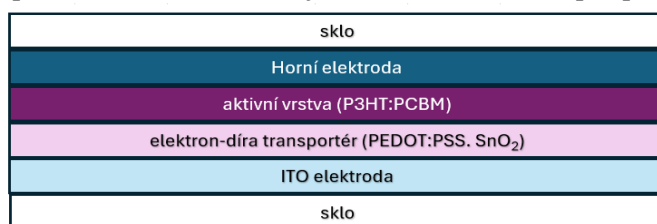
Všechny ST-OSC byly připravovány na komerčním skleněném substrátu s ITO elektrodami (Ossila S101), tyto substráty byly čištěny stejným způsobem, jak bylo popsáno v kapitole 3.1.1.

Následným krokem je depozice materiálu, který funguje jako elektronová nebo děrová transportní vrstva, v normální struktuře se využívá PEDOT:PSS pro transport děr a v inverzní bylo využito  $\text{SnO}_2$  pro transport elektronů viz kapitoly 4.4 a 4.5.

Práce na spin coateru pro depozici aktivní vrstvy probíhala v glove boxu s dusíkovou atmosférou pro eliminaci znečištění článku a zamezení degradace organického materiálu. Po depozici byla společná ITO elektroda očištěna štětečkem s chloroformem a na vzorky byla buď napařena nebo nanесena vrchní elektroda.

Po konečném nanесení či napaření elektrod byly články enkapsulovány pryskyřicí pro fotovoltaické články a sklem. Tento konečný krok byl proveden taky v glove boxu. Tímto krokem byl článek uzavřen kvůli zamezení vniku cizích částic.

Kompletní struktura připravovaného ST-OSC je znázorněna v **Obr 8** pro přehlednou ukázkou.



**Obr 8** Schéma ST-OSC

## 4 Výsledky a diskuse

### 4.1 AgNW

Cílem tohoto zkoumání bylo zjištění vlastností stříbrných nanodrátků (AgNW) jako elektrody pro ST-OSC. Pro tento účel byl využit Transparent Conductive Ink od NanoIntegris.

#### 4.1.1 Zkoumání jedné vrstvy materiálu AgNW

##### *Příprava vrstvy*

Prvním krokem bylo zjištění vlastností nanášení na skleněná podložná sklička. Ta byla nejdříve vyčištěna pro nanášení metodou spin coating.

Dalším krokem byl spin coating, různou změnou rychlostí přístroje a změnou metody nánosu se zjišťovaly vlastnosti smáčivosti a vytváření jednotné vrstvy (**Tab 2**), kde bylo využito jednotný objem depozitovaného materiálu a to 50  $\mu\text{ml}$ . Potom byly vloženy na hot plate při 120 °C.

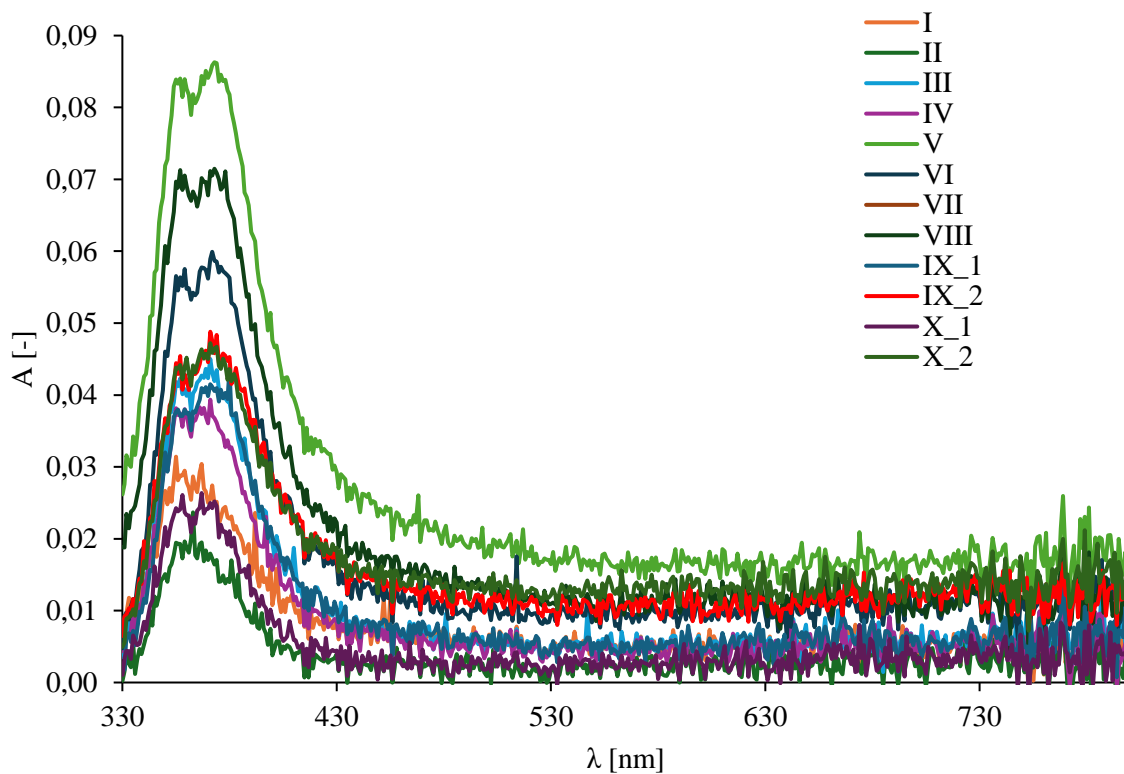
Z pozorování okem je patrné, že vrstva sama o sobě nemá po nánosu skoro žádnou barvu, ale po zapečení je patrná změna barvy na mírně šedou.

**Tab 2** Parametry pro depozici tenkých vrstev

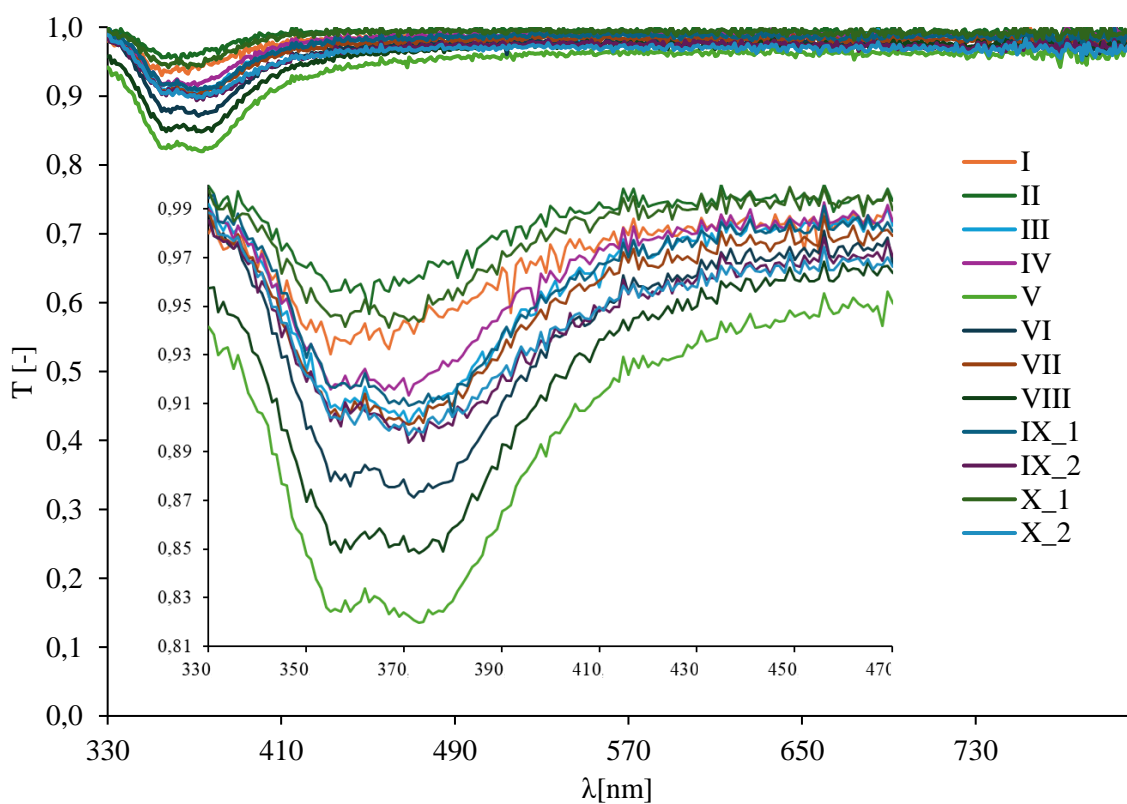
č. vzorku	metoda	$v_1$ [ot/min]	$a_1$ [RPM/s]	$t_1$ [s]	$v_2$ [ot/min]	$a_2$ [ot/s <sup>2</sup> ]	$t_2$ [s]
I	dynamická	3 000	1 500	45	-	-	-
II	statická	3 000	1 500	45	-	-	-
III	statická	2 000	1 000	45	-	-	-
IV	dynamická	2 000	1 000	45	-	-	-
V	statická	1 000	500	45	-	-	-
VI	statická	1 000	500	30	3 000	1 500	10
VII	statická	1 500	500	15	3 000	1 500	10
VIII	statická	500	100	60	3 000	1 500	10
IX	statická	250	125	60	3 000	1 500	10
X	statická	100	50	60	3 000	1 500	10

##### *Absorbance*

Pro první měření byl použit UV-Vis spektrofotometr pro zjištění absorbance každého vzorku. Pro měřenou oblast bylo zvoleno rozmezí mezi 330 a 800 nm, které spadá do oblasti, které je okem možné zaznamenat. Naměřené hodnoty mají zvýšenou absorbanci, hlavně v okolí 380 nm, jak je ukázáno v **Obr 9**. Zvýšená či snížená absorbance může souviset s tloušťkou vrstvy nebo jestli vrstva je homogenní, z toho důvodu byli vzorky IX a X změřeny pro 2 různé polohy a ukazují mírnou odchylku mezi sebou, což je potvrzeno v měření tloušťky profilometrem. Pro prokázání schopnosti propustnosti bylo v **Obr 10** zobrazena transmittance 0 až 1 a ve výšce bližší oblast pro oddělení vzorků.



**Obr 9** Naměřené hodnoty absorbance v celém rozmezí od 300 do 800 nm kde vzorky IX\_1 a IX\_2 jsou stejné vzorky, ale pro dvě polohy, a to stejné pro vzorek X



**Obr 10** Vypočítané hodnoty transmittance pro vlnové délku od 330 do 800 nm s výsečí pro rozmezí transmittance od 0,81 do 1 a 330 až 470 nm

### Elektrický odpor

Pro zjištění, jestli vrstva vykazuje vodivostní vlastnosti bylo využito čtyřbodové měření odporu a hodnoty vypsány do **Tab 3**. Tato metoda je užitečná pro homogenní vrstvu elektrody, u těchto vzorků bylo patrné, že hodnoty svým kolísáním naznačují možnost špatného rozložení vrstvy nebo přítomnost neznámých částic.

**Tab 3** Naměřené hodnoty odporu

č. vzorku	R [kΩ]
I	0,55
II	4,98
III	0,18
IV	0,18
V	0,01
VI	0,10
VII	0,19
VIII	0,09
IX	14,55
X	0,54

### Tloušťka vrstev

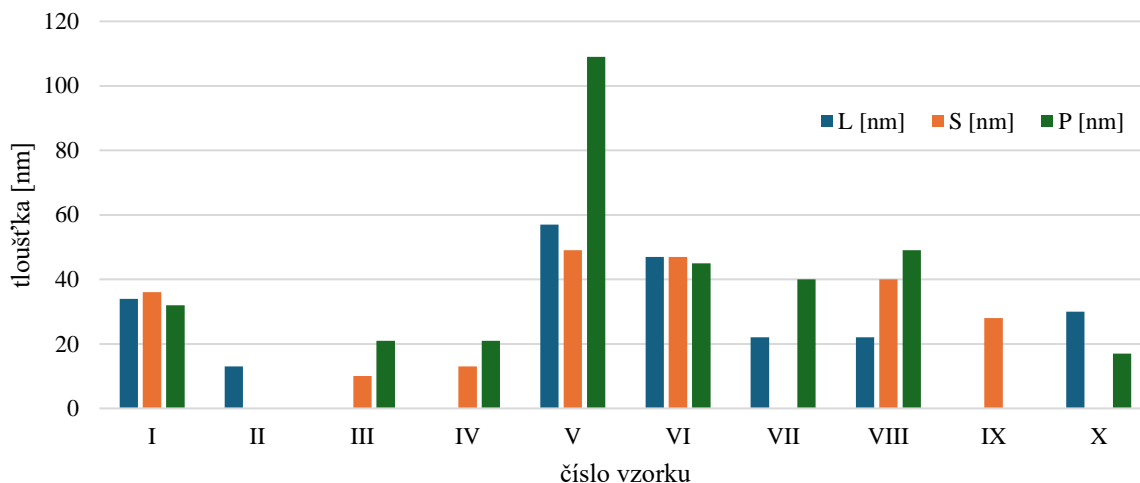
Měření jako takové je spíše orientační, protože není jisté, zdali se rýha vytvořila až na substrát nebo i do něj.

Jak je patrné v **Tab 4**, nebylo možné vždy změřit tloušťku nebo byla natolik tenká, že se nezdařilo ji změřit. Taky chyba mohla nastat při samotné přípravě rýhy. Data byla graficky zobrazena v **Obr 11**.

**Tab 4** Naměřené hodnoty tloušťky

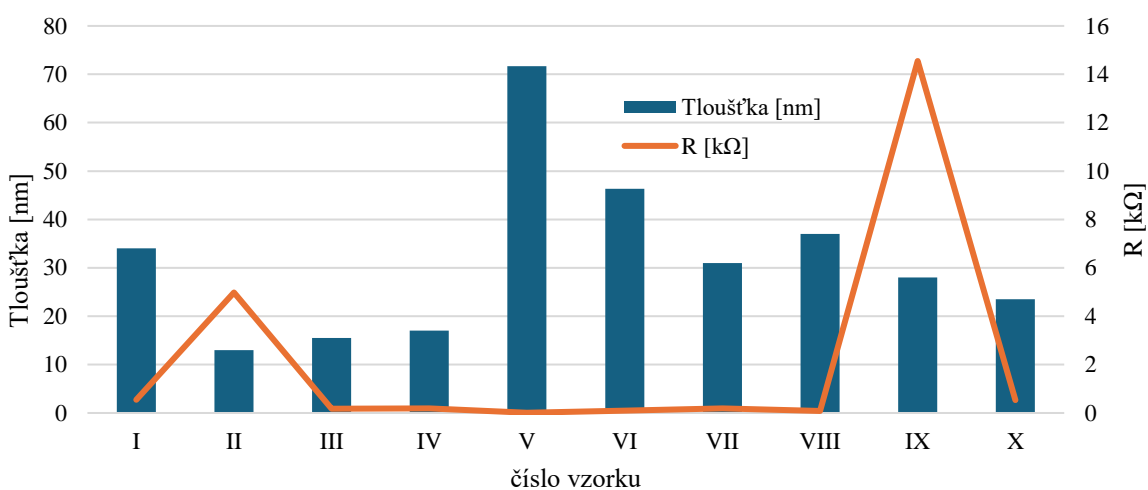
č. vzorku	L [nm]	S [nm]	P [nm]
I	34	36	32
II	13	-	-
III	-	10	21
IV	-	13	21
V	57	49	109
VI	47	47	45
VII	22	-	40
VIII	22	40	49
IX	-	28	-
X	30	-	17

Z celkového měření bylo vyhodnoceno, že vzorek IV je optimální nastavení pro další zkoumání, jako příprava solárního článku a více vrstev AgNW na sobě. **Obr 12** a **13** byly vytvořeny z průměru naměřených hodnot tloušťky a maximální absorbance. Je patrné, že hodnoty absorbance víceméně odpovídají změnám tloušťky, totéž však nelze říct o vztahu mezi tloušťkou a odporem. Z **obr 11** lze konstatovat, že se s klesající rychlostí zvyšuje neuniformita vrstvy a že nižší rychlost není dostatečná pro rovnoměrné rozptřeni materiálu po celé ploše.

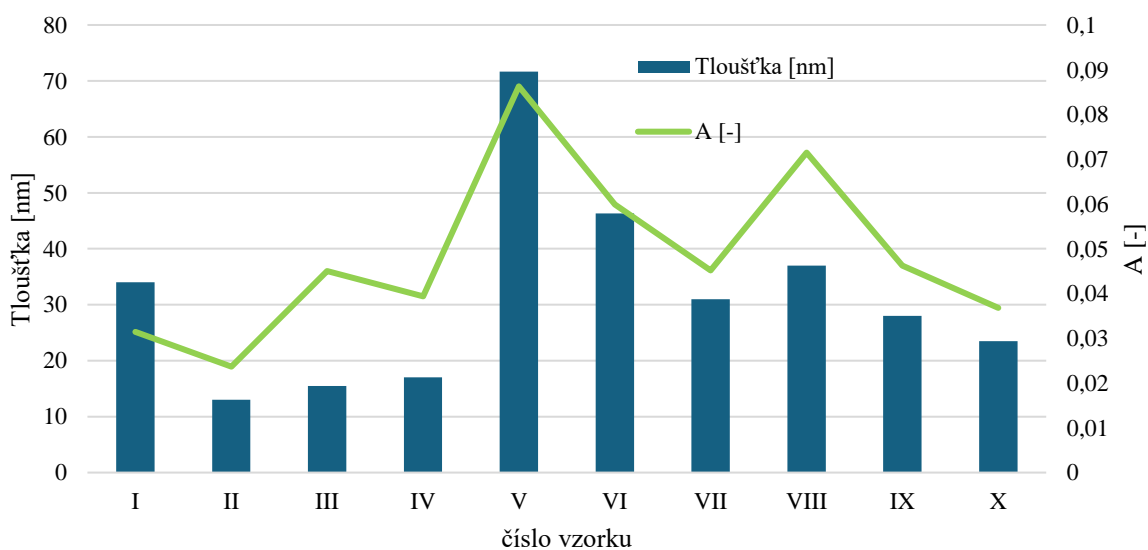


**Obr 11** Vizuální zobrazení tloušťky, kde L znamená levá část substrátu, S prostředek a P pravá část

### Zhodnocení



**Obr 12** Srovnání tloušťky vzorků s naměřeným odporem



**Obr 13** Srovnání tloušťky vzorků s naměřenou absorpcí

#### 4.1.2 Zkoumání více vrstev materiálu AgNW

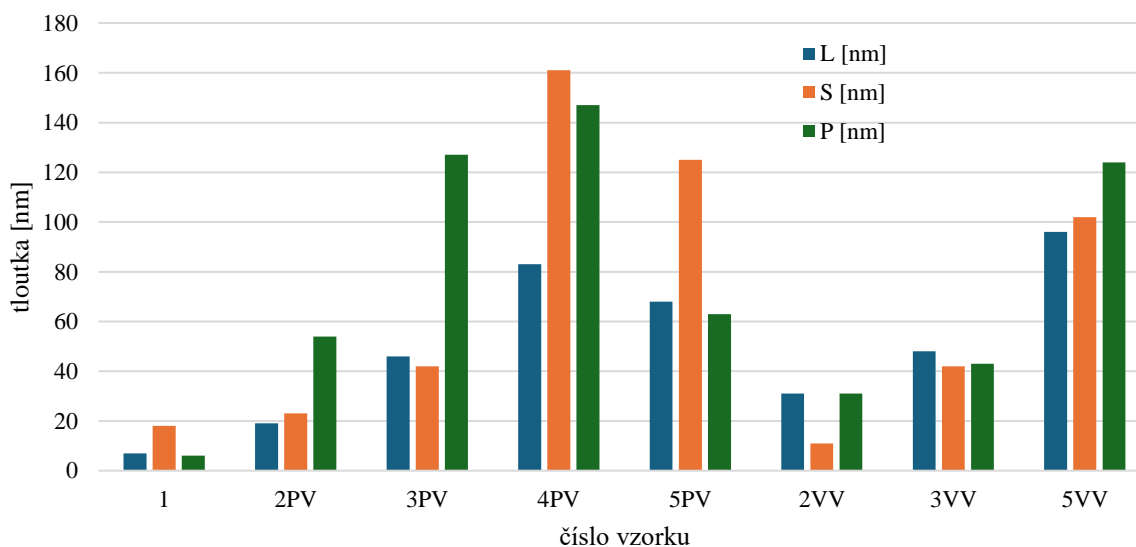
Pro zjištění, zdali rozdílná tloušťka vrstvy AgNW může ovlivnit charakter jako vrchní elektrody pro ST-OSC byl proveden pokus s několika různými konfiguracemi vrstev na sebe nanášených. Metoda spin coatingu byla pro všechny vzorky totožná a to 2 000 ot/s a 1 000 RPM po 30 sekund pro 50  $\mu$ l vzorku AgNW. Pro metody měření byly zvoleny dvě, měření tloušťky a 4W.

Vzorky s označením PV kdy se provedly postupné depozice materiálu na sebe, po jednom cyklu spin coatingu se provedla další, po všech depozicích se teplotně ošetřily vzorky při 120 °C. S označením VV jsou vzorky, které po depozici byly ošetřeny na 5 minut při stejné teplotě a následně se provedla další depozice a tyto kroky se opakovaly.

Data naměřených tloušťek byla sepsána do **Tab 5**. Začínají číslo vzorku značí počet vrstev a zkratka typ přípravy.

**Tab 5** Naměřené hodnoty tloušťky

č. vzorku	L [nm]	S [nm]	P [nm]
1	7	18	6
2PV	19	23	54
3PV	46	42	127
4PV	83	161	147
5PV	68	125	63
2VV	31	11	31
3VV	48	42	43
5VV	96	102	124

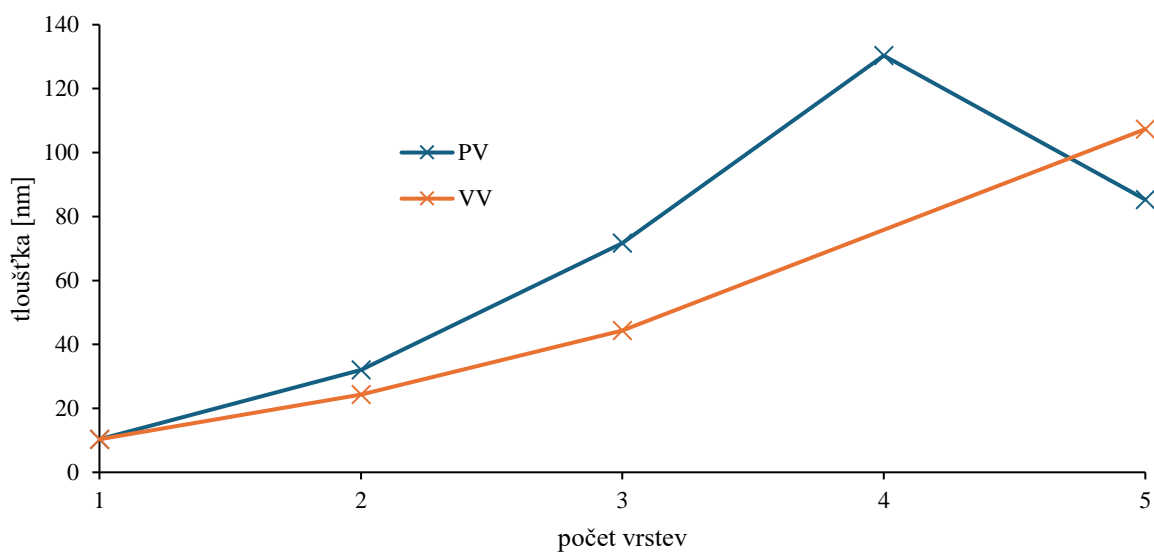


**Obr 14** Vizualní zobrazení tloušťky, kde L znamená levá část substrátu, S prostředek a P pravá část

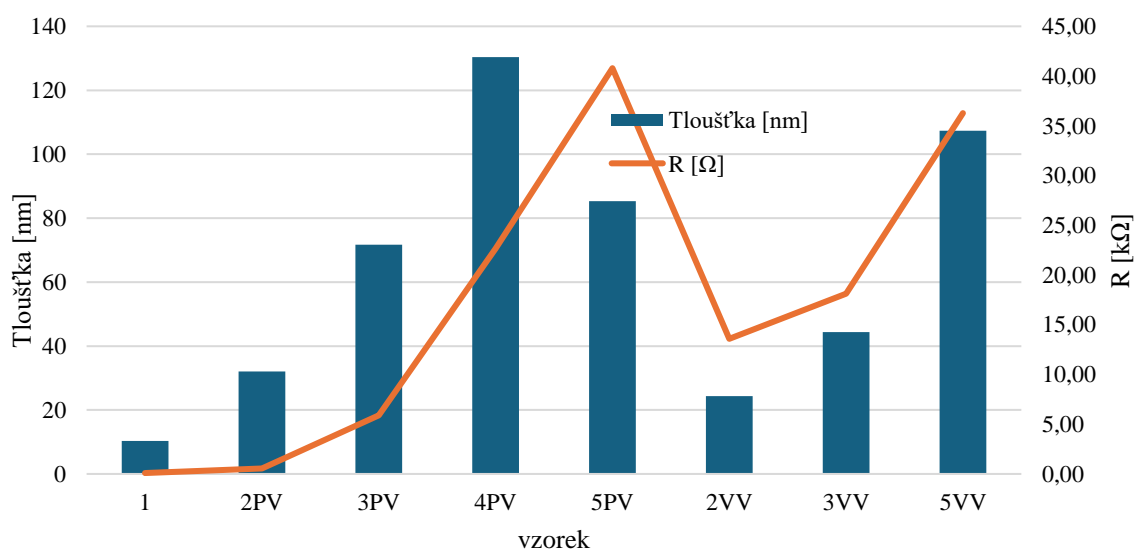
Vzorky byly změřeny na odpor, všechny vykazovaly stabilní hodnoty a byli uvedeny v **Tab 6**.

**Tab 6** Naměřené hodnoty odporu

č. vzorku	R [ $\Omega$ ]
1	0,09
2PV	0,54
3PV	5,89
4PV	22,66
5PV	40,79
2VV	13,60
3VV	18,13
5VV	36,26



**Obr 15** Průměrné naměřené hodnoty pro daný počet depositovaných vrstev



**Obr 16** Srovnání tloušťky vzorků s naměřeným odporem

Z měření pro zjištění optimální metody depozice více vrstev materiálu AgNW bylo zjištěno z **Obr 14** a průměrných hodnot v **Obr 15**, že optimální metoda je vrstvení materiálu (VV) kdy se mezi jednotlivými kroky depozice teplotně ošetří a následně potom se nanese další vrstva. Je to dáno tím, že při metodě VV se postupně vytvářejí uniformní vrstvy, zatímco metoda PV je rychlejší na přípravu, avšak na úkor uniformity. Největší rozdíl je patrný u pěti vrstev – metoda PV vykazuje nejvyšší hodnotu uprostřed, zatímco VV má hodnoty rovnoměrnější s menšími rozdíly mezi pozicemi. Z **Obr 16** je také patrné, že se zvyšující tloušťkou vrstvy zvyšuje i odpor, což potvrzuje očekávaný trend.

## 4.2 ZnO

### 4.2.1 Zkoumání jedné vrstvy ZnO

#### *Příprava vrstvy*

Jako v předešlé kapitole s AgNW bylo provedeno připraveno několik vzorků s daným materiálem ZnO statickou metodou a 35  $\mu$ l vzorku, jednotlivé nastavení spin coatingu bylo zaznamenáno v **Tab 7**. Po depozici byly vloženy na hot plate při teplotě 110 °C po dobu cca 10 minut a následně schlazeny.

**Tab 7** Parametry pro depozici tenkých vrstev

č. vzorku	$v_1$ [ot/min]	$a_1$ [RPM/s]	$t_1$ [s]	$v_2$ [ot/min]	$a_2$ [RPM/s]	$t_2$ [s]
I	1000	500	30	3000	1500	10
II	1500	500	30	3000	1500	10
III	2000	1000	30	3000	1500	10
IV	2000	1000	30	3000	1500	10
V	2500	1250	40	-	-	-
VI	3000	1500	50	-	-	-
VII	1500	500	40	3000	1500	10
VIII	250	125	30	3000	1500	10
IX	500	250	30	3000	1500	10

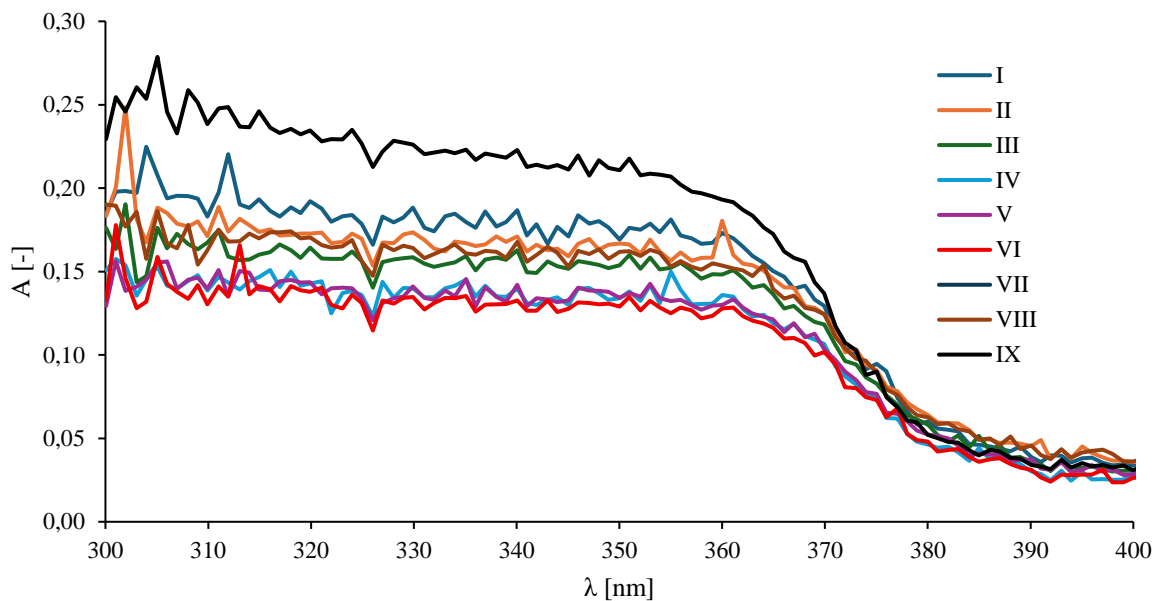
Z pozorování okem je patrné, že vrstva není homogenní a není roztažena do všech krajů.

#### *Elektrický odpor*

Pro zjištění, jestli vrstva vykazuje vodivostní vlastnosti bylo využito 4W. Tato metoda nebyla prokazatelná, protože veškeré měření odpovídalo sklu, tudíž je možné vysvětlení, že vrstva není homogenní a vrstva není souvislá. Z tohoto důvodu nebylo možné změřit žádný vzorek touto metodou.

#### *Absorbance*

Pro první měření byl použit UV-Vis pro zjištění absorbance každého vzorku. Pro měřenou oblast bylo zvoleno rozmezí mezi 300 a 680 nm, které spadá do oblasti, které oko může zaznamenat. Změřené vzorky mají zvýšenou absorbanci, hlavně okolo 300 nm, jak je ukázáno v **Obr 17**. Zvýšená či snížená absorbance má souviset s tloušťkou vrstvy, jak je patrné v rozdílu mezi vzorky VI a IX.



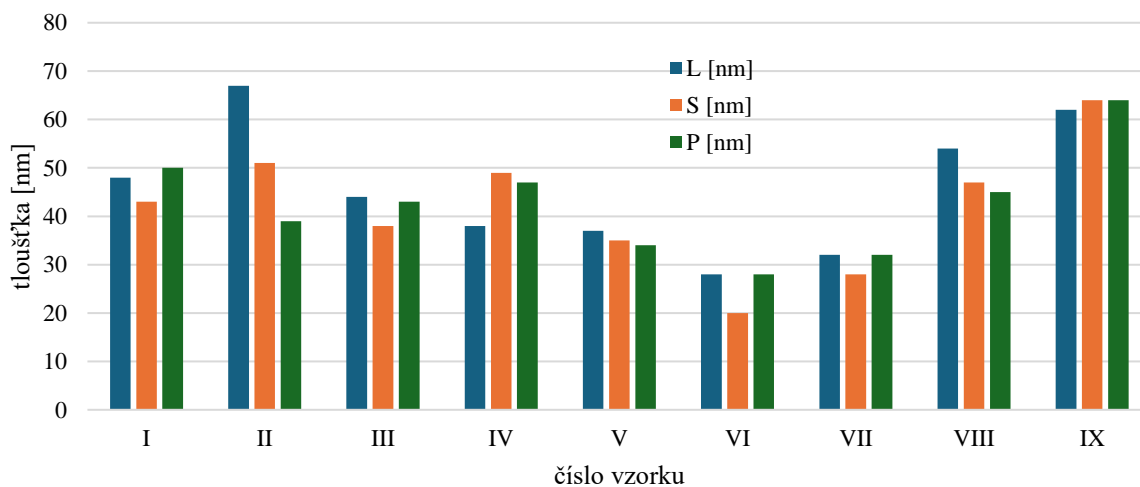
**Obr 17** Naměřené hodnoty absorbance pro ZnO

#### Tloušťka vrstvy

Jak je patrné v **Tab 8** a z grafického vyobrazení v **Obr 18** jsou vrstvy homogenní až na vzorek II kde za příčin mohla být špatná depozice materiálu. V porovnání oproti AgNW jsou vrstvy více homogenní.

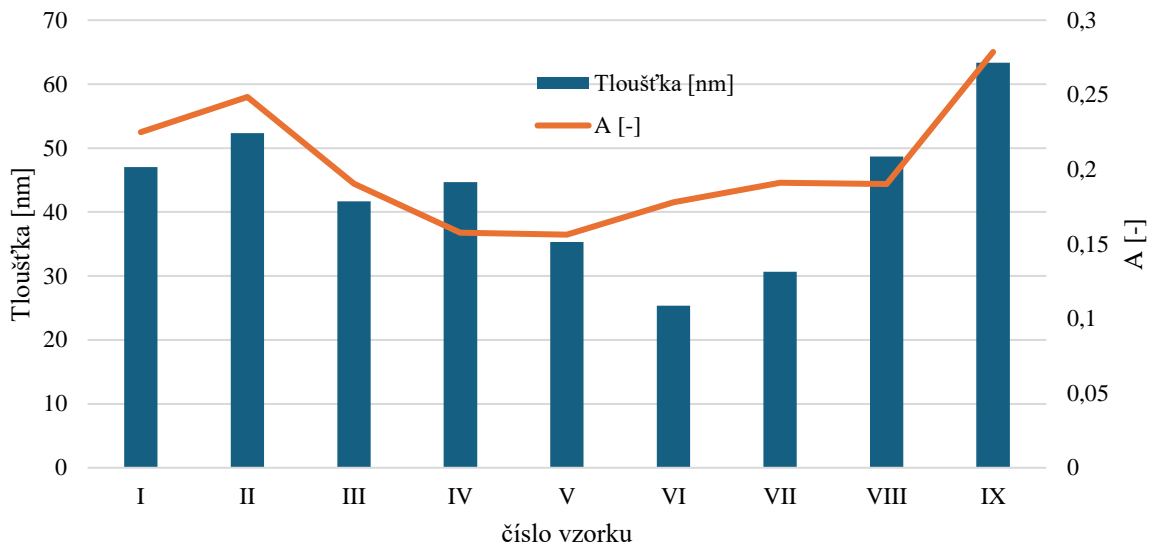
**Tab 8** Naměřené hodnoty tloušťky

č. vzorku	L [nm]	S [nm]	P [nm]
I	48	43	50
II	67	51	39
III	44	38	43
IV	38	49	47
V	37	35	34
VI	28	20	28
VII	32	28	32
VIII	54	47	45
IX	62	64	64



**Obr 18** Vizuální zobrazení tloušťky, kde L znamená levá část substrátu, S prostředek a P pravá část

## Zhodnocení



**Obr 19** Srovnání tloušťky vzorků s naměřenou absorbancí

Z celkového měření je patrné, že ZnO vykazuje závislost mezi tloušťkou vrstvy a absorbancí, jak je patrné v **Obr 19**, kde je průměrná naměřená tloušťka a k tomu příslušná maximální absorbance. Je nutné prozkoumat možnost zvýšení tloušťky vrstvy nebo upravit či změnit metodu depozice materiálu na substrát pro zvýšení vodivosti vrstvy.

### 4.2.2 Zkoumání více vrstev

Jak bylo zjištěno v předešlé kapitole, kde měření odporu nebylo možné provést kvůli nevodivosti materiálu, tak bylo provedeno měření pro více vrstev vzorku na sobě.

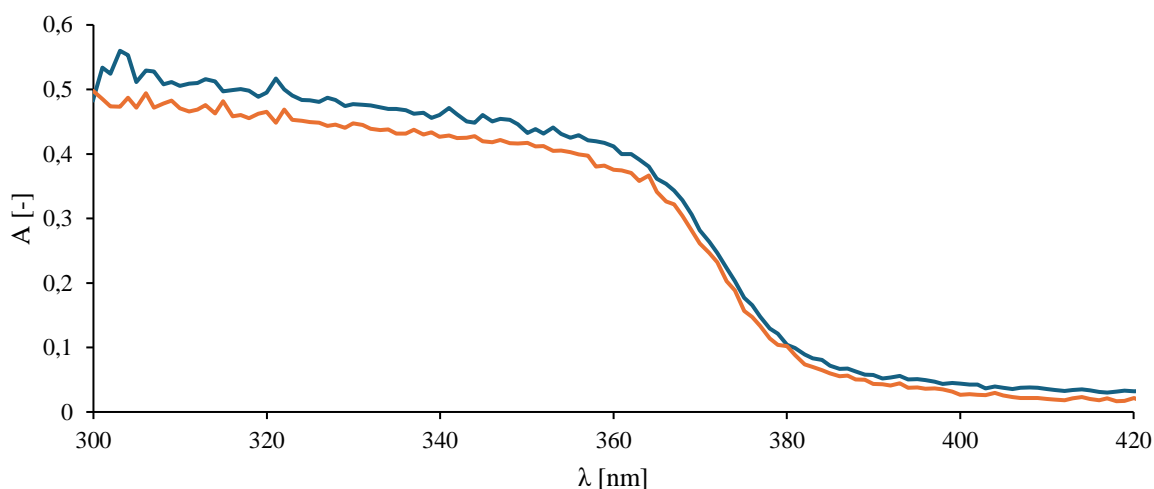
#### *Příprava vrstev*

Depozice vzorku na substrát proběhla následujícím postupem. Po každé depozici se vzorek přenesl na hot plate pro tepelné ošetření a to při 110 °C po 5 minut. Všechny vrstvy byly depozitované při 3 000 ot/s se zrychlením 1 500 RPM po 30 s. Tyto kroky byly provedeny za vzniku 4 vrstev.

#### *Elektrický odpor*

Odpor byl měřen obvyklou metodou a to 4W. Měření ukázalo, že elektroda vykazuje stabilní hodnoty kolem 0,2 M $\Omega$  s maximem v 0,4 M $\Omega$ .

## Absorbance



**Obr 20** Naměřené hodnoty absorbance pro ZnO na dvou místech vzorku

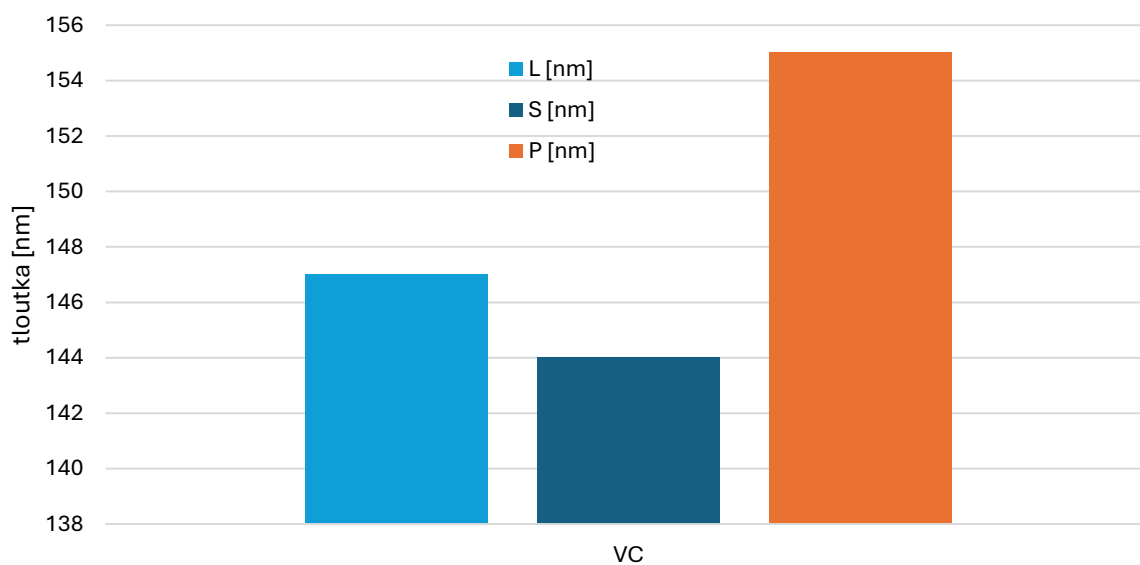
Z naměřených dat v **Obr 20** je patrné, že vzorek je uniformní a nevykazuje velké změny ve tloušťce, avšak změření tloušťky bude provedeno v následující kapitole. Taky je patrné, oproti jedné vrstvě materiálu jsou hodnoty absorbance dvojnásobné

## Tloušťka vrstvy

Pro zjednodušení a přesnější měření byla nalepena na polovinu substrátu lepicí páska pro oddělení substrátu a vzorku. Hodnoty byly vyneseny do **Tab 9** a graficky zobrazeny v **Obr 21**.

**Tab 9** Naměřené hodnoty tloušťky

č. vzorku	L [nm]	S [nm]	P [nm]
VC	147	144	155



**Obr 21** Vizualní zobrazení tloušťky, kde L znamená levá část substrátu, S prostředek a P pravá část

### Zhodnocení

Experiment prokázal, že při postupném vrstvení materiálu (4 opakované depozice) v průměru dosáhneme tloušťky 149 nm, což je větší hodnota, než byla očekávána. Z předešlé kapitoly z daného nastavení byly očekávány hodnoty okolo 100 nm. Rozdíl je možno vysvětlit z faktu, že celková vrstva není homogenní a na různých místech je tloušťka rozdílná i o 12 nm. Měřený odpor se pohybuje v rozmezích 0,2 až 0,4 MΩ.

Z celkového pozorování bylo dosaženo k výsledku, že v aktuální konfiguraci metody depozice není možné ZnO využít jako elektroda pro ST-OSC.

## 4.3 SnO<sub>2</sub>

Další oblastí zkoumání bylo zjištění vlastností oxidu cínitého (SnO<sub>2</sub>) jako elektrody pro ST-OSC. Celkový výzkum byl proveden ve dvou hlavních okruzích, a to pro substráty na kterých se materiál zkoumal, tedy pro skleněný a křemenný substrát. Při měření bylo zjištěno, že použití obyčejného skla jako substrát není možné měřit transmitanci, protože oblast vlnové délky SnO<sub>2</sub> se nachází pod 300 nm vlnové délky.[33]

### 4.3.1 Experimenty se skleněným substrátem

První sada experimentů byla provedena s využitím metody přípravy substrátů, jak byla popsána v předešlých kapitolách AgNW.

#### Příprava vrstvy

Pro spin coating byla zvolena série několika rychlostí a zrychlení s několika kroky pro zjištění optimálního vzniku tenké vrstvy. Veškeré hodnoty byly zapsané do tabulky **Tab 10**. Po depozici byly substráty s vrstvou tepelně ošetřeny při 150 °C po dobu cca 5 minut. Po ošetření a ochlazení se začalo s měřením.

**Tab 10** Parametry pro depozici tenkých vrstev

č. vzorku	metoda	V [μl]	v <sub>1</sub> [ot/min]	a <sub>1</sub> [RPM/s]	t <sub>1</sub> [s]	v <sub>2</sub> [ot/min]	a <sub>2</sub> [RPM/s]	t <sub>2</sub> [s]
I	statická	50	3 000	1 500	30	-	-	-
II	statická	50	2 500	1 250	30	3 000	1 500	10
III	statická	70	2 000	1 000	30	3 000	1 500	10
IV	statická	70	1 500	750	30	3 000	1 500	10
V	statická	70	2 500	500	60	3 000	1 500	10
VI	statická	70	3 000	500	60	3 000	1 500	10
VII	dynamická	70	2 500	750	30	3 000	1 500	10
VIII	dynamická	70	1 000	500	30	3 000	1 500	10
IX	dynamická	70	2 500	1 250	30	3 000	1 500	10

Na první pohled není okem patrná žádná vrstva před ošetřením a po něm je viditelná tenká vrstva na substrátu, ale taky je vidět že vrstva není homogenní a roztažená do všech krajů.

#### Elektrický odpor

Pro stanovení odporu a stanovení, zdali se vrstva dá považovat za vodivou, a tedy se dá využít pro elektrody, se použilo 4W měření, jako v předešlých případech.

**Tab 11** Naměřené hodnoty bodu na 4W

č. vzorku	R [MΩ]
I	4,69
II	2,76
III	3,78
IV	3,40
V	2,32
VI	2,64
VII	-
VIII	3,05
IX	2,10

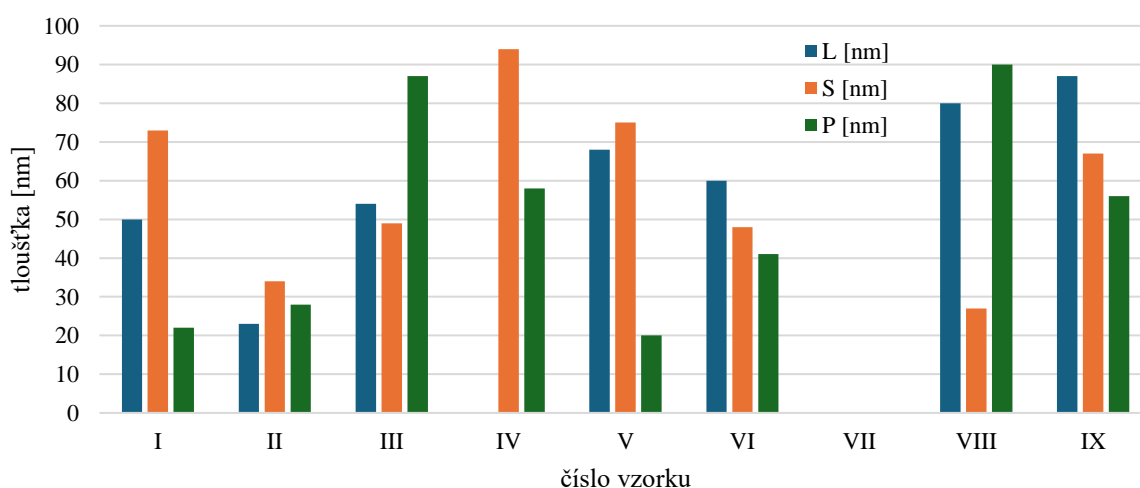
Z hodnot je patrné, že vysoké hodnoty (v MΩ) naznačují špatnou vodivost, která může ovlivnit funkčnost pro ST-OSC.

*Tloušťka vrstvy*

Všechny výsledky byly vyneseny do **Tab 12** a vizuálně znázorněny v **Obr 22**, kde je patrné, že vrstvy nejsou homogenní a nepokrývají celou plochu substrátu. Při přípravě vzorků bylo zjištěno, že SnO<sub>2</sub> je nutné pro vyrytí použít větší množství síly, protože IPA či jiná rozpouštědla jsou příliš slabá pro rozpuštění vrstvy. Pro vyčištění substrátu od vrstvy je nutné použití silné zásady nebo kyseliny, v tomhle případě byla použita koncentrovaná kyselina sírová (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

**Tab 12** Naměřené hodnoty tloušťky na profilometr

č. vzorku	L [nm]	S [nm]	P [nm]
I	50	73	22
II	23	34	28
III	54	49	87
IV	-	94	58
V	68	75	20
VI	60	48	41
VII	-	-	-
VIII	80	27	90
IX	87	67	56



**Obr 22** Vizualní zobrazení tloušťky, kde L znamená levá část substrátu, S prostředek a P pravá část

Z první sady vzorků je patrné, že SnO<sub>2</sub> je problematické pro depozici na substrát bez jakékoliv dodatečné úpravy, jako například O<sub>3</sub>, plazmatem nebo CO<sub>2</sub>. [24]

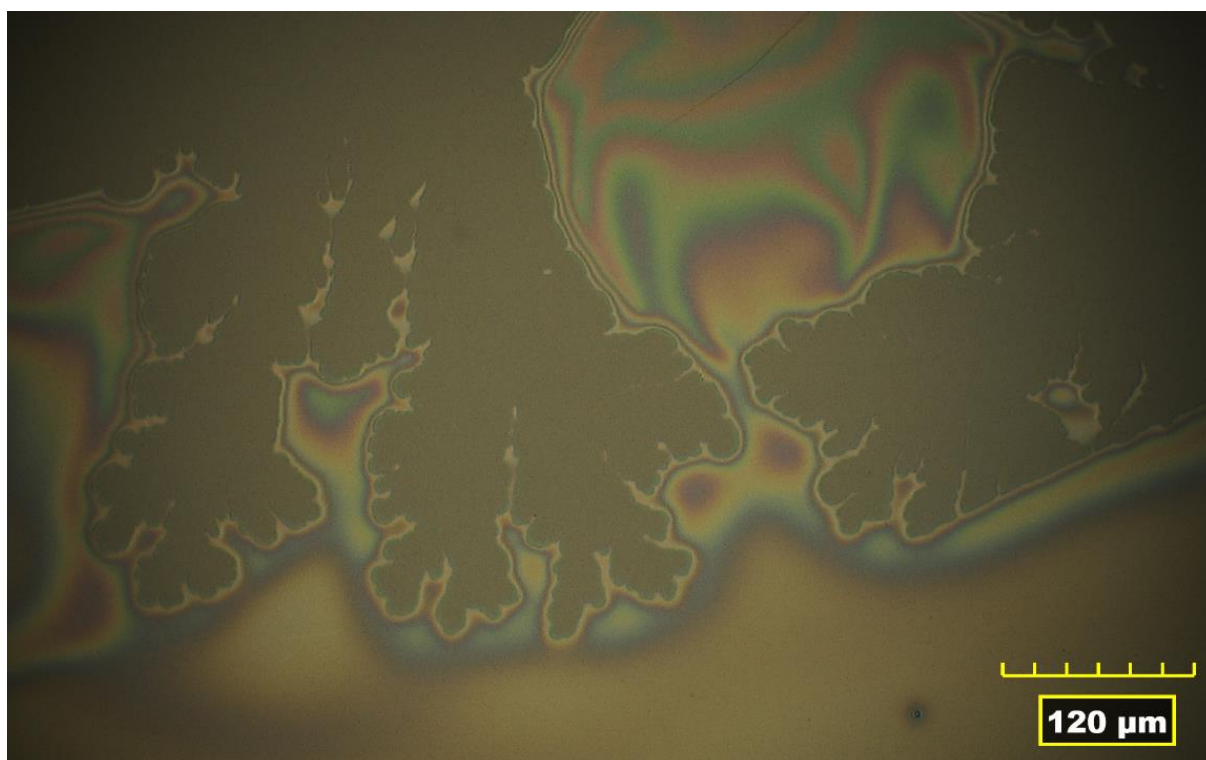
#### 4.3.1.1 Různé metody čištění substrátů

##### *Příprava*

Pro třetí sadu vzorků se hledalo řešení v různých způsobech čištění substrátu. Kde vzorek I funguje jako reference, čištění obvyklým způsobem IPA, jak u předešlých vzorků. U vzorků II a III bylo čištění provedeno postupem Neodisher  $\Rightarrow$  H<sub>2</sub>O  $\Rightarrow$  NaOH  $\Rightarrow$  H<sub>2</sub>O, rozdíl je pouze v způsobu depozice materiálu při spin coatingu. Všechny hodnoty depozice byly zapsány do **Tab 13**.

**Tab 13** Parametry pro depozici tenkých vrstev

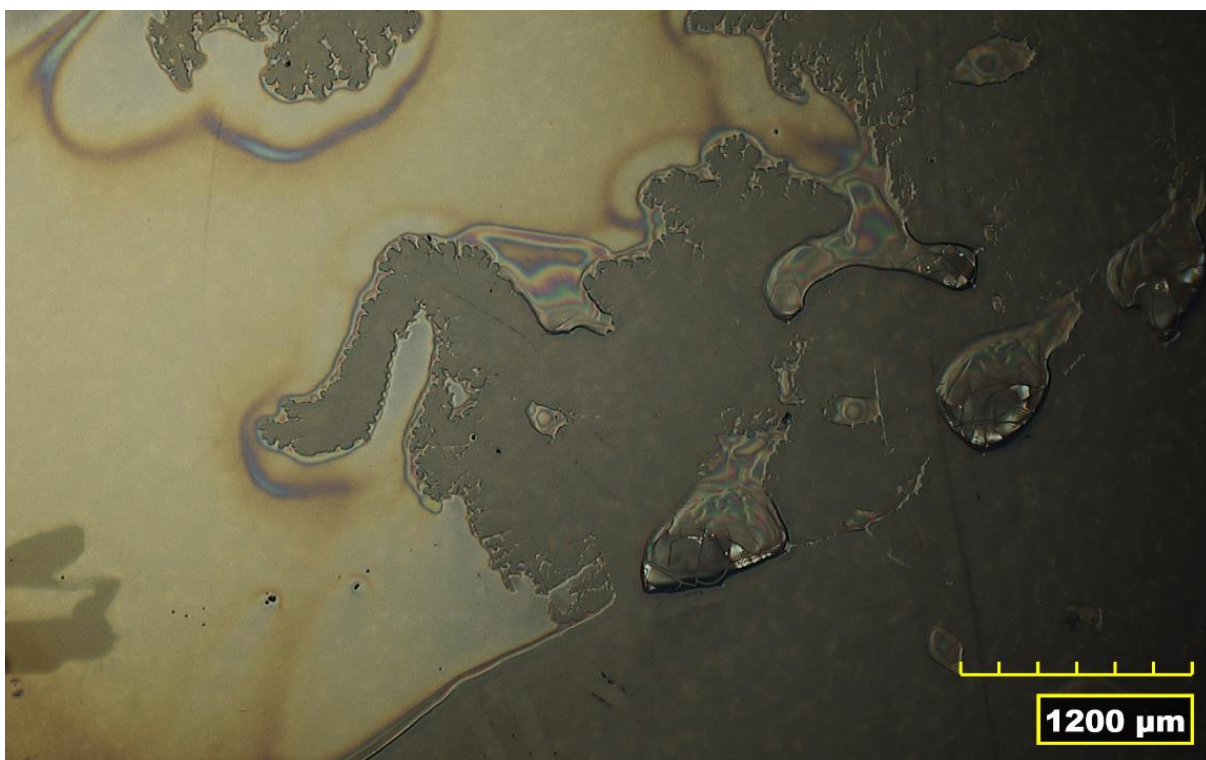
č. vzorku	metoda	čištění	V [ $\mu$ l]	$v_1$ [ot/min]	$a_1$ [RPM/s]	$t_I$ [s]
I	dynamická	IPA	50	3 000	1 500	30
II	dynamická	NaOH	50	3 000	1 500	30
III	statická	NaOH	50	3 000	1 500	30



**Obr 23** Vzorek I (IPA)



*Obr 24 Vzorek II (NaOH – dynamická)*



*Obr 25 Vzorek III (NaOH – statická)*

#### *Zhodnocení*

Z porovnání *Obr 23-25*, je patrné že se vytváří vrstva podobným způsobem u všech vzorků, střed je do určité míry homogenní, největším problémem jsou okraje *Obr 23-25*. Jak je patrné při okrajích se vytváří spíše zvyšující, a ne homogenní vrstva. Není výrazně patrné, že by změna metody čištění výrazně zlepšila nebo zhoršila celkovou vrstvu na substrátu.

#### 4.3.1.2 Úprava substrátu plazmatem pro měření odporu

Hlavním účelem bylo prozkoumání využití plazmatu pro aktivaci povrchu substrátu. Substrát byl v několika cyklech vystaven efektu plazmatu. Doba kontaktu a napětí byla zapsaná do **Tab 14** pro přehledné shrnutí.

**Tab 14** Hodnoty úpravy plazmatem, kde hodnoty  $L \Rightarrow P$  a  $P \Leftarrow L$  jsou časy průchodu vzorku pod generátorem plazmatu a celkový čas je počítán ze součtu těchto hodnot vynásoben kolikrát byl posun tam a zpět proveden

č. vzorku	U [V]	$L \Rightarrow P$ [s]	$P \Leftarrow L$ [s]	kolikrát	t [s]
I	9,6	2,62	1,92	5	22,7
II	7,3	5,46	3,24	5	43,5
III	11,2	1,92	1,52	5	17,2

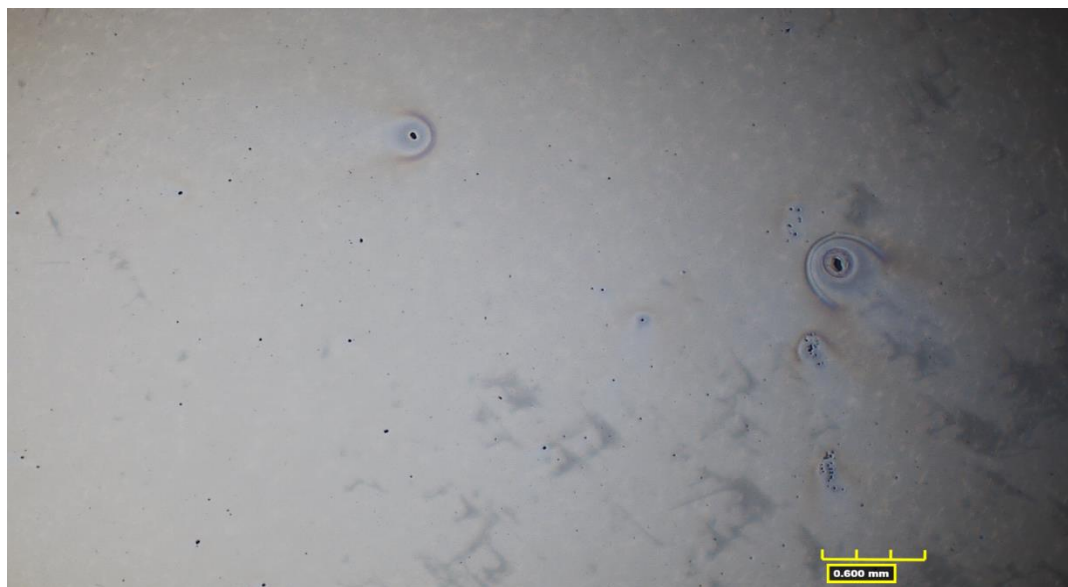
#### Příprava vrstvy

Pro depozici byla zvolena jednotná rychlost a zrychlení pro porovnávání mezi jednotlivými vzorky, a to rychlost 3 000 ot/min s zrychlením 1 500 RPM/s po 30 s. Bylo využito 50  $\mu$ l materiálu pro depozici, a to jako v předešlých případech dynamickou metodou. Teplotní ošetření bylo provedeno při teplotě 150°C na 10 min, optimální by byla delší doba pro zajištění úplného vypaření rozpouštědla, ale pro účel pokusu byl čas zkrácen.

Pro stanovení odporu a stanovení, zdali se vrstva dá považovat za vodivou, následně hodnoty byly porovnány, jestli se liší od předešlých vzorků.

**Tab 15** Vypočítané hodnoty odporu po přepočítání

č. vzorku	R [ $M\Omega$ ]
I	2,72
II	2,27
III	3,63



**Obr 26** Vzorek III pod mikroskopem s měřítkem 0,6 mm

Z hodnot odporu je patrné, že vysoké hodnoty (v  $M\Omega$ ) naznačují špatnou vodivost materiálu. V porovnání s prvními vzorky v **Tab 11** s hodnotami v **Tab 15** se hodnoty neliší příliš moc od sebe, tím se dá naznačit, že úprava plazmatem neovlivňuje vodivost. Dále v **Obr 26** kde pod mikroskopem je vidět uniformní vrstva s přítomností cizích částic.

## 4.3.2 Experimenty se křemenným substrátem

### 4.3.2.1 Úprava ozónem

Druhá sada experimentů byla provedena na substrátu křemenného skla při obvyklé metodě čištění, jak bylo použito pro předešlé tenké vrstvy (IPA). Tato sada vzorků byla připravena pro měření absorbance, z důvodu překryvu absorpce SnO<sub>2</sub> a skla.

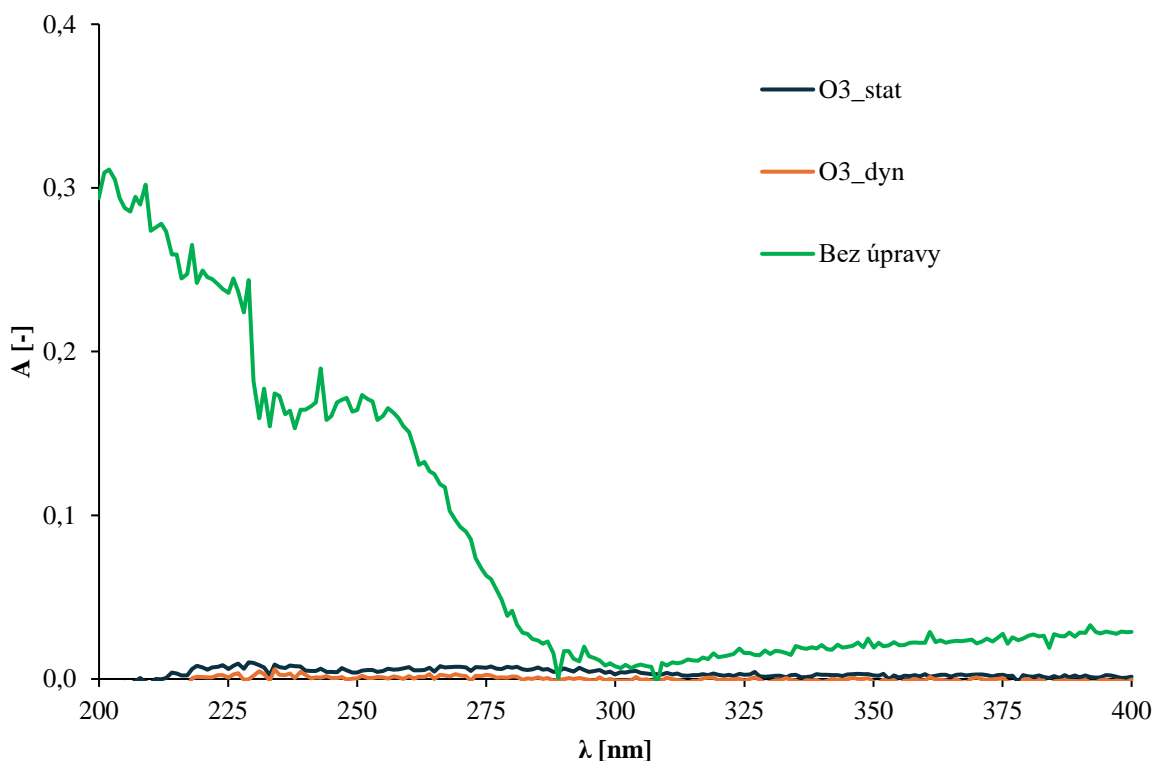
#### *Příprava vrstvy*

Spin coating byl proveden obvyklým postupem pro různé hodnoty, jak je zapsáno v **Tab 16**. Dalším krokem u vzorků O<sub>3</sub>\_stat a O<sub>3</sub>\_dyn byla úprava ozónem za účelem aktivace povrchu a zlepšení adhezních sil. Zlepšení bylo pozorováno pouze vizuálně, avšak po teplotním ošetření již nebyla vrstva patrná. Následně bylo provedeno měření pomocí UV-spektrometrie.

**Tab 16** Parametry pro depozici tenkých vrstev

č. vzorku	metoda	V [μl]	$v_1$ [ot/min]	$a_1$ [ot/s <sup>2</sup> ]	$t_1$ [s]
Bez úpravy	statická	35	3 000	1 500	30
O <sub>3</sub> _stat	statická	35	2 500	1 250	30
O <sub>3</sub> _dyn	dynamická	70	2 000	1 000	30

#### *Absorbance*



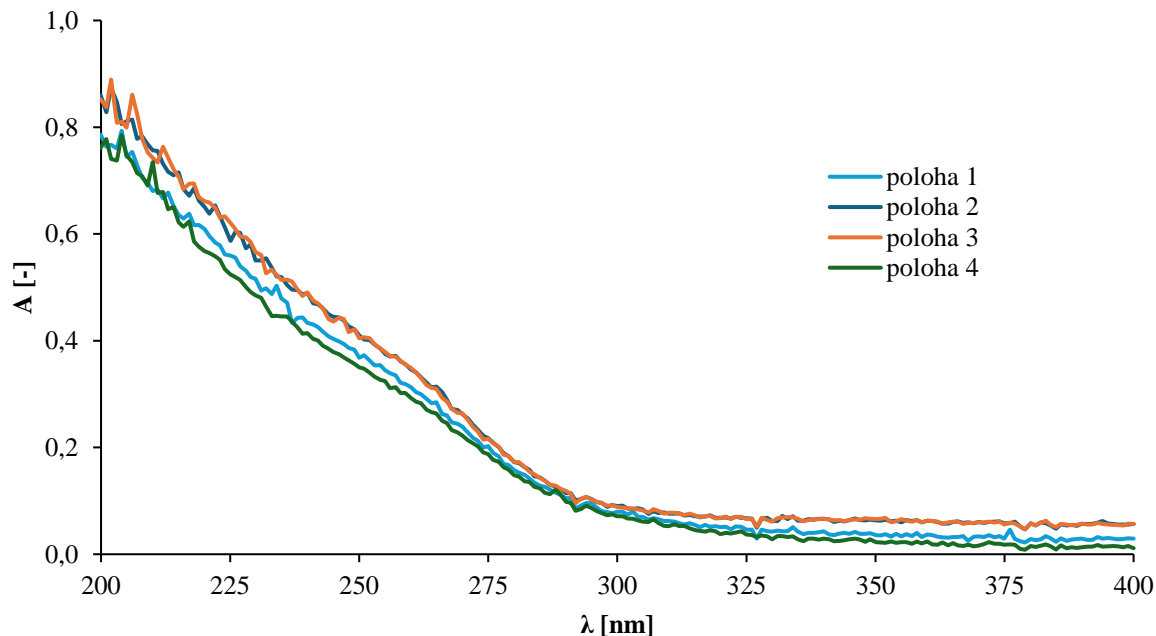
**Obr 27** Měření absorbance na vlnovou délku

Z daného měření vyplývá, že pro vzorky O<sub>3</sub>\_stat a O<sub>3</sub>\_dyn hodnoty absorbance kopírují osu y, což znamená, že odpovídají hodnotám blanku. Hodnoty potvrzují vizuální absenci vrstvy na substrátu. Pro aplikaci při depozici SnO<sub>2</sub> na substrát se tato metoda nedá použít a je nutné jiné úpravy.

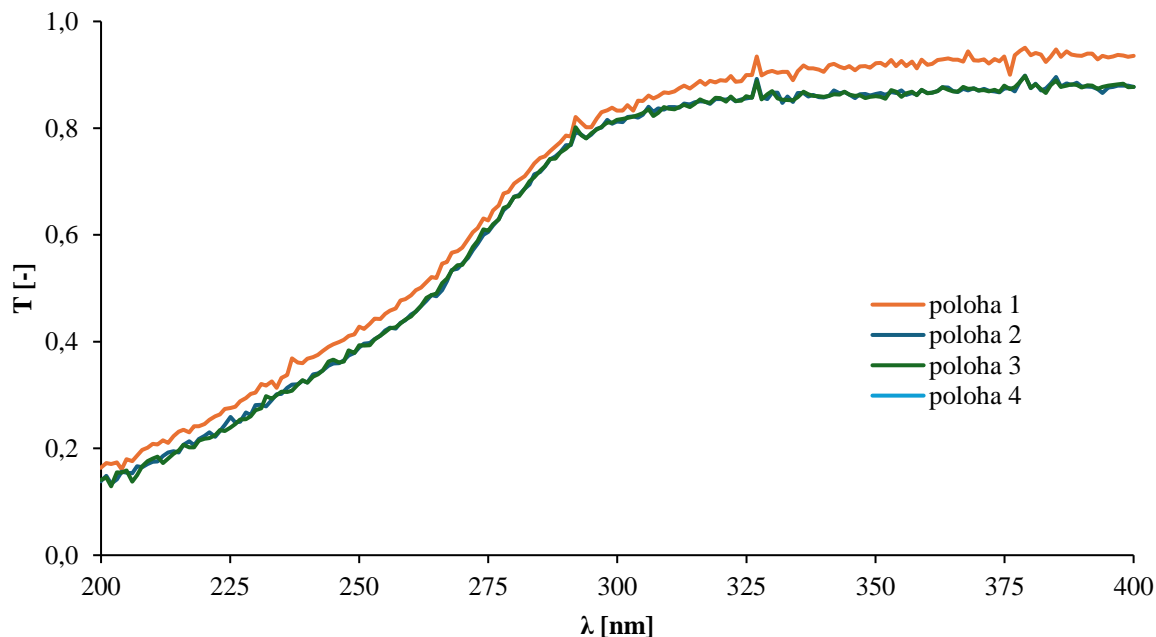
#### 4.3.2.2 Úprava substrátu plazmatem pro měření absorbance

Pro depozici byla zvolena rychlost 3 000 ot/min s zrychlením 1 500 RPM/s po 30 s. Bylo využito 50  $\mu$ l materiálu pro depozici. Teplotní ošetření bylo provedeno při teplotě 150°C na 10 min.

Před samotnou depozicí byl substrát upraven plazmatem při napětí motoru 9,5 V, v pěti přejizdy zleva doprava a zpět. Celkový čas úpravy činil 23,25 sekund.



**Obr 28** Absorbance vzorku s úpravou plazmatem



**Obr 29** Transmittance vzorku s úpravou plazmatem

Vzorek byl měřen na čtyřech pozicích substrátu a hodnoty byly vyneseny do **Obr 28**, vrstva je uniformní díky malým odchylkám v měření. Jak je patrné z **Obr 28**, hodnota absorbance stoupá od 300 nm až do 200 nm (hranice měřicího rozsahu přístroje), přičemž maximální hodnota dosahuje přibližně 0,8. Oproti neupravenému vzorku (**Obr 27**), kde maximum činilo přibližně 0,3, lze pozorovat dvojnásobné zvýšení absorbance. Tento jev může být způsoben úpravou plazmatem.

### 4.3.3 Celkové zhodnocení materiálu

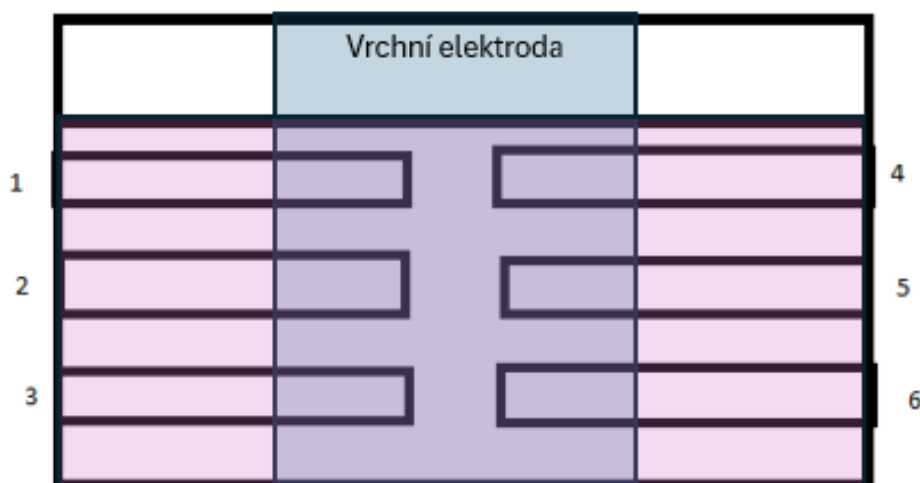
Ze předešlých kapitol byly zjištěny důležité poznatky. Depozice SnO<sub>2</sub> na substrát bez jakékoliv aktivace povrchu neumožňuje homogenní vrstvu na celém povrchu, je k tomu za potřebí úprava, třeba plazmatem. K tomuto účelu nelze použít ozón, který způsobil negativní efekt na depozici materiálu. Změna metody čištění nezměnila žádný výsledek v depozici ani v naměřených datech.

V porovnání odporu s dalšími materiály se měřené hodnoty pohybují v řádech MΩ, zatímco u AgNW se pohybuje v řádech kΩ.

Jak bylo zjištěno, problém mohl nastat v metodě depozice kvůli nízké teplotě materiálu a tepelném ošetření. Řešení se dá hledat v metodě sol-gel kde SnCl<sub>2</sub> se rozpustí v ethanolu a po spin coating se tepelně ošetří při teplotě 600°C po 4 hodiny[34]. Tato metoda dokáže zlepšit vodivostní vlastnosti. Je možné, že není problematická samotná metoda [35], ale přímo materiál SnO<sub>2</sub>.

## 4.4 Referenční články

Pro ověření metody výroby solárního článku a funkčnosti P3HT:PCBM jako aktivní vrstvy, byli připraveny referenční články. Články byly připraveny v následujícím pořadí. Jako spodní vrstva byla použita elektroda ITO, následně vrstva PEDOT:PSS, aktivní vrstva v podobě P3HT:PCBM a jako horní vrstva byla napařena elektroda hliníku. Pro rozlišení jednotlivých elektrod ITO bylo stanovené jednotné číslování pro označení samostatných vzorků dle **Obr 30**.



**Obr 30** Popis ITO elektrody, kde modré pole značí vrchní elektrodu, která se napařuje a růžové značí aktivní vrstvu

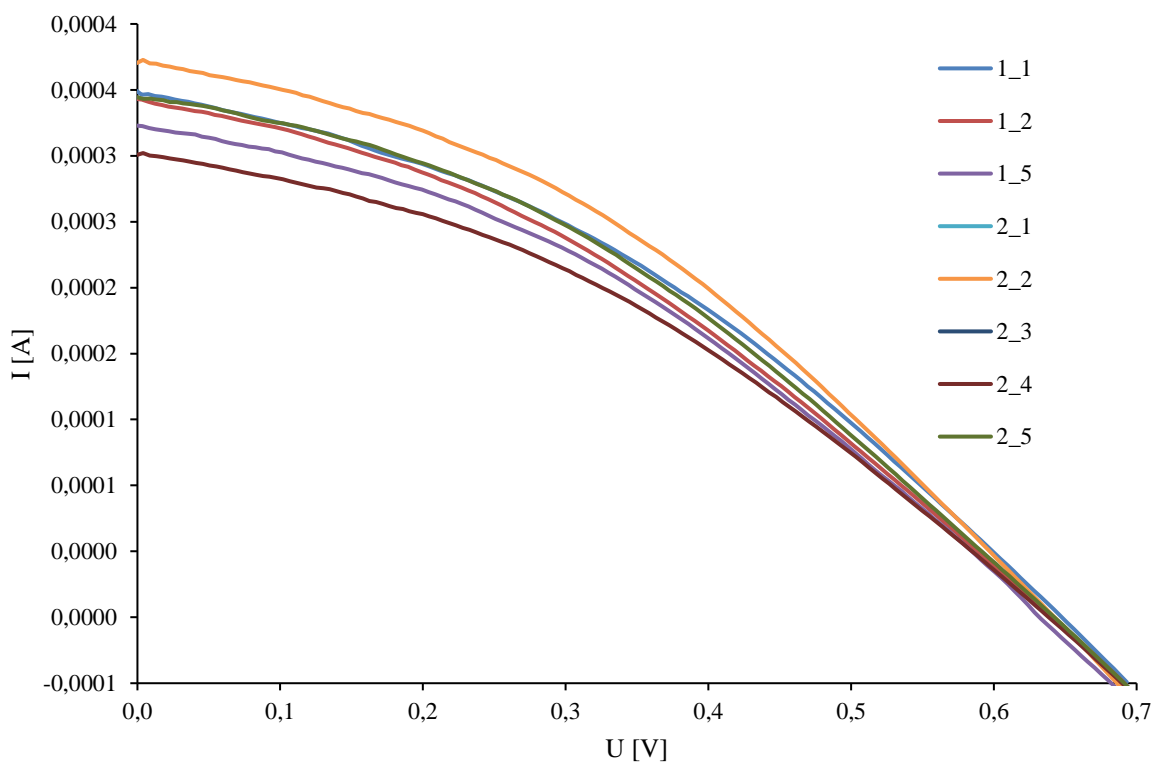
### Měření a data

Jednotlivé vzorky byly změřeny na slunečním simulátoru LOT-Oriel LS0916 a elektroměru Keithley 26018 vyhodnoceno v softwaru Tracer2, který je nastaven se spektrem AM 1,5. Pro špatné výsledky byla vyškrtuta některá data. Z dat byl vypočítán průměr hodnot a směrodatná odchylka.

**Tab 17** Naměřené a vypočítané hodnoty pro referenční články

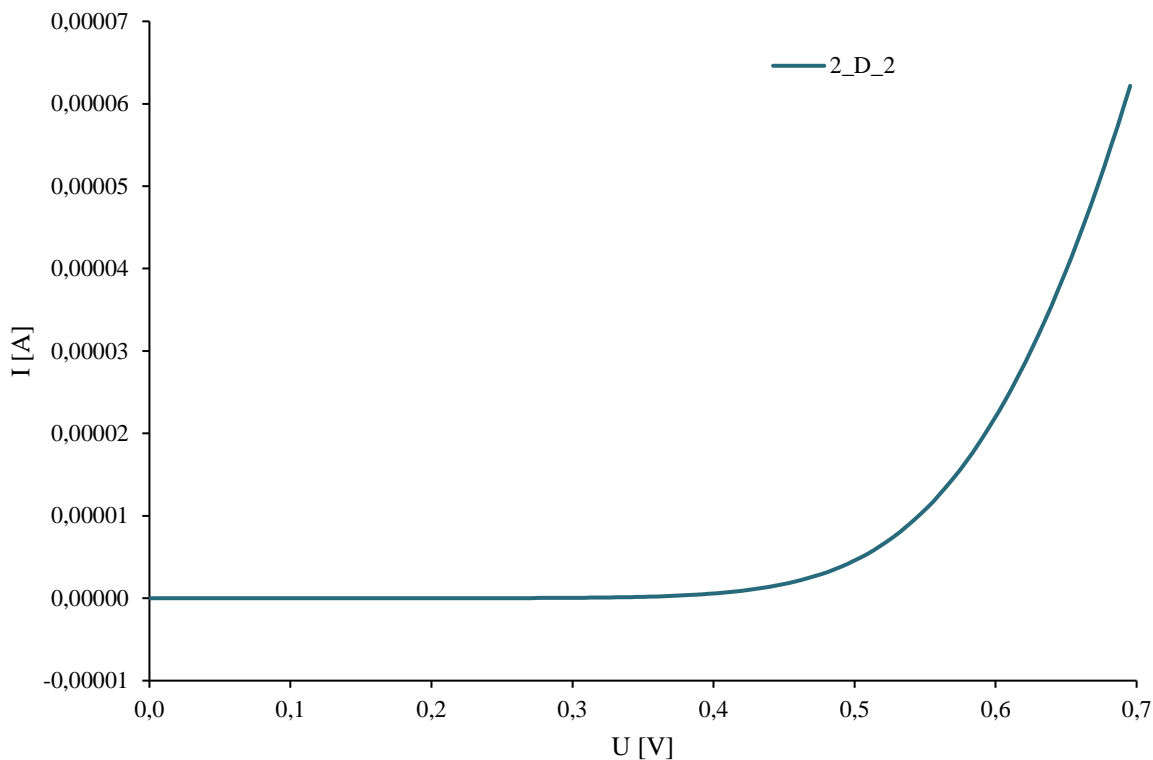
Zařízení	$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$I_{sc}$ [mA]	$U_{oc}$ [mV]	FF [%]	$\eta$ [%]
1_1	6,48	0,3887	637,56	36,54	1,51
1_2	6,38	0,3826	630,53	35,48	1,43
1_5	6,05	0,3631	623,32	36,80	1,39
2_1	6,63	0,3978	634,68	36,01	1,52
2_2	6,87	0,4121	633,09	37,38	1,63
2_4	5,71	0,3423	627,56	36,82	1,32
2_5	6,43	0,3856	631,92	36,53	1,48
průměr	6,36	0,38	631,24	36,51	1,47
směr. Odchylka	0,38	0,02	4,70	0,61	0,10

Naměřená data byla vynesena do grafu **Obr 31**, z tvaru křivky je patrné, že hodnoty připomínají křivku V-A charakteristiky z teoretické části.



**Obr 31** Graf naměřených hodnot V-A vlastností jednotlivých vzorků

Následně byla změřena temnostní charakteristika článku pro nejlepší vzorek a elektrodu, tedy 2\_2 a data byla vynesena do **Obr 32** a bylo potvrzeno že se jedná o diodu.



**Obr 32** Graf naměřených hodnot ve tmě pro zjištění diodových vlastností pro vzorek 2 a druhou elektrodu

Ze stanovení vlastností referenčních ST-OSC vyšla efektivita  $1,47 \pm 0,1$  %, další články budou srovnávány, jestli jsou efektivnější nebo méně než stanovená reference.

Z důvodu špatné vodivosti vzorku ZnO, byly využity vzorky AgNW a SnO<sub>2</sub> pro úpravu konfigurace referenčního článku s těmito materiály.

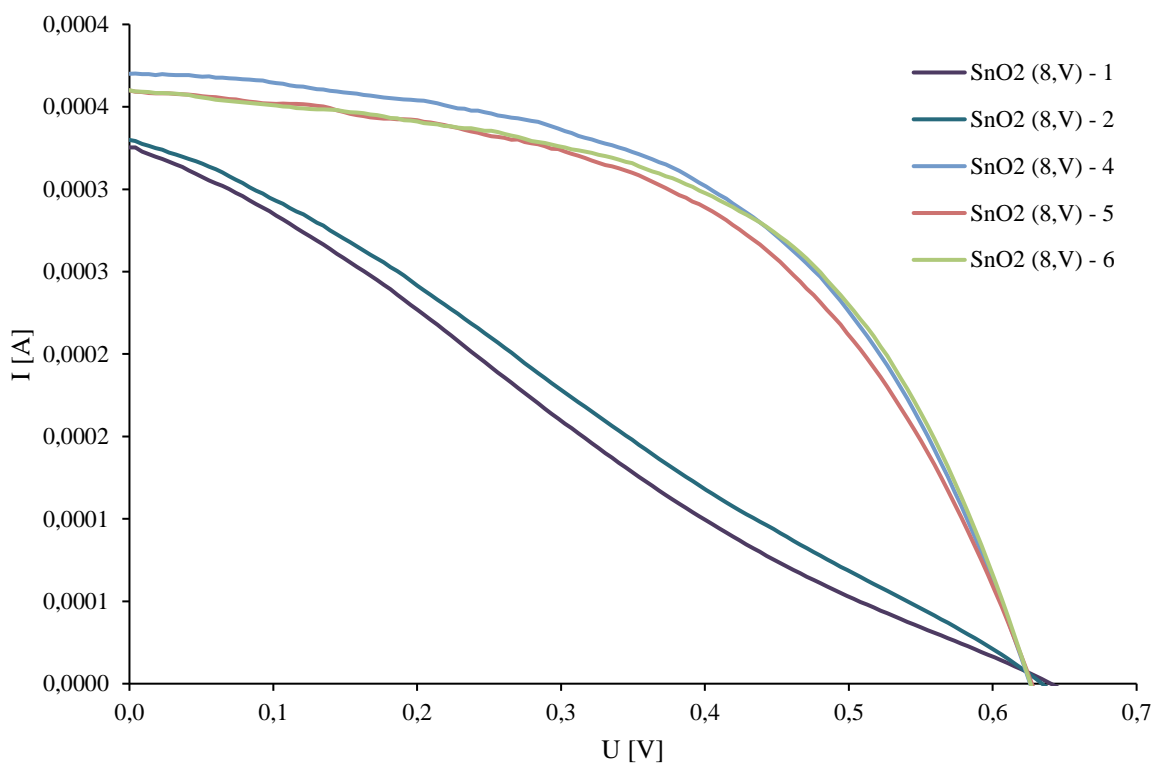
#### 4.5 Články s využitím SnO<sub>2</sub>

Pro využití zkoumaných vzorků byla upravena konfigurace referenčního článku a to následovně. Pro spodní vrstvu elektrody byla ponechána elektroda ITO, místo vrstvy PEDOT:PSS byl nanesen vzorek SnO<sub>2</sub> přitom před deponací byl substrát s ITO elektrodou upraven pod plazmatem při 8 V pro 5 cyklů a činí celkový čas úpravy 26,6 sekund. Nastavení pro spin coater bylo 3 000 ot/s a 1 500 RPM pro 30 sekund, vzorku bylo využito 50  $\mu$ l. Článek byly teplotně ošetřen při 150 °C po 5 minut. Pro aktivní vrstvu bylo využito P3HT:PCBM v chlorbenzenu. Nastavení spin coateru a množství bylo upraveno kvůli rozpouštědлу na 2 000 ot/s dynamickou metodou s 20  $\mu$ l aktivního vzorku. Vrchní vrstva byla změněna z hliníku na MoO<sub>x</sub> (8 nm) a Au (60 nm).

Solární články byly poté změřeny. Hodnoty byly uvedeny v **Tab 18** a graficky znázorněny v **Obr 33** kde je patrné, že ne všechny elektrody na článku vykazují stejnou kvalitu, některé jsou horší.

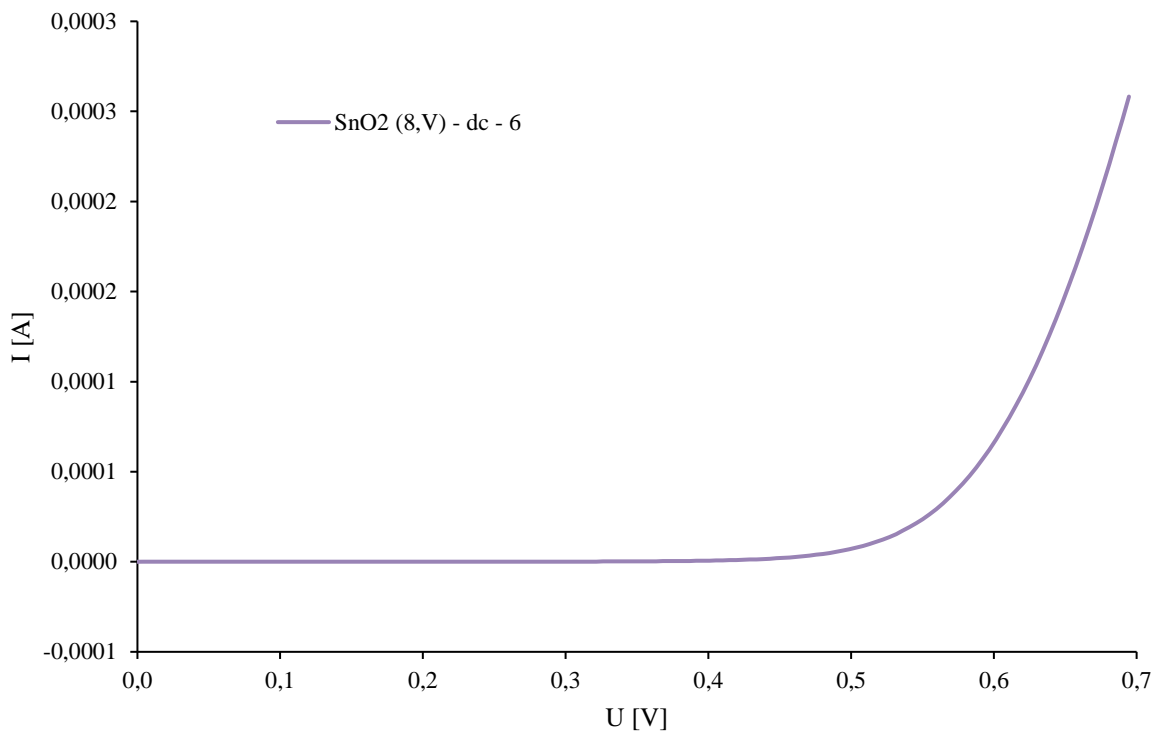
**Tab 18** Naměřené a vypočítané hodnoty pro články se SnO<sub>2</sub>

Zařízení	J <sub>sc</sub> [mA/cm <sup>2</sup> ]	I <sub>sc</sub> [mA]	U <sub>oc</sub> [mV]	FF [%]	η [%]
SnO <sub>2</sub> (8 V) - 1	5,45	0,3271	635,83	23,31	0,81
SnO <sub>2</sub> (8 V) - 2	5,53	0,3317	628,77	25,67	0,89
SnO <sub>2</sub> (8 V) - 4	6,18	0,3705	625,69	52,90	2,04
SnO <sub>2</sub> (8 V) - 5	6,00	0,3600	626,84	51,78	1,95
SnO <sub>2</sub> (8 V) - 6	6,01	0,3603	625,80	54,44	2,05
průměr	5,50	0,33	558,76	40,19	1,33
smed. Odchylka	0,87	0,05	171,07	14,46	0,78



**Obr 33** Graf naměřených hodnot V-A vlastností jednotlivých elektrod pro článek upraven při 8 V

Pro zjištění vlastností jako dioda bylo samozřejmě provedeno V-A měření ve tmě pro zamezení generování elektrického proudu. Hodnoty byly vyneseny do **Obr 34** a potvrzují diodový charakter.



**Obr 34** Graf naměřených hodnot temnostního měření pro 6. elektrodu článku

Problémem tohoto materiálu je dodatečná úprava plazmatem, která může způsobit poškození ITO elektrody a vést ke znehodnocení článku. V důsledku poleptání vrstvy a možného spojení elektrod může dojít ke zkratu. Článek dosahuje průměrné efektivity  $1,33 \pm 0,78$  %, která je nižší jak referenční článek

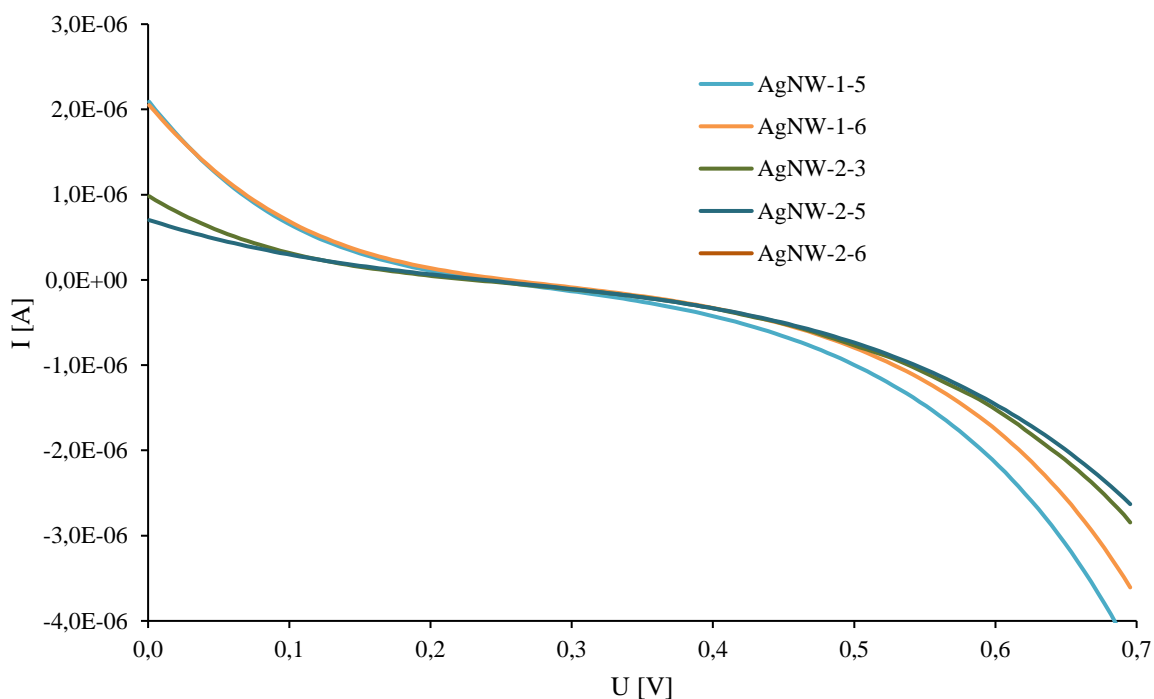
#### 4.6 Články se použitím AgNW

Pro využití vzorku AgNW v ST-OSC byly připraveny články s horní elektrodou AgNW, kde byla použita jako aktivní vrstva P3HT:PCBM v poměru 5:3 s koncentrací 25 mg/ml P3HT rozpuštěné v chlorbenzenu. Na substrát s ITO elektrodou byla nanášena vrstva PEDOT:PSS s rychlostí 4 500 ot/s se zrychlením 2 250 pro 40 sekund s přefiltrovanou kapkou využitím dynamické metody. Po depozici byla vrstva teplotně ošetřena při teplotě 120 °C. Následně v glove boxu bylo na spin coateru nanášeno 20  $\mu$ l P3HT:PCBM při rychlosti 2 000 dynamickou metodou. Po očištění společné elektrody chloroformem se znovu ve spin coateru nanášelo 50  $\mu$ l AgNW a enkapsulovalo pryskyřicí a články byly změřeny pro V-A charakteristiku. Naměřené hodnoty byly vyneseny do **Tab 19** a graficky zobrazeny pro V-A v **Obr 35** a temnostní měření ve tmě v **Obr 36**.

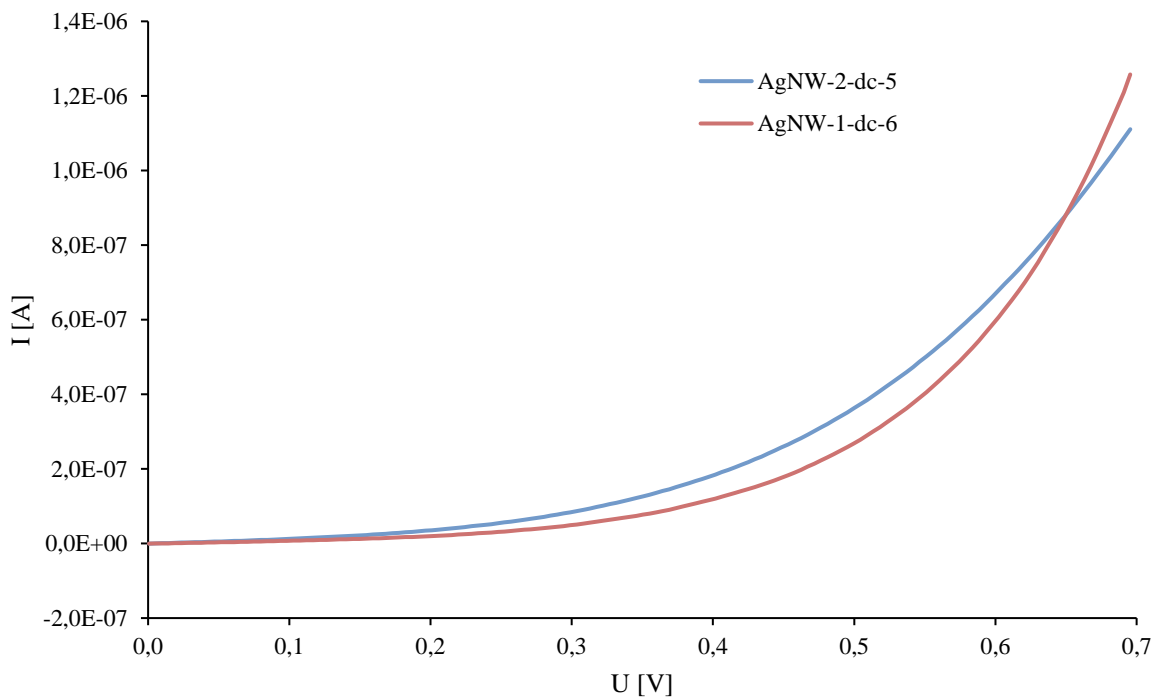
**Tab 19** Naměřené a vypočítané hodnoty pro články s AgNW jako vrchní elektrodu

Zařízení	$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$I_{sc}$ [mA]	$U_{oc}$ [mV]	FF [%]	$\eta$ [%]
AgNW-1-1	0,0094	0,0006	195,52	17,56	0,0003
AgNW-1-2	0,0214	0,0013	235,05	13,77	0,0007
AgNW-1-5	0,0349	0,0021	247,74	13,10	0,0011
AgNW-1-6	0,0342	0,0021	262,71	13,03	0,0012
AgNW-2-3	0,0163	0,0010	232,30	14,28	0,0005
AgNW-2-5	0,0117	0,0007	238,01	17,77	0,0005
AgNW-2-6	0,0166	0,0010	160,40	19,43	0,0005
průměr	0,0206	0,0012	224,5334	15,5626	0,0007
Směr. Odchylka	0,0102	0,0006	34,8901	2,6159	0,0003

Z výsledků nízkých hodnot je patrné, že nelze považovat za funkční články, kdy hodnota efektivity se pohybuje okolo 0,0005 % a kdy referenční článek se pohybuje okolo 1,47 %. Chyba proto musí být ve vrchní elektrodě, protože se zbylé vrstvy prokázaly jako funkční. Dalším pokusem může být zvýšení tloušťky vrstvy elektrody.



**Obr 35** Graf naměřených hodnot V-A vlastností jednotlivých elektrod pro články s AgNW horní elektrodou



**Obr 36** Graf naměřených hodnot ve tmě pro zjištění diodových vlastností AgNW solární články

#### ST-OSC s více vrstvami AgNW

Pro ověření, jestli tloušťka vrstvy ovlivňuje vodivost horní vrstvy (AgNW) a zapříčinila nízkou funkčnost a špatnou efektivitu, bylo provedeno měření pro 4 články, kde jako v předchozí kapitole místo hliníkové elektrody bylo nanášeno několik vrstev vzorku. Z toho důvodu měli být připraveny články, které se měly přizpůsobit pro materiál AgNW a aktivní vrstvu. Kdy dva články byly teplotně ošetřeny před enkapsulací a dva po při teplotách 70 a 120 °C, tyto teploty byly vybrány z předešlých pokusů buď pro P3HT:PCBM (70 °C) a pro AgNW (120 °C). Články 1 a 2 byly teplotně ošetřeny před enkapsulací a články 3 a 4 po enkapsulaci. Naměřené hodnoty byly vyneseny do **Tab 20**, bohužel zde nejsou data pro články 3 a 4 z důvodu, protože bylo potvrzeno, že horní elektroda (AgNW) není vodivá.

Z vizuálního pozorování bylo potvrzeno, že vrstva nebyla vytvořena a spíše poškodila aktivní vrstvy. Možným důvodem může být polární rozpouštědlo, ve kterém je materiál dispergován. To zapříčinilo špatnou smáčivost a při opakovaném nanášení vzorku místo zvětšení šance na vytvoření elektrodové vrstvy, byla aktivní vrstva poškozena a nebylo možné změřit jakoukoliv charakteristiku článku. Při ověření diodové charakteristiky nebylo také možné změřit vzorky, kvůli špatné horní elektrodě.

Pro vyřešení problému se vzorkem je možnost změny z polárního rozpouštědla (voda) na nepolární organické rozpouštědlo. Další možností je úprava povrchu. Úprava povrchu aktivní vrstvy je však těžká, kvůli vyvarování se narušení vrstvy nebo degradace organického materiálu.

**Tab 20** Naměřené a vypočítané hodnoty pro články s využití AgNW jako vrchní elektrodou a zvýšením množstvím deponovaného materiálu

Zařízení	$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$I_{sc}$ [mA]	$U_{oc}$ [mV]	FF [%]	$\eta$ [%]
1_1	0,1679	0,0101	238,3199	23,4625	$9,39 \cdot 10^{-03}$
1_2	0,2285	0,0137	193,9917	24,4648	$1,08 \cdot 10^{-02}$
1_3	0,3536	0,0212	171,8245	24,5023	$1,49 \cdot 10^{-02}$
1_4	0,2123	0,0127	143,4665	24,5715	$7,48 \cdot 10^{-03}$
1_5	0,1581	0,0095	314,0348	22,6305	$1,12 \cdot 10^{-02}$
2_2	0,1150	0,0069	543,2380	26,5299	$1,66 \cdot 10^{-02}$
2_3	0,1219	0,0073	548,6350	26,6393	$1,78 \cdot 10^{-02}$
2_5	0,3858	0,0232	325,6737	26,6531	$3,35 \cdot 10^{-02}$
2_6	0,0187	0,0011	352,5693	25,7357	$1,69 \cdot 10^{-03}$
průměr	0,1957	0,0117	314,6393	25,0211	0,0137
směr. Odchylka	0,1161	0,0070	149,4360	1,4575	0,0089

Všechny výsledky připravených článků byli zapsány do **Tab 21** pro přehledné porovnání.

**Tab 21** Souhrnné vlastnosti pro referenční článek a články se využití materiálů AgNW a SnO<sub>2</sub>

Materiál	$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$I_{sc}$ [mA]	$U_{oc}$ [mV]	FF [%]	$\eta$ [%]
Ref	$6,36 \pm 0,38$	$0,38 \pm 0,02$	$631,2 \pm 4,7$	$36,51 \pm 0,61$	$1,47 \pm 0,1$
AgNW	$0,02 \pm 0,01$	$0,0012 \pm 0,0006$	$224,5 \pm 34,89$	$15,56 \pm 2,62$	$0,0007 \pm 0,0003$
AgNW - VV	$0,2 \pm 0,1$	$0,011 \pm 0,007$	$314,6 \pm 149,44$	$25,02 \pm 1,46$	$0,014 \pm 0,009$
SnO <sub>2</sub>	$5,5 \pm 0,87$	$0,33 \pm 0,05$	$558,8 \pm 171,07$	$40,19 \pm 14,46$	$1,33 \pm 0,78$

## 5 Závěr

Tato bakalářská práce se věnovala přípravě a charakterizaci tenkovrstvých materiálů určených pro transparentní elektrody v semitransparentních organických solárních článcích (ST-OSC). V rešeršní části byly shrnuty základní principy fungování organických solárních článků, jejich konstrukční varianty a současný stav výzkumu v oblasti transparentních elektrod. Zvláštní pozornost byla věnována materiálům na bázi stříbrných nanodrátků (AgNW), oxidu cíničitého ( $\text{SnO}_2$ ) a oxidu zinečnatého ( $\text{ZnO}$ ), které byly následně testovány v experimentální části.

Jako referenční vzorek byl vytvořen solární článek se strukturou ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/Al, který dosahoval efektivity  $1,47 \pm 0,1$  %. Tento článek byl následně upravován a porovnáván s články obsahujícími jiné materiály.

Připravené vrstvy byly hodnoceny z hlediska tloušťky, elektrické vodivosti a optických vlastností. U vrstev AgNW byla prokázána velmi dobrá propustnost světla a elektrická vodivost, nicméně nevhodné disperzní médium znemožnilo vytvoření kvalitní a stabilní vrstvy vhodné pro aplikaci v ST-OSC, kde struktura byla ITO/PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/AgNW, články s tímto materiálem dosáhly efektivity  $0,0005 \pm 0,0002$  % a nelze je považovat za funkční.

Vrstvy ZnO sice vykazovaly dobrou optickou průhlednost, ale jejich elektrická vodivost byla příliš nízká na to, aby mohly být použity jako funkční elektrody.

Nejllepších výsledků bylo dosaženo u vrstev  $\text{SnO}_2$ , které byly následně využity při přípravě funkčních ST-OSC ve struktuře ITO/ $\text{SnO}_2$ /P3HT:PCBM/ $\text{MoO}_x$ /Au. Tyto články dosáhly parametrů srovnatelných s referenčními zařízeními, avšak jejich účinnost byla mírně nižší, průměrná efektivita se pohybuje v  $1,33 \pm 0,78$  %.

Z výsledků práce vyplývá, že  $\text{SnO}_2$  představuje vhodný materiál pro transparentní elektrody v ST-OSC z hlediska kombinace optických a elektrických vlastností. Pro další výzkum by bylo vhodné zaměřit se na optimalizaci disperze stříbrných nanodrátků nebo na vývoj hybridních vrstev, které by spojily výhody více materiálů a umožnily dosažení vyšší účinnosti i stability výsledných solárních článků.

## 6 Zdroje

- [1] WU, Zonghao; YIN, Hang; LI, Gang a JI, Ziwu. Recent progress in semitransparent organic solar cells. Online. *Organic Electronics*. 2024, roč. 129. ISSN 15661199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2024.107060>. [cit. 2024-12-21].
- [2] ALAM, Shabaz; SIM, Suhui; LI, Meng Qiang; CHANG, Bong-Jun a LEE, Jaewon. Recent Progress in Semitransparent Organic Solar Cells: Photoabsorbent Materials and Design Strategies. Online. *Micromachines*. 2024, roč. 15, č. 4. ISSN 2072-666X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/mi15040493>. [cit. 2024-11-28].
- [3] ZHAO, Yepin; ZHU, Yuan; CHENG, Hao-Wen; ZHENG, Ran; MENG, Dong et al. A review on semitransparent solar cells for agricultural application. Online. *Materials Today Energy*. 2021, roč. 22. ISSN 24686069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100852>. [cit. 2025-05-24].
- [4] *Organic semiconductors for optoelectronics*. Wiley, 2021. ISBN 978-1119146100.
- [5] NELSON, Jenny. *The physics of solar cells*. 5rd. London: Imperial College Press, 2003. ISBN 18-609-4340-3.
- [6] MAKUŁA, Patrycja; PACIA, Michał a MACYK, Wojciech. How To Correctly Determine the Band Gap Energy of Modified Semiconductor Photocatalysts Based on UV–Vis Spectra. Online. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2018, roč. 9, č. 23, s. 6814-6817. ISSN 1948-7185. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.8b02892>. [cit. 2025-01-17].
- [7] UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. *Direct and Indirect Band Gap Semiconductors*. Online. 2004-2025. Dostupné z: <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/semiconductors/direct.php>. [cit. 2025-04-22].
- [8] N. RIVERS, Patrick (ed.). *Leading Edge Research in Solar Energy*. Nova Science Pub, 2006. ISBN 978-1600213366.
- [9] BURGUÉS-CEBALLOS, Ignasi; LUCERA, Luca; TIWANA, Priti; OCYTKO, Kornel; TAN, Li Wei et al. Transparent organic photovoltaics: A strategic niche to advance commercialization. Online. *Joule*. 2021, roč. 5, č. 9, s. 2261-2272. ISSN 25424351. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.07.004>. [cit. 2024-11-28].
- [10] POPE, Martin a SWENBERG, Charles E. *Electronic processes in organic crystals and polymers*. 2nd ed. Monographs on the physics and chemistry of materials. New York: Oxford University Press, 1999. ISBN 01-951-2963-6.
- [11] BEHERA, Dinesh; PHILPOT, Amie a FORCE, Sam, WOOD, Amelia (ed.). *Understanding HOMO and LUMO*. Online. OSSILA. Understanding HOMO and LUMO. Copyright 2025. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/homo-lumo>. [cit. 2025-05-22].
- [12] SOLAK, Ebru Kondolot a IRMAK, Erdal. Advances in organic photovoltaic cells: a comprehensive review of materials, technologies, and performance. Online. *RSC Advances*. 2023, roč. 13, č. 18, s. 12244-12269. ISSN 2046-2069. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/D3RA01454A>. [cit. 2024-12-17].

- [13] HOPPE, Harald a SARICIFTCI, N. Serdar. Polymer Solar Cells. Online. *Photoresponsive Polymers II*. 2007, s. 1-86. ISBN 978-3-540-69452-6. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/12\\_2007\\_121](https://doi.org/10.1007/12_2007_121). [cit. 2024-11-14].
- [14] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Online. 2011. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: <http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:9dbb8c60-adea-11ed-9763-5ef3fc9bb22f>. [cit. 2025-03-18].
- [15] HELMERS, Henning; HÖHN, Oliver; LACKNER, David; SCHYGULLA, Patrick; KLITZKE, Malte et al. Advancing solar energy conversion efficiency to 47.6% and exploring the spectral versatility of III-V photonic power converters. Online. *Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices XIII*. 2024, s. 36-. ISBN 9781510670228. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.3000352>. [cit. 2025-04-22].
- [16] ZHOU, Y.-P.; MA, X.-Y.; YANG, P.-X. a HE, Y.-L. Enhance and balance AVT and PCE of the semi-transparent perovskite solar cells for BIPV via grating-based photonic crystals. Online. *Materials Today Chemistry*. 2023, roč. 30. ISSN 24685194. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2023.101520>. [cit. 2025-04-22].
- [17] CHEN, Chun-Chao; DOU, Letian; ZHU, Rui; CHUNG, Choong-Heui; SONG, Tze-Bin et al. Visibly Transparent Polymer Solar Cells Produced by Solution Processing. Online. *ACS Nano*. 2012, roč. 6, č. 8, s. 7185-7190. ISSN 1936-0851. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/nn3029327>. [cit. 2025-05-23].
- [18] MIN, Jie; BRONNBAUER, Carina; ZHANG, Zhi-Guo; CUI, Chaohua; LUPONOSOV, Yuriy N. et al. Fully Solution-Processed Small Molecule Semitransparent Solar Cells: Optimization of Transparent Cathode Architecture and Four Absorbing Layers. Online. *Advanced Functional Materials*. 2016, roč. 26, č. 25, s. 4543-4550. ISSN 1616-301X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/adfm.201505411>. [cit. 2025-03-15].
- [19] HU, Zhenghao; WANG, Zhi; AN, Qiaoshi a ZHANG, Fujun. Semitransparent polymer solar cells with 12.37% efficiency and 18.6% average visible transmittance. Online. *Science Bulletin*. 2020, roč. 65, č. 2, s. 131-137. ISSN 20959273. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.09.016>. [cit. 2025-03-15].
- [20] DONG, Qingfeng; ZHOU, Yinhua; PEI, Jianing; LIU, Zhaoyang; LI, Yaowen et al. All-spin-coating vacuum-free processed semi-transparent inverted polymer solar cells with PEDOT: PSS anode and PAH-D interfacial layer. Online. *Organic Electronics*. 2010, roč. 11, č. 7, s. 1327-1331. ISSN 15661199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2010.04.012>. [cit. 2025-03-15].
- [21] PARK, Hyunmin; LEE, Jong-Hoon; LEE, Seongyu; JEONG, Song Yi; CHOI, Jin Woo et al. Retarding Ion Exchange between Conducting Polymers and Ionic Liquids for Printable Top Electrodes in Semitransparent Organic Solar Cells. Online. 2020, roč. 12, č. 2, s. 2276-2284. ISSN 1944-8244. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b15617>. [cit. 2025-03-15].
- [22] LEE, Yu-Ying; TU, Kun-Hua; YU, Chen-Chieh; LI, Shao-Sian; HWANG, Jeong-Yuan et al. Top Laminated Graphene Electrode in a Semitransparent Polymer Solar Cell by Simultaneous Thermal Annealing/Releasing Method. Online. *ACS Nano*. 2011, roč. 5, č. 8, s. 6564-6570. ISSN 1936-0851. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/nn201940j>. [cit. 2025-03-15].

- [23] JEON, Il; DELACOU, Clement; KASKELA, Antti; KAUPPINEN, Esko I.; MARUYAMA, Shigeo et al. Metal-electrode-free Window-like Organic Solar Cells with p-Doped Carbon Nanotube Thin-film Electrodes. Online. *Scientific Reports*. 2016, roč. 6, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/srep31348>. [cit. 2025-03-15].
- [24] LISCO, F.; SHAW, A.; WRIGHT, A.; WALLS, J.M. a IZA, F. Atmospheric-pressure plasma surface activation for solution processed photovoltaic devices. Online. *Solar Energy*. 2017, roč. 146, s. 287-297. ISSN 0038092X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.030>. [cit. 2025-01-10].
- [25] SARCAN, Fahrettin; ARMSTRONG, Alex J.; BOSTAN, Yusuf K.; KUS, Esra; MCKENNA, Keith P. et al. Ultraviolet-Ozone Treatment: An Effective Method for Fine-Tuning Optical and Electrical Properties of Suspended and Substrate-Supported MoS<sub>2</sub>. Online. *Nanomaterials*. 2023, roč. 13, č. 23. ISSN 2079-4991. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/nano13233034>. [cit. 2025-03-26].
- [26] VERDING, Pieter; MARY JOY, Rani; REENAERS, Dieter; KUMAR, Rachith Shanivarasanthe Nithyananda; ROUZBAHANI, Rozita et al. The Influence of UV–Ozone, O<sub>2</sub> Plasma, and CF<sub>4</sub> Plasma Treatment on the Droplet-Based Deposition of Diamond Nanoparticles. Online. 2024, roč. 16, č. 1, s. 1719-1726. ISSN 1944-8244. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsami.3c14014>. [cit. 2025-03-18].
- [27] OSSILA. *Spin Coating: Complete Guide to Theory and Techniques*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/spin-coating>. [cit. 2025-04-22].
- [28] MURSAL; IRHAMNI; BUKHARI a JALIL, Zulkarnain. Structural and Optical Properties of Zinc Oxide (ZnO) based Thin Films Deposited by Sol-Gel Spin Coating Method. Online. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, roč. 1116. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1116/3/032020>. [cit. 2024-11-14].
- [29] VŠCHT. *Spin-coating - [SC]*. Online. 2009. Dostupné z: <https://nano.vscht.cz/wp-content/uploads/navody/priprava/SC.pdf>. [cit. 2025-05-03].
- [30] SOONMIN, Ho. Investigation of Optical Properties of Thin Films by Means of UV-visible Spectrophotometer: A Review. Online. *New Frontiers in Physical Science Research Vol. 5*. 2022, s. 66-82. ISBN 9788195984817. Dostupné z: <https://doi.org/10.9734/bpi/nfpsr/v5/4498E>. [cit. 2025-03-31].
- [31] HAASZ, Vladimír a SEDLÁČEK, Miloš. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-010-1717-6.
- [32] *Four Point Probe Resistivity Measurements*. Online. 2006. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/four-point-probe-resistivity-measurements>. [cit. 2025-04-22].
- [33] NWANNA, Emeka Charles; IMOISILI, Patrick Ehi a JEN, Tien-Chien. Synthesis and characterization of SnO<sub>2</sub> thin films using metalorganic precursors. Online. *Journal of King Saud University - Science*. 2022, roč. 34, č. 5. ISSN 10183647. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102123>. [cit. 2024-11-15].
- [34] LEE, Hyunjae; HA, Seunghyun; BAE, Jin-Hyuk; KANG, In-Man; KIM, Kwangeun et al. Effect of Annealing Ambient on SnO<sub>2</sub> Thin Film Transistors Fabricated via An Ethanol-based Sol-gel

Route. Online. *Electronics*. 2019, roč. 8, č. 9. ISSN 2079-9292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/electronics8090955>. [cit. 2025-01-03].

- [35] HAKEEM, Sumbal; ALI, Saqib; LIAQAT, Muhammad Arman; JAMSHED, Ayesha; BASIT, Maryam et al. Effect of Annealing Temperature on the Morphology, Structure and Optical Properties of Spin-Coated SnO<sub>2</sub> Films for Solar Cell Application. Online. *CEMP 2023*. 2024, s. 28-. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/materproc2024017028>. [cit. 2025-01-03].

## 7 Seznam použitých zkratk a symbolů

AgNW – stříbrné nanodrátky

AVT – průměrná viditelná transmitance

FF – faktor zaplnění

HOMO – nejvyšší obsazený molekulový orbital

$I_{\max}$  – maximální proud

IPA – isopropyl alkohol

$I_{\text{sc}}$  – zkratový proud

ITO – oxid indium a cín

$J_{\text{sc}}$  – proudová hustota

LUE – účinnost využití světla

LUMO – nejnižší neobsazený molekulový orbital

$O_3$  – ozón

OFET – organické polem řízené tranzistory

OLED – organické světelné diody

OSC – organický solární článek

PAR – fotosyntetické aktivní záření

$P_{\max}$  – maximální výkon

$\text{SnO}_2$  – oxid cínčitý

ST-OSC – semitransparentní solární článek

TTE – transparentní vrchní elektrody

$U_{\max}$  – maximální napětí

$U_{\text{oc}}$  – napětí naprázdno

WCA – kontaktní úhel s vodou

ZnO – oxid zinečnatý