

*Katedra elektrotechnologie*

České vysoké učení technické v Praze



*Bakalářská práce*

# Vliv materiálu selektivní elektrody na účinnost perovskitových solárních článků

Tereza Staňková

Květen 2024

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Neda Neykova, Ph.D.



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Staňková** Jméno: **Tereza** Osobní číslo: **507354**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vliv materiálu selektivní elektrody na účinnost perovskitových solárních článků**

Název bakalářské práce anglicky:

**Influence of the selective electrode material on the efficiency of perovskite solar cells**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši následujících témat: tenkovrstvé technologie, transparentní oxidy, perovskitové články
2. Připravte perovskitový článek metodou rotačního nanášení, kde budete používat jako selektivní elektrody organickou vrstvu (PTAA) nebo tenké vrstvy vodivých oxidů připravené různými technologiemi
3. Proměřte vlastnosti jak připravené oxidové vrstvy, tak celého článku

Seznam doporučené literatury:

- [1] Seshan, K.: Handbook of thin-film deposition processes and techniques: principles, methods, equipment and applications, Norwich 2002
- [2] H.J. Snaith, Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells, J. Phys.Chem. Lett. 4 (2013)
- [3] S. Ahmad: Perovskite solar cells, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2021
- [4] K. Ridzoňová et al.: Correlating light-induced deep defects and phase segregation in mixed-halide perovskites, J. Mater. Chem. A, 2022,10, 18928-18938

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Mgr. Neda Neykova, Ph.D. Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i.**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.02.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Mgr. Neda Neykova, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

### *Prohlášení*

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

### *Poděkování*

Ráda bych poděkovala všem, kteří přispěli k dokončení této bakalářské práce. Zvláštní poděkování patří mé vedoucí práce Ing. Mgr. Nedě Neykové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a podporu v průběhu celého výzkumu. Dále velmi děkuji Ing. Evě Horynové. Vaše pomoc a podpora byly neocenitelné a významně přispěly k úspěšnému dokončení této práce.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá zkoumáním vrstev pro transport elektronů (ETL) v perovskitových solárních článcích, konkrétně oxidů zinečnatého (ZnO) a molybdenového (MoO<sub>3</sub>). Hlavním cílem bylo analyzovat vlastnosti těchto materiálů při různých depozičních metodách, jako je pulzní laserová depozice (PLD) a magnetronové naprašování. Práce se zaměřuje na měření tloušťky a hrubosti vrstev, absorpčních koeficientů, šířky zakázaného pásu a luminiscence. Dále byly zkoumány jejich vlivy na celkovou účinnost a volt-ampérovou charakteristiku vytvořených perovskitových solárních článků. Výsledky ukazují, jak různé depoziční techniky ovlivňují fyzikální a chemické vlastnosti ETL vrstev, a tím i celkovou výkonost perovskitových solárních článků.

**Klíčová slova:** směsné organicko-anorganické halogenidové perovskity, vrstvy pro transport elektronů, n-i-p fotovoltaické články, oxid zinečnatý, oxid molybdenový, účinnost, fotoluminiscence

## **Abstract**

This bachelor's thesis investigates the electron transport layers (ETL) in perovskite solar cells, specifically zinc oxide (ZnO) and molybdenum oxide (MoO<sub>3</sub>). The primary goal was to analyze the properties of these materials using different deposition methods, such as pulsed laser deposition (PLD) and magnetron sputtering. The study focuses on measuring the thickness and roughness of the obtained layers, absorption coefficients, bandgap widths, and photoluminescence. Additionally, their impact on the overall efficiency and current-voltage (I-V) characteristics of the fabricated perovskite solar cells was examined. The results demonstrate how different deposition techniques influence the physical and the chemical properties of the ETL layers, thereby affecting the overall performance of perovskite solar cells.

**Keywords:** mixed organic-inorganic halide perovskites, electron transport layers, n-i-p photovoltaic cells, zinc oxide, molybdenum oxide, efficiency, photoluminescence

## Obsah

<i>Prohlášení</i> .....	iv
<i>Poděkování</i> .....	v
1 Teoretická část.....	1
1.1 Úvod .....	1
1.2 Polovodiče .....	1
1.2.1 Vlastní polovodiče .....	1
1.2.2 Nevlastní polovodiče .....	1
1.2.2.1 N-typ.....	2
1.2.2.2 P-typ .....	2
1.2.3 Pásový model polovodiče.....	2
1.2.4 PN přechod .....	3
1.3 Princip fotovoltaického článku .....	5
1.3.1 Fotoelektrický jev .....	5
1.3.2 Křemíkový fotovoltaický článek.....	6
1.3.3 Zatěžovací charakteristika fotovoltaického článku .....	6
1.4 Generace solárních článků .....	8
1.4.1 První generace – Křemíkové články .....	9
1.4.2 Druhá generace – Tenkovrstvé články .....	9
1.4.3 Třetí generace.....	9
1.4.3.1 Perovskitové články .....	9
1.4.3.2 Tandemové články .....	9
1.4.4 Čtvrtá generace - Hybridní články .....	10
1.5 Obecná struktura perovskitového solárního článku.....	11
1.6 Oxidy přechodových kovů .....	11
1.6.1 Oxid zinečnatý .....	11
1.6.2 Oxid molybdenový.....	12
1.7 Transparentní vodivé oxidy .....	12
1.7.1 Oxid indium a cínu (ITO) .....	12
1.8 Perovskitové materiály .....	12
1.8.1 Výhody perovskitových materiálů .....	13
1.8.2 Problémy perovskitových materiálů.....	13
1.9 Tenké vrstvy.....	14
1.10 Tenkovrstvé technologie.....	14
1.10.1 Pulzní laserová depozice (PLD) .....	14
1.10.2 Magnetronové naprašování .....	15

1.10.3	Metoda rotačního nanášení .....	16
1.10.4	Napařovačka .....	17
1.11	Způsoby měření vlastností vrstev .....	18
1.11.1	Elipsometrie .....	18
1.11.2	Fotoluminiscenční spektroskopie .....	19
1.11.3	Elektronový mikroskop .....	19
1.11.4	Atomární silová mikroskopie (AFM).....	20
1.11.5	Měření V-A charakteristiky .....	20
2	Praktická část .....	21
2.1	Postup při tvorbě článků.....	21
2.2	Elektronově vodivá vrstva a její vlastnosti .....	23
2.2.1	Vrstvy z oxidu zinečnatého .....	23
2.2.2	Vrstvy z oxidu molybdenového.....	23
2.2.3	Naměřené optické vlastnosti ETL vrstev .....	25
2.2.3.1	Zinkoxidové vrstvy měřené na elipsometru.....	25
2.2.3.3	Molybdenové vrstvy měřené na elipsometru .....	26
2.2.4	Výpočet šířky zakázaného pásu pomocí Taucovi metody .....	27
2.2.5	Molybdenové vrstvy pod elektronovým mikroskopem .....	28
2.2.6	Molybdenové vrstvy pod AFM mikroskopem .....	30
2.2.7	Perovskity pod elektronovým mikroskopem .....	31
2.2.8	Měření luminiscence .....	32
2.2.9	VA charakteristiky vyrobených článků .....	32
2.2.10	Výpočet faktorů plnění a účinností vytvořených článků.....	35
3	Závěr .....	36
4	Bibliografie .....	38
	<i>Seznam obrázků</i> .....	41
	<i>Seznam tabulek</i> .....	41
	<i>Seznam grafů</i> .....	42
	<i>Přílohy</i> .....	43



### Seznam zkratek

<i>FV</i>	fotovoltaické
<i>ZnO</i>	oxid zinečnatý
<i>MoO<sub>3</sub></i>	oxid molybdenový
<i>ITO</i>	cínem dopovaný oxid inditý
<i>Au</i>	zlato
<i>Ag</i>	stříbro
<i>TCO</i>	transparentní vodivé oxidy (transparent conducting oxides)
<i>TMO</i>	oxidy přechodových kovů (transition metal oxides)
<i>HTL</i>	děrově vodivá vrstva (hole transport layer)
<i>ETL</i>	elektronově vodivá vrstva (electron transport layer)
<i>VA</i>	voltampérová
<i>PLD</i>	pulzně laserová depozice (pulsed laser deposition)
<i>AFM</i>	atomární silová mikroskopie (atomic force microscopy)
<i>PSC</i>	perovskitové solární články

### Seznam symbolů

$U_{oc}$	[V]	napětí naprázdno
$I_{sc}$	[A]	zkratový proud
$P_{max}$	[W]	maximální výkon
$U_{mp}$	[V]	napětí odebírané při maximálním výkonu
$I_{mp}$	[A]	proud odebíraný při maximálním výkonu
$FF$	[%]	činitel plnění
$P_{in}$	[W]	vstupní výkon
$P_{out}$	[W]	výstupní výkon
$\eta$	[%]	účinnost



# 1 Teoretická část

## 1.1 Úvod

V době 21. století, kdy se společnost stále více zaměřuje na hledání udržitelných a ekologicky přijatelných způsobů výroby energie, se solární články stávají klíčovým prvkem v oblasti obnovitelných zdrojů. Solární technologie pro výrobu elektrické energie neustále prochází inovacemi, a jednou z klíčových oblastí výzkumu a vývoje jsou tenké vrstvy používané ve fotovoltaických článcích.

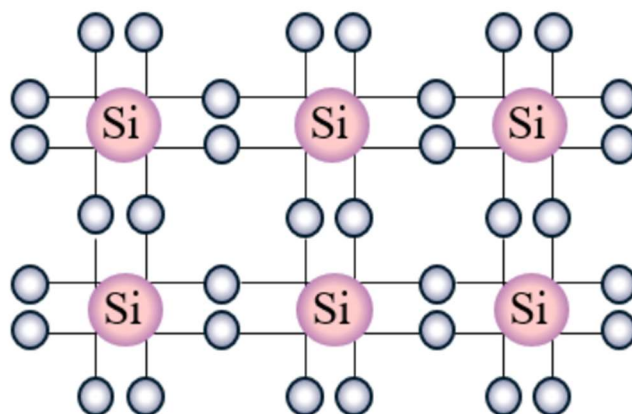
Cílem této bakalářské práce je podrobněji zkoumat tenké vrstvy, které tvoří fotovoltaický článek a pomocí různých úprav jejich vlastností najít kombinaci s největší účinností.

## 1.2 Polovodiče

Pro popis fotovoltaického článku potřebujeme znát chování polovodičů. Jejich hlavní charakteristikou je schopnost měnit elektrickou vodivost na základě různých faktorů, jako je teplota, příměsi nebo přiložené napětí. [1] [2] Obecně se dělí na vlastní (intristické) a nevlastní (příměsové). [3]

### 1.2.1 Vlastní polovodiče

Vlastní polovodiče jsou prvky, které mají v krystalové struktuře přítomné pouze valeční elektrony (nositelé záporného náboje) a stejný počet děr (nositelé kladného náboje), tudíž se v nich projevuje jen vlastní vodivost. Hlavními zástupci jsou křemík (Si) a germanium (Ge), které se nachází ve čtvrté skupině periodické tabulky a mají ve valenční vrstvě čtyři elektrony, které tvoří vazby s ostatními atomy a tím vytvářejí krystalickou mřížku. [3]



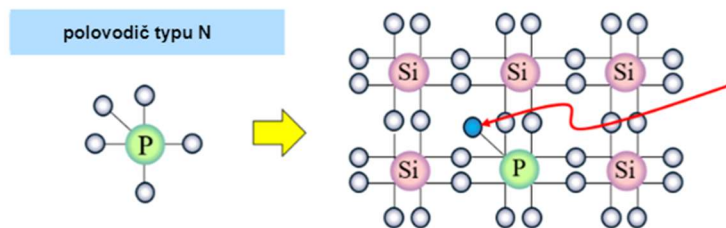
Obrázek 1 – struktura intristického polovoče (křemík – Si) [4]

### 1.2.2 Nevlastní polovodiče

Nevlastní polovodiče obsahují příměsi. Typu určité vodivosti se dosahuje difúzí nebo implantací donorů pro N typ a akceptorů pro P typ. [5]

### 1.2.2.1 N-tyt

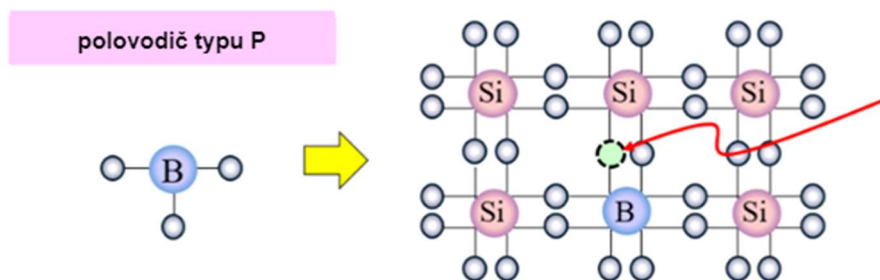
Jako donor slouží prvky, která mají obvykle o jeden valenční elektron více než základní prvek. Pokud přidáme ke křemíku prvek z páté skupiny periodické tabulky (V.A), př. Fosfor (P), pouze čtyři z pěti valenčních elektronů se zapojují do kovalentní vazby s křemíkem, tudíž pátý valenční elektron je volný a začíná se pohybovat mřížkou. Elektrony se stávají majoritními nositeli náboje. Tento jev se nazývá elektronová vodivost a popisuje chování polovodiče typu N. [6]



Obrázek 2 – struktura polovodiče typu N [4]

### 1.2.2.2 P-tyt

Jako akceptor slouží prvek, který má naopak o jeden valenční elektron méně. Přidáním příměsi ze třetí skupiny periodické tabulky prvků (III.A), př. Bor (B), který má ve valenční vrstvě pouze tři elektrony, se v mřížce vytvoří prázdné místo. Absence jednoho elektronu, který by se zapojil do další vazby, vytvoří díru, která může být snadno zaplněna skokem elektronu ze sousedního atomu křemíku. Díra se tak může pohybovat krystalem. Výsledkem tohoto jevu vzniká polovodič s děrovou vodivostí, který se nazývá polovodič typu P. [6]



Obrázek 3 – struktura polovodiče typu P, [4]

### 1.2.3 Pásový model polovodiče

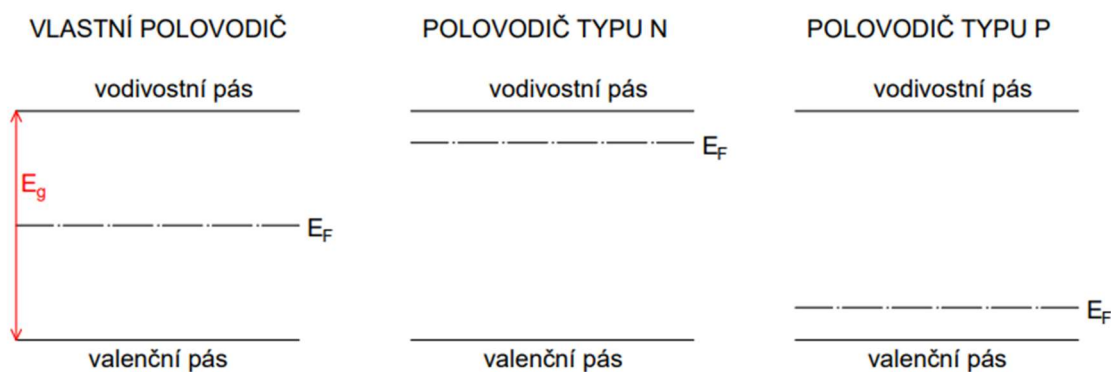
Na uvolnění elektronu z krystalické mřížky je potřeba dodat větší energii než je vazebná energie. Uvolněním elektronu z mřížky vzniká pár elektron – díra, tento proces se nazývá generace. Opačný proces, kdy se elektron opět navrací do vazebné dvojice a tím odevzdává kus své energie, se nazývá rekombinace. [6]

V nízkém energetickém stavu elektrony postupně obsazují hladiny valenčního pásu a nezvládnou zprostředkovat vedení proudu. Nejvyšší energetická hladina valenčního pásu se označuje  $E_V$ . Dodáním dostatečně velké energie elektrony přecházejí do vodivostního pásu a mohou vést elektrický proud. Nejnižší hladina vodivostního pásu se označuje  $E_C$ . Oblast mezi těmito dvěma hladinami se nazývá zakázaný pás  $E_G$  a jeho šířku určuje rozdíl těchto dvou hladin. [2]

$$\Delta E_G = E_C - E_V$$

Na to aby mohl elektron přeskočit z valenční do vodivostní hladiny potřebuje dostat energii větší než je výše zmíněná šířka zakázaného pásu. U vlastních polovodičů je Fermiho hladina  $E_F$  přímo uprostřed zakázaného pásu. U typu N se posouvá blíže k vodivostnímu pásu a u typu P naopak blíže k valenčnímu pásu (viz Obrázek 4), tato hladina bude zastávat významnou roli v rozložení náboje při spojení do PN přechodu. (viz. Kap.1.2.4) [2]

U křemíku je šířka zakázaného pásu rovna energii 1,1 eV (což odpovídá vlnové délce menší než 1000 nm), je možné jí získat při zvýšení teploty nebo při ozáření světlem, kdy foton předává svoji energii elektronu ve vazbě.[7]



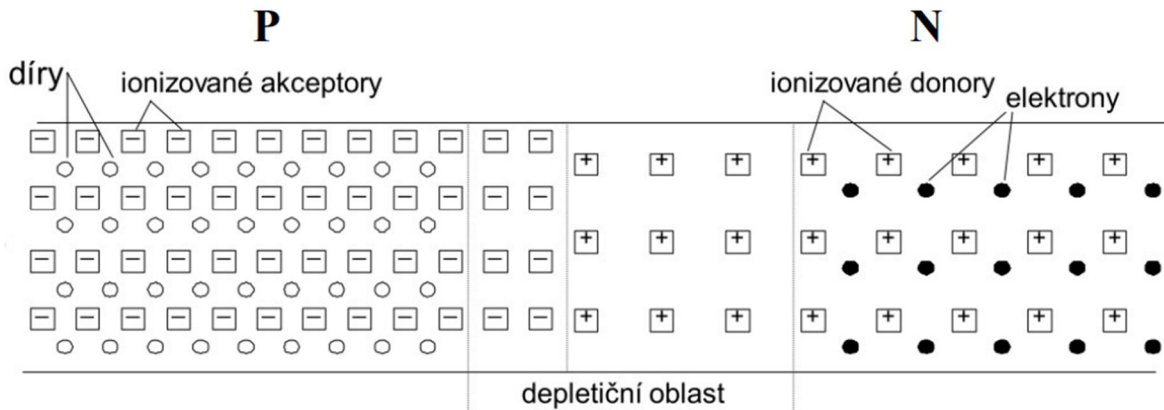
Obrázek 4 - Pásmový model polovodiče, [vlastní]

#### 1.2.4 PN přechod

Spojením materiálů různé vodivosti vzniká PN přechod, pokud se jedná o přechod mezi stejným materiálem, jehož části mají pouze jiný typ vodivosti, přechod se nazývá homogenní. Naopak vždy pokud jde o dva jiné materiály, které mají buď stejný nebo opačný typ vodivosti, přechod je heterogenní (heteropřechod). [8]

Elektrony v blízkosti přechodu difundují z oblasti N do P, zanechávající za sebou kladný prostorový náboj, který odpuzuje kladné volné díry difundující z oblasti P do N. Naopak díry v blízkosti přechodu difundují z oblasti P do N a zanechávají za sebou záporný prostorový náboj, který odpuzuje volné

elektrony difundující z oblasti N do P. V oblasti přechodu dochází k rekombinaci volných elektronů a děr, což vede k vytvoření depletiční oblasti. [9]

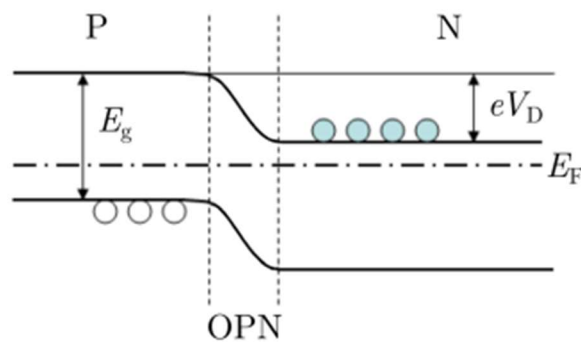


Obrázek 5 - spojení P a N polovodiče a vytvoření depletiční oblasti, [9]

V nevlastních polovodičových materiálech může již malé množství energie stačit k uvolnění elektronů do vodivostního pásu, čímž vytvoří ionizované donory, zatímco akceptory přijímají elektrony z valenčního pásu, čímž vznikají ionizované akceptory. Pro dosažení rovnovážného stavu je nezbytné, aby Fermiho hladina ( $E_F$ ) byla v každém bodě materiálu stejná. [10]

V důsledku gradientu koncentrace dochází k migraci části elektronů z oblasti s nadbytkem elektronů (N oblast) do oblasti s nedostatkem elektronů (P oblast). Tento proces narušuje neutralnost a kolem přechodu vzniká oblast s prostorovým nábojem (OPN), která je tvořena ionizovanými donory a akceptory, bránícími dalšímu difuznímu toku nosičů náboje. [10]

Potenciálový schod, který odpovídá difuznímu napětí  $U_D$ , vzniká v důsledku rozdílu koncentrací nosičů náboje přes přechod. Po přiložení záporného vnějšího napětí na N část a kladného na P část jsou elektrony přitahovány do oblasti s nedostatkem elektronů (P oblast) a díry do oblasti s nadbytkem elektronů (N oblast), čímž se umožní tok propustného proudu přes přechod. [11]



Obrázek 6 – Pásmové schéma P-N přechodu,  $V_D$  je difuzní napětí,  $E_g$  značí šířku zakázaného pásu, modré kroužky označují elektrony a bílé díry [10]

## 1.3 Princip fotovoltaického článku

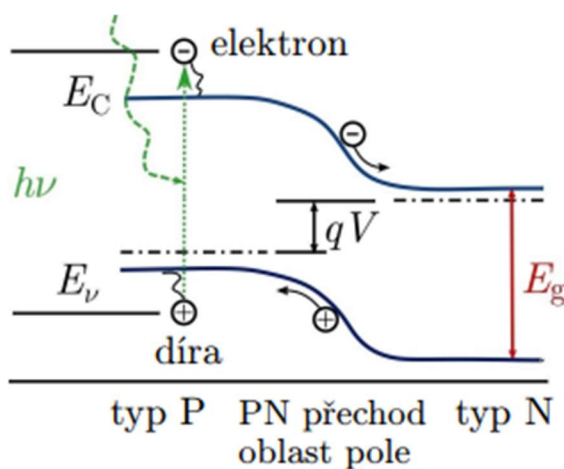
### 1.3.1 Fotoelektrický jev

Polovodičový materiál, který má energetický rozdíl mezi vazebným a volným elektronem roven nebo nižší než je energie fotonu, je schopen fotoelektrického jevu, při kterém fotony slunečního záření předávají svoji energii vazebnému elektronu a tím ho uvolňují z krystalické mřížky.

Světelná energie vybudí elektrony z valenčního pásu do vodivostního pásu, čímž vznikají páry elektron-díra. Tyto páry se pohybují směrem k PN přechodu, kde jsou rozděleny vnitřním elektrickým polem: elektrony směřují do N-oblasti a díry do P-oblasti. To způsobí, že N-oblast se nabíjí záporně a P-oblast kladně, což vede k toku proudu ve vnějším obvodu.

Nicméně, ne všechny generované nosiče dosáhnou PN přechodu, protože některé se cestou rekombinují. Klíčovým faktorem je difúzní délka, která udává vzdálenost, na které koncentrace generovaných nosičů klesne na  $1/e$  původní hodnoty. Je zřejmé, že dostatečně velká hodnota difúzní délky příznivě ovlivňuje účinnost solárního článku. V anorganických materiálech je difúzní délka řádově mikrometry, což příznivě ovlivňuje účinnost solárního článku.

Pokud je energie dopadajícího záření vyšší než energetický rozdíl mezi vazebným a volným elektronem, nadbytečná energie se přeměňuje v teplo, což snižuje účinnost článku. [10], [12]

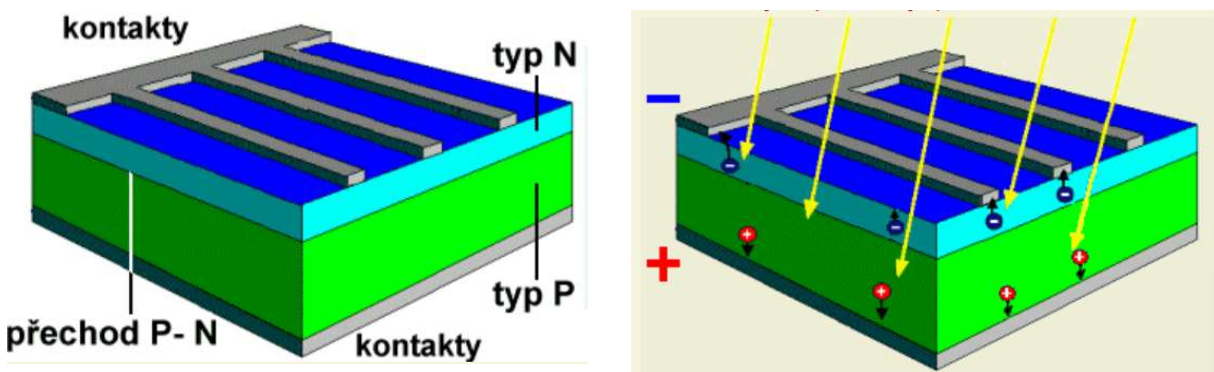


Obrázek 7 – Pásmové schéma osvětleného P-N přechodu [10]

### 1.3.2 Křemíkový fotovoltaický článek

Základem je křemíková destička s vodivostí typu P, na které je nanesená tenká vrstva polovodiče typu N. Obě vrstvy jsou odděleny PN přechodem. Osvětlením článku vzniká fotoelektrický jev, při kterém se elektrony uvolňují z krystalické mřížky do vodivostního pásu. V obou částech článku vznikají páry elektronů a děr. Tyto páry pak difundují směrem k oblasti prostorového náboje, kde jsou elektrickým polem rozděleny: elektrony pronikají do oblasti typu N a díry do oblasti typu P. [5]

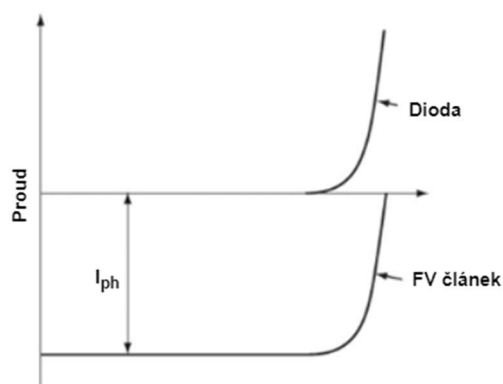
Tímto procesem se oblast typu N nabije záporně a oblast typu P nabije kladně, což vytvoří elektrické napětí o velikosti přibližně 0,6 V. Při připojení vnějšího obvodu se usiluje o vyrovnání napětí a začne protékat proud. Ve skutečnosti však všechny generované nosiče cestou rekombinují. Důležitou roli v tomto procesu hraje tzv. difuzní délka (viz. Předchozí kapitola). [5]



Obrázek 8 - struktura křemíkového článku, [13]

### 1.3.3 Zatěžovací charakteristika fotovoltaického článku

Ideální solární článek lze reprezentovat proudovým zdrojem zapojeným paralelně s usměrňovací diodou. Voltamperová charakteristika je popsána Schokleyovou rovnicí pro solární článek, která je v souladu s principem superpozice. Je vytvořena posunem charakteristiky diody v temnotě podél osy proudu o hodnotu  $I_{ph}$ . [14]



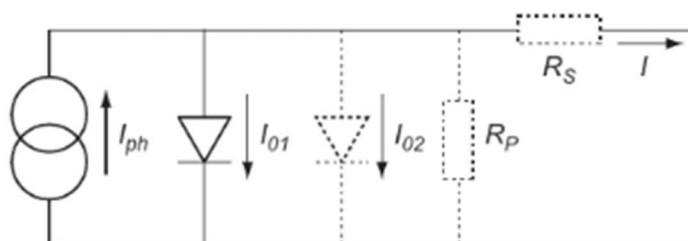
Obrázek 9 - VA charakteristika diody a FV článku



Závislost proudu na vnějším napětí je dána touto charakteristikou: [14]

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

kde  $U$  je vnější napětí,  $T$  je absolutní teplota,  $k$  je Boltzmanova konstanta,  $q$  je elektronový náboj,  $I_0$  je saturační proud diody,  $I_{ph}$  je fotogenerovaný proud.



Obrázek 10 - Náhradní schéma solárního článku (plnou čarou ideální stav, tečkovanou při uvažování neideálních součástek), [14]

Sériový odpor  $R_s$  se určuje z inverzní strmosti křivky v oblasti blízko napětí naprázdno, kde vyšší  $R_s$  vede k většímu úbytku napětí při průchodu proudu, což snižuje účinnost solárního článku.

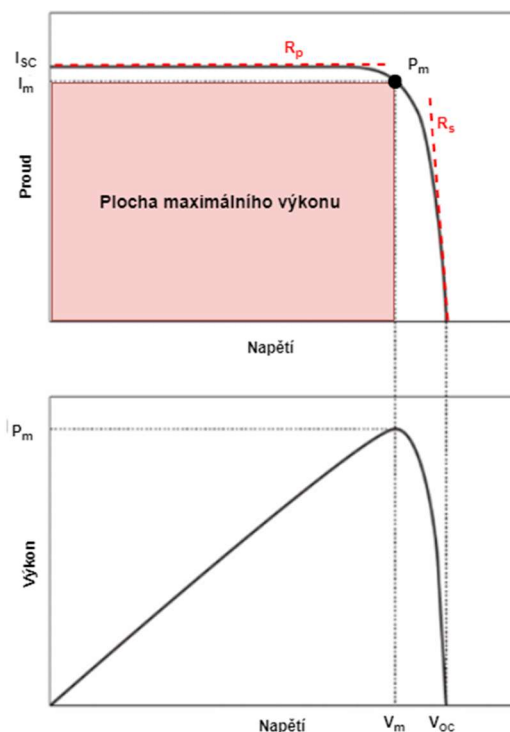
Paralelní odpor  $R_p$  se určuje z inverzní strmosti křivky v blízkosti nulového napětí (krátkodobý proud). Nízký  $R_p$  znamená větší únikový proud, což způsobuje ztráty a snižuje účinnost článku. Vysoký  $R_p$  je žádoucí pro minimální ztráty. [15]

Bod maximálního výkonu ( $P_m$ ) je místo, kde solární článek generuje největší výkon při určitém napětí  $U_{mp}$  a proudu  $I_{mp}$ . Plnicí faktor je poměr maximálního výkonu k teoretickému součinu maximální hodnoty napětí ( $U_{oc}$  - napětí naprázdno) a proudu ( $I_{sc}$  - proud nakrátko). [14]

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2)$$

Účinnost článku  $\eta$  je dána poměrem vygenerovaného výkonu článkem  $P_m$  ku výkonu dopadajícího světla  $P_{in}$ : [16]

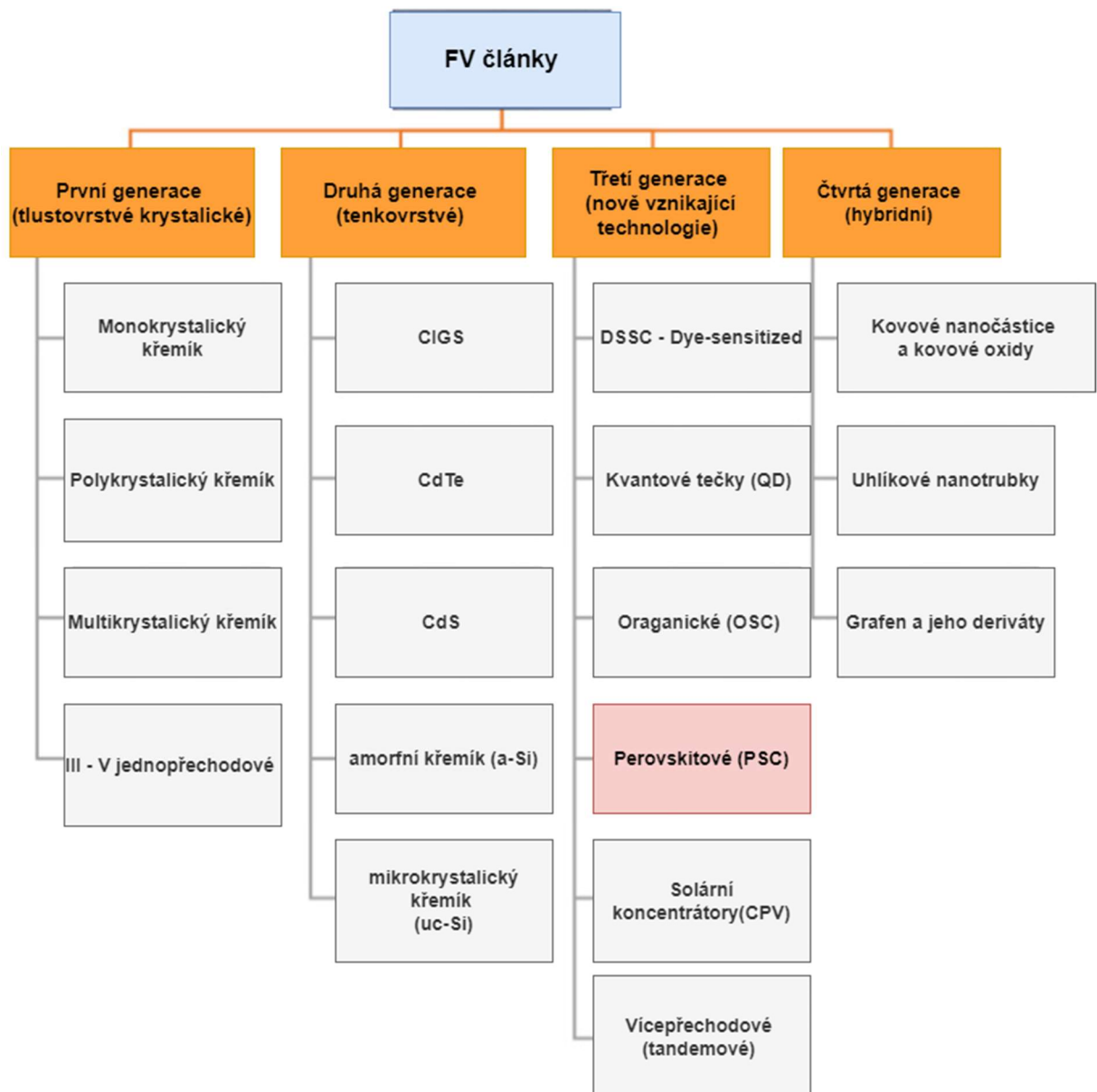
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \quad (3)$$



Obrázek 11 - VA charakteristika FV článku

## 1.4 Generace solárních článků

Fotovoltaické články prošly v posledních desetiletích rychlým vývojem, který vedl k významnému zlepšení jejich účinnosti a snížení nákladů na výrobu. Tento vývoj můžeme rozdělit do několika generací, z nichž každá přináší nové technologie a materiály s cílem optimalizovat přeměnu sluneční energie na elektrickou. Diagram níže ilustruje jednoduše popsany vývoj fotovoltaických článků a ukazuje, jak se technologie postupně zlepšovala a diverzifikovala. V následujících kapitolách budou podrobně popsáni nejvýznamnější představitelé všech generací fotovoltaických článků.



Obrázek 12 - diagram vývoje fotovoltaických článků, [17]

#### 1.4.1 První generace – Křemíkové články

První generace solárních panelů, využívající monokrystalického křemíku (c-Si), je na hraně fyzikálních možností s omezeným prostorem pro další zlepšení. Tyto panely mají dobrou účinnost a dlouhodobou stabilitu výkonu, avšak jejich výroba je náročná vzhledem k nízké absorpci slunečního záření, jsou tvořené řezáním z Si ingotů, vrstvy musí být tlusté (nejméně 200  $\mu\text{m}$ ) a to vede ke spotřebě velkého množství čistého křemíku. Navzdory těmto nevýhodám jsou v praxi stále nejvíce využívány. [8], [18]

#### 1.4.2 Druhá generace – Tenkovrstvé články

Díky snaze o snížení množství používaného materiálu se všechny další generace článků ubírají cestou tenkovrstvých technologií. Druhá generace solárních panelů představuje optimalizaci využití křemíku i jiných materiálů s cílem snížit náklady a efektivněji využívat solární energii.

Tenkovrstvé fotovoltaické články byly navrženy jako cenově dostupná náhrada za krystalické křemíkové články. Nabízejí zlepšené mechanické vlastnosti, které jsou ideální pro flexibilní aplikace, ale to přináší riziko snížené účinnosti. Tato generace zahrnuje vývoj technologie fotovoltaických článků první generace, stejně jako vývoj technologie tenkých filmových fotovoltaických článků z mikrokrystalického křemíku ( $\mu\text{c-Si}$ ) a amorfního křemíku (a-Si), mědi, india, gallia a selenu (CIGS) a teluridu kademnatého/sulfidu kademnatého (CdTe/CdS). [17], [19]

#### 1.4.3 Třetí generace

Třetí generace solárních článků představuje širokou škálu přístupů, od levných nízkoučinných systémů (dye-sensitized, organické) po drahé vysokoúčinné systémy (III-V vícepřechodové články) pro aplikace od integrovaných staveb po vesmírné aplikace. Třetí generace fotovoltaických článků jsou někdy označovány jako "nové koncepty" kvůli jejich nízkému průniku na trh, přestože některé z nich jsou studovány více než 25 let. Nejvyspělejší studie v oblasti výrobní technologie a zlepšení účinnosti jsou nyní zaměřeny na solární články třetí generace. [17]

##### 1.4.3.1 Perovskitové články

Perovskitové solární články (PSCs) získávají pozornost díky stoupající účinnosti a nízkým výrobním nákladům, což je umožněno zejména díky cenově dostupným materiálům a jednoduchým výrobním procesům. Kromě toho mohou PSCs konkurovat křemíkovým panelům díky své flexibilitě a nízké hmotnosti, což otevírá nové možnosti využití v různých aplikacích. [20], [21]

Vzhledem k tomu, že praktická část této bakalářské práce zabývá přímo těmito technologiemi, budou více přiblíženy v dalších kapitolách.

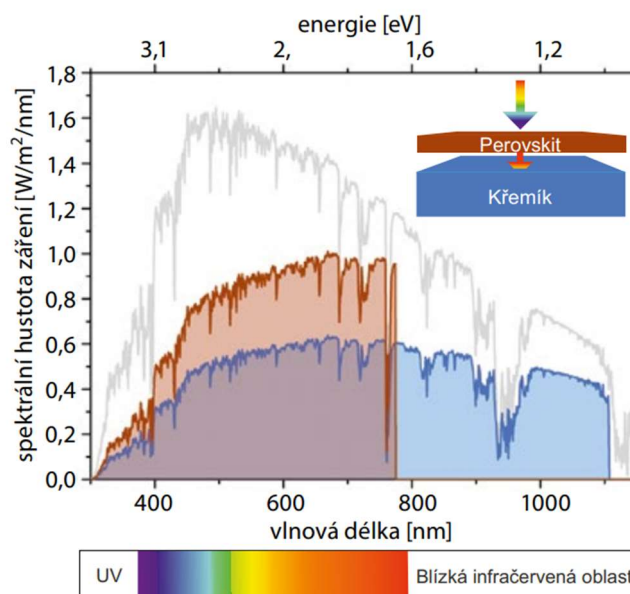
##### 1.4.3.2 Tandemové články

Třetí generace solárních panelů představuje inovativní tandemové články, které kombinují využití perovskitu a křemíku s cílem dosáhnout účinnosti přesahující 30 %. Tato technologie je

elektrotechnicky definována jako sériové spojení dvou či více zdrojů proudu, což znamená, že obsahuje dva (či více) p- i- n přechodů. [22]

Pokud foton o vysoké energii interaguje s elektronem, je využita jen energie potřebná na excitaci elektronu, zbytek energie je ztracen v podobě tepla, které je předáno materiálu, to způsobuje tepelnou degradaci materiálu a zhoršení jeho charakteristik. Tandemové články řeší tento problém tím, že jsou složeny z různých struktur polovodičových materiálů s různou šířkou zakázaného pásu, které jsou řazeny do série. Sluneční záření nejdříve prochází vrstvou s největší šířkou zakázaného pásu a postupně prostupuje skrze další vrstvy s klesajícími hodnotami šířky zakázaného pásu. Tento koncept umožňuje efektivnější využití sluneční energie a představuje pokrok v oblasti solárních technologií (obr.14). [23] [24]

Vrchní perovskitová vrstva absorbuje viditelné fotony s vyšší energií (př. větší nebo rovno 1,6 eV). Přes perovskit prošlé neabsorbované fotony s nižší energií z infračervené oblasti (1,1 – 1,6 eV, vlnové délky v rozsahu 1130 – 780 nm) se absorbují až ve spodní křemíkové vrstvě. Absorbce je vidět na obr. 15 [25]



Obrázek 13 - Porovnání spektra slunečního záření(šedá barva) absorbovaného v perovskitové a v křemíkové vrstvě tandemového článku, [22]

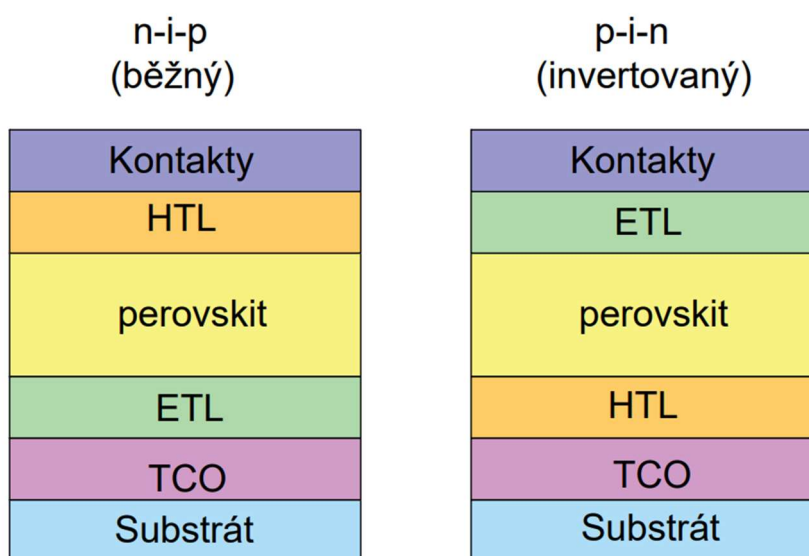
#### 1.4.4 Čtvrtá generace - Hybridní články

Čtvrtá generace fotovoltaických článků, známá také jako hybridní anorganické články, spojuje nízké náklady a flexibilitu polymerových tenkých filmů se stabilitou organických nanostruktur, jako jsou kovové nanočástice a oxidy kovů, uhlíkové nanotrubičky, grafen a jejich deriváty. Tato zařízení jsou často označována jako "nanofotovoltaika" a nabízejí nadějnou perspektivu pro budoucnost solární energie.[17]

## 1.5 Obecná struktura perovskitového solárního článku

Obecně lze perovskitové solární články rozdělit do dvou architektonických typů, n-i-p a p-i-n, kde rozdíl je definován pořadím nanášení elektronově vodivé vrstvy (ETL) a děrově vodivé vrstvy (HTL) vzhledem k transparentnímu vodivému oxidu (TCO) a podkladu (substrát). [21]

Nejvýkonnější články jsou v současnosti vytvářeny v architektuře n-i-p. Nicméně, perovskitové solární články typu p-i-n jsou také významně zajímavé díky své vysoké operační stabilitě a úspěšné integraci do tandemových solárních článků. [26]



Obrázek 14 – n-i-p a p-i-n struktura perovskitových článků [20], vlastní

## 1.6 Oxidy přechodových kovů

Oxidy přechodných kovů (TMO) hrají velkou roli při zlepšování výkonu a stability perovskitových solárních článků (PSC). Hlavní funkce zastávají v elektronových transportních vrstvách (ETL) a děrových transportních vrstvách (HTL).

HTL (ETL) hrají zásadní roli při extrakci a transportu fotoexcitovaných děr (elektronů) a při určování konečné účinnosti perovskitových solárních článků (PSCs). Kromě dostatečné pohyblivosti děr a vynikající tepelné a fotochemické stability musí mít TMO používané v PSC valenční pásma kompatibilní s valenčním pásmem perovskitu, což umožňuje efektivní přenos náboje. [27]

### 1.6.1 Oxid zinečnatý

Oxid zinečnatý (ZnO) se používá jako vrstva pro transport elektronů (ETL) v perovskitových solárních článcích díky své vysoké pohyblivosti elektronů a dobré kompatibilitě s perovskitovým materiálem. ZnO zlepšuje účinnost zařízení tím, že efektivně přenáší elektrony z perovskitové vrstvy na katodu a

zároveň blokuje díry, čímž snižuje rekombinaci nosičů náboje. Jeho široký zakázaný pás zajišťuje průhlednost, což umožňuje lepší absorpci světla v aktivní vrstvě a zvyšuje výkon solárních článků.[28]

### 1.6.2 Oxid molybdenový

Oxid molybdenový ( $\text{MoO}_3$ ) se široce používá jako vrstva pro transport děr (HTL) v perovskitových solárních článcích. Usnadňuje efektivní extrakci děr z perovskitové vrstvy na anodu. Jeho široký zakázaný pás zajišťuje průhlednost, což přispívá k lepší absorpci světla v aktivní vrstvě. Kromě toho  $\text{MoO}_3$  zvyšuje stabilitu perovskitových solárních článků tím, že chrání perovskitový materiál před degradací vlivem prostředí, což vede ke zlepšení výkonu a životnosti zařízení. Nicméně existují i studie, ve kterých  $\text{MoO}_3$  zastává roli ETL. O totéž bude snaha v praktické části této práce. [29] [30]

## 1.7 Transparentní vodivé oxidy

Transparentní vodivé oxidy (TCO) jsou typicky polovodiče založené na oxidech kovů, charakterizované velkou šířkou zakázaného pásu. Jejich hlavním úkolem je odvádět nerovnovážné nosiče elektrického náboje, které vznikají při přeměně sluneční energie na elektrickou energii, do vnějšího obvodu. Nejdůležitějším parametrem je difuzní délka minoritních nosičů elektrického náboje, která by měla být co největší. To minimalizuje nežádoucí rekombinace nábojů s opačně nabitými náboji dříve, než dosáhnou P nebo N vrstvy. Aby mohly tuto funkci správně plnit, musí TCO splňovat nároky na elektrické, optické a strukturální vlastnosti, jako je vysoká pohyblivost a koncentrace nosičů, nízká elektrická rezistivita, nízký povrchový odpor, nižší index lomu a vhodné tvarování povrchu.[31]

### 1.7.1 Oxid india a cínu (ITO)

Cínem dopovaný oxid inditý (ITO) je nejpoužívanější TCO díky své elektrické vodivosti a optické průhlednosti. Obvykle se skládá z 90% oxidu inditého ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) a 10% oxidu ciničitého ( $\text{SnO}_2$ ) a jako tenká vrstva je průhledný a bezbarvý, zatímco v objemové podobě je žlutošedý.

Nicméně, kvůli vzácnosti india a jeho vysoké ceně se výzkum zaměřuje na nalezení alternativních materiálů, které by mohly ITO nahradit. Jedním z nejslibnějších kandidátů je oxid zinečnatý dopovaný hliníkem ( $\text{ZnO:Al}$ ), který má vlastnosti blízké ITO. [32]

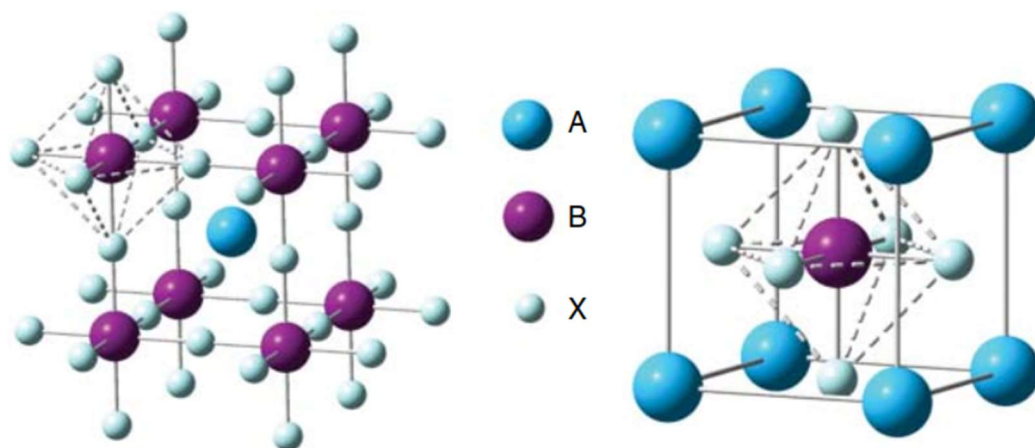
## 1.8 Perovskitové materiály

Perovskitové materiály obecně mají krystalickou strukturu shodnou s oxidem vápenato-titaničitým, což je přírodní perovskit s chemickým vzorcem  $\text{CaTiO}_3$ . Mají zásadní vlastnosti, které z nich dělají ideální sloučeniny pro výrobu fotovoltaických článků, jako jsou výborné opticko-elektrické vlastnosti. Zejména nízká excitační energie, která je výhodná pro získávání energie i při slabším slunečním záření. Také mají vysoký absorpční koeficient, což vede k účinnému vstřebávání sluneční energie. [20] [25]

Obecná struktura perovskitu je  $ABX_3$ , kde:

- A – představuje velký vnitřní kation (např.  $CH_3NH_3^+$ ,  $HN=CHNH_3^+$ ,  $Cs^+$ )
- B – malý kation, který je součástí krystalové mřížky (např.  $Pb_2^+$ ,  $Sn_2^+$ )
- X – halogenidový anion ( $I^-$ ,  $Br^-$ ,  $Cl^-$ )

(viz. Obrázek 17) [25]



Obrázek 15 - obecná struktura perovskitových materiálů, [33]

#### 1.8.1 Výhody perovskitových materiálů

Perovskitové materiály nabízejí řadu výhod, které je činí atraktivními pro využití ve fotovoltaických aplikacích. Jednou z klíčových výhod je snadná, časově nenáročná a relativně levná příprava. Jedním z hlavních způsobů přípravy perovskitů je spin coating, což je technika rotačního nanášení, při které je materiál aplikován na substrát za použití vysokých rychlostí rotace. (viz. Kap. 1.10.3)

Další velkou výhodou perovskitů je možnost ladit šířku zakázaného pásu prostřednictvím změny složení (konkrétně výměnou halogenidových aniontů a to v rozmezí 1,5 – 2,3 eV (830 - 540 nm)). Tato variabilita umožňuje optimalizaci absorpčního spektra perovskitových materiálů pro různé aplikace, což zvyšuje jejich univerzálnost a široké spektrum možných použití. [25]

Další perspektivou je spojení perovskitových solárních článků s křemíkovými články v tzv. tandemových strukturách. (viz. Kap. 1.4.3.2)

#### 1.8.2 Problémy perovskitových materiálů

Obsah toxického olova představuje potenciální riziko uvolnění do životního prostředí, jak při výrobě, tak při likvidaci článků. Existují úvahy o nahrazení olova cínem, ale zatím se nepodařilo dosáhnout stejné účinnosti jako u olovnatých variant. Dalším problémem je nestabilita těchto článků. Jsou velmi citlivé na přítomnost vody, světla a vysokých teplot. Dochází k nevratné degradaci, což vede ke velkému snížení jejich účinnosti. Tuto degradaci je možné pozorovat pouhým okem, například ve formě zežloutnutí, které je způsobeno vznikem jodidu olovnatého. Moderní články však mohou být chráněny před vnějšími vlivy pomocí vhodného zapouzdření a přidáním filtru UV záření. [25]

## 1.9 Tenké vrstvy

Tenké vrstvy jsou definované především svou charakteristickou tloušťkou, která se pohybuje v řádech nanometrů. Tím omezuje pohyb elektronů nejen fonon-elektronovou interakcí, ale i odrazy od povrchu vrstvy. [34]

Stádia růstu tenkých vrstev [34]:

1. Nukleace - Atomy nanášeného materiálu vytvářejí shluky (nuklea) v místech energetických minim podložky
2. Zárodek roste do té doby, než se jeho vnitřní energie nevyrovná s povrchovou energií. V tento moment dosáhne tzv. Kritické velikosti a jeho růst se zastaví.
3. Koalescence - slévání zárodků
4. Tvoření tzv. Síťové struktury – slévání ostrůvků nanášeného materiálu, které vznikly jako následek koalescence
5. Souvislá vrstva – při dalším nanešení materiálu se vytvoří souvislá vrstva

## 1.10 Tenkovrstvé technologie

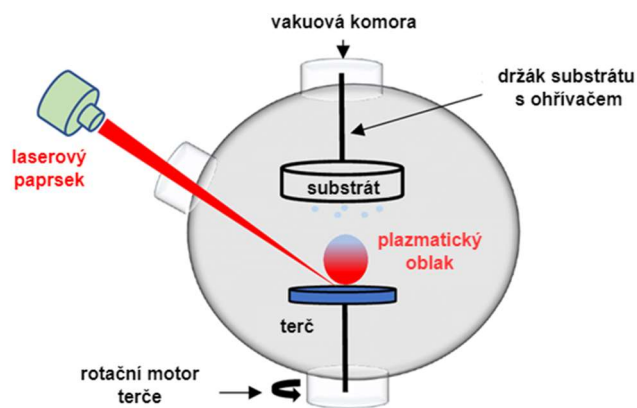
Existují dva základní druhy tenkovrstvých technologií, PVD a CVD. Chemická depozice par (Chemical Vapour Deposition, CVD) je proces, při němž se využívá odpařování v důsledku chemických reakcí. Substrát je vystaven účinkům prekurzorů, které na jeho povrchu chemicky reagují a vytvářejí požadovanou vrstvu.

Metody fyzikální depozice par (Physical Vapour Deposition, PVD) spočívají v převedení materiálu z pevné fáze do plynné, ve které jsou poté nanášeny na povrch substrátu. Tyto metody se dále dělí na napařovací a napařovací. Obě se uskutečňují za vysokého vakua, aby se zvětšila střední volná dráha látek nanášeného materiálu a tím se zamezilo výskytu nežádoucích látek, které by mohly mít vliv na složení tenké vrstvy. Pro upřesnění jsou dále popsány čtyři konkrétní metody, které byly použity k výrobě vrstev v praktické části. [35]

### 1.10.1 Pulzní laserová depozice (PLD)

Pulzní laserová depozice je technika napařování, která pracuje na principu ohřevu materiálu až do přeměny do plynné fáze. Využívá vysokoenergetické laserové pulzy k vypařování pevného materiálu z terče. Po dopadu laserového paprsku na materiál se zvyšuje kinetická energie molekul materiálu v terči, ten se změní v plazmatický oblak, který poté směřuje k substrátu a na něm kondenzuje a vytváří tenkou vrstvu. Tento proces běžně probíhá v uzavřené komoře s vysokým vakuem pod inertní nebo kyslíkovou atmosférou, což umožňuje vytváření precizních tenkých vrstev materiálu s přesně definovanými vlastnostmi (Obrázky 18 a 19). [36]





Obrázek 17 - princip metody PLD, [30]

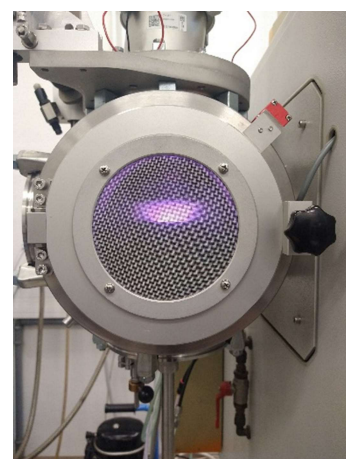


Obrázek 16 - PLD v laboratoři ČVUT FEL

### 1.10.2 Magnetronové naprašování

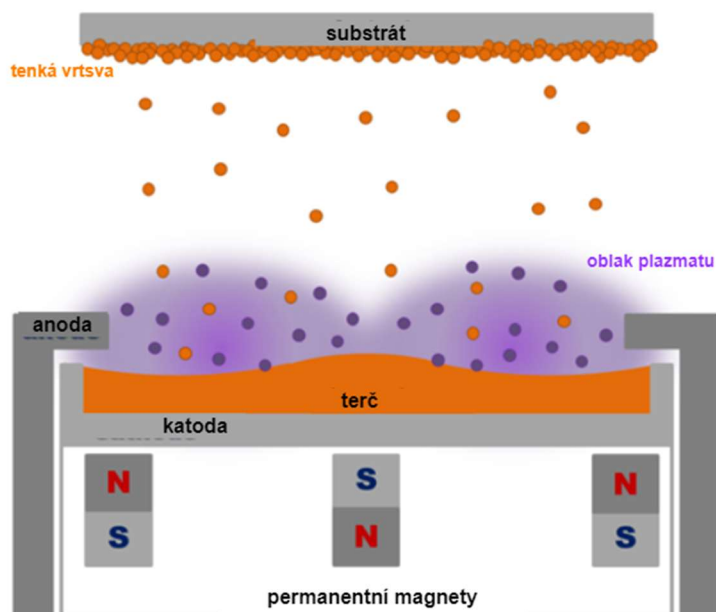
Naprašování je široce používaná metoda fyzikální depozice par (PVD) pro tvorbu vrstev. Je to technika založená na iontovém bombardování. Do vakuové komory je načerpán inertní plyn, nejčastěji argon ( $Ar^+$ , protože je cenově dostupný).

Deponovaný materiál je umístěn na katodě a nazývá se terč. Na elektrody je přiloženo dostatečně velké napětí, což vede k ionizaci inertního plynu a zapálení světelného výboje (fialová záře na obrázku). Pod katodou je umístěna sada trvalých magnetů, tím se vytvoří elektromagnetické pole, které přispívá k vysokému stupni ionizace plynu a tím i k hustému plazmatu.



Obrázek 18 – Magnetronová naprašovačka v laboratoři ČVUT FEL

Ionty jsou urychlovány směrem k terči a pokud mají dostatečně velkou energii, uvolňují materiál z terče, který vytváří na substrátu nad terčem tenkou vrstvu (Obrázek 21). Naprašování pomocí magnetronu tak nabízí možnost dobře deponovat tenké vrstvy téměř jakéhokoliv materiálu. [35]



Obrázek 19 - popis metody magnetronového naprašování, [30]

### 1.10.3 Metoda rotačního nanášení

Při rotačním nanášení se pomocí vhodných otáček odstraňuje nadbytečný roztok, což umožňuje dosáhnout požadované tloušťky vrstvy.

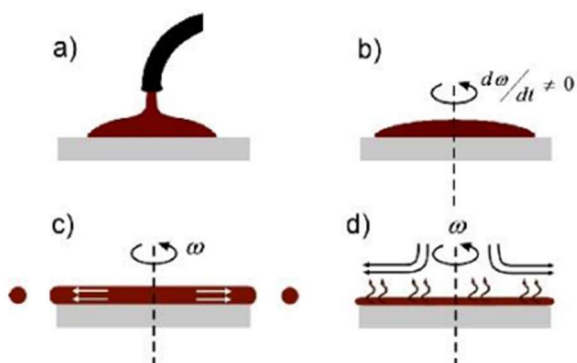
Proces rotačního nanášení (Obrázek 22) lze rozdělit do čtyř fází: Nejprve se pryskyřičná kapalina aplikuje na povrch substrátu, buď staticky s vytvořením malé kapky kapaliny uprostřed substrátu, nebo dynamicky při otáčení substrátu při nízké rychlosti. (a) Následuje fáze zrychlení substrátu, během které dochází k rychlému vytlačení kapaliny z povrchu podložky rotací. (b) Poté následuje fáze rotace substrátu při konstantní rychlosti, kde díky viskózním silám kapaliny dochází k jejímu zhušťování. (c) Poslední fází je opět fáze rotace substrátu při konstantní rychlosti, kde vypařování rozpouštědla ovlivňuje chování zhušťování nátěru. (d)

Pro optimalizaci krystalizačního procesu se během rotace přikapává trocha toluenu nebo chlorbenzenu. Po zastavení rotace mnoho aplikací vyžaduje tepelné ošetření nebo "vypálení" nátěru. Změna zbarvení (ztmavnutí vzorku) indikuje vznik perovskitu.

Jakákoli změna depozičních parametrů (poměr výchozích látek, doba kapání, viskozita roztoku, rychlost otáčení a teplota při zahřívání) ovlivňuje kvalitu vznikajícího perovskitového filmu, včetně velikosti zrn a dalších vlastností.

Celý proces přípravy se typicky provádí pod ochrannou atmosférou dusíku v tzv. gloveboxu (Obrázek 23), což minimalizuje množství kyslíku a vzdušné vlhkosti, na které jsou perovskity velmi citlivé. [25], [37]

*A theoretical study on spin coating technique*



Obrázek 21 - 4 fáze metody rotačního nanášení, [29]



Obrázek 20 - Glovebox v laboratoři ČVUT FEL, vlastní

#### 1.10.4 Napařovačka

Napařovačka funguje na principu odpaření materiálu z rozžhaveného odpařovacího zdroje, který je zahříván průchodem proudu. Odpařený materiál následně kondenzuje na substrátu a vytváří tenkou vrstvu. Tyto odpařovací zdroje musí být vyrobeny z elektricky vodivých materiálů, často z kovů s vysokou teplotou tavení, jako jsou wolfram (W), molybden (Mo) nebo tantal (Ta).

Tyto kovy se používají ve formě planžet, které se buď lisují, nebo se vhodným nastřížením a ohýbáním vytvářejí lodičky. Často se také používají jako dráty, které se stáčí do spirály.



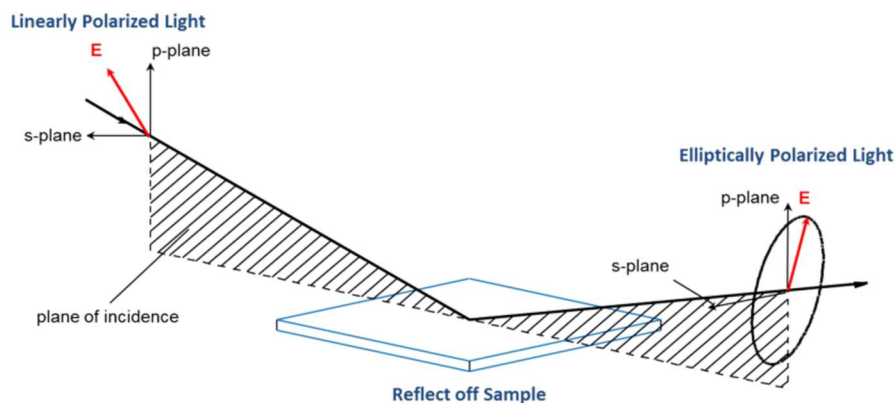
Obrázek 22 - Napařovačka v laboratoři ČVUT FEL

Výběr materiálu pro odpařovací zdroj závisí na typu odpařovaného materiálu. Musí být splněny dvě základní podmínky: materiál odpařovacího zdroje se nesmí rozpouštět v odpařovaném materiálu, aby nedošlo ke kontaminaci vytvářené vrstvy, a odpařovaný materiál nesmí tvořit s materiálem odpařovacího zdroje intermetalickou slitinu, která by výrazně zkrátila životnost zdroje. [38]

## 1.11 Způsoby měření vlastností vrstev

### 1.11.1 Elipsometrie

Elipsometrie měří změnu polarizace světla, které se odráží nebo prochází materiálovou strukturou. Změna polarizace je vyjádřena poměrem amplitudy  $\Psi$  a fázovým rozdílem  $\Delta$ . Naměřená odezva závisí na optických vlastnostech a tloušťce jednotlivých materiálů. Proto se elipsometrie primárně používá k určení tloušťky vrstvy a optických konstant. [38]



Obrázek 23 - princip elipsometrie, [38]

Pro popis optických vlastností se používá komplexní index lomu, jehož reálná složka  $n$  je index lomu a  $k$  koeficient extinkce:

$$\tilde{n} = n + ik$$

Index lomu ( $n$ ) popisuje kolikrát se světlo pohybuje rychleji ve vakuu ( $c$ ) než v měřeném materiálu ( $v$ ).

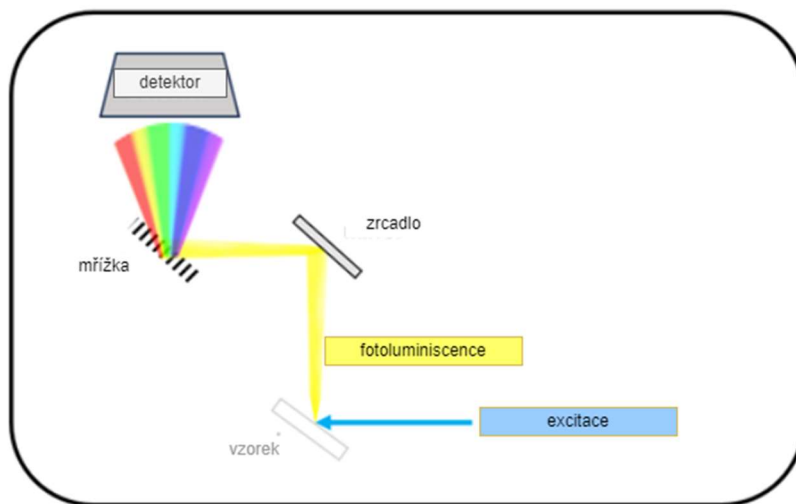
$$n = \frac{c}{v}$$

Světlo zpomaluje při vstupu do materiálu s vyšším indexem. Frekvence světelných vln zůstává konstantní, ale délka vlny se zkrátí. Koeficient extinkce  $k$  popisuje ztrátu energie vlny do materiálu. Pro popis této vlastnosti se používá absorpční koeficient  $\alpha$ , který je přímo úměrný koeficientu extinkce  $k$  a nepřímo úměrný vlnové délce  $\lambda$  podle následujícího vztahu:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

### 1.11.2 Fotoluminiscenční spektroskopie

Fotoluminiscenční spektroskopie je metoda měření světelné emise, která vzniká při fotoexcitaci. Když na vzorek dopadne světlo, elektrony v materiálu se dostanou do vyšších energetických stavů (excitace). Když se pak vrátí zpět do svých původních stavů, uvolní energii ve formě světla (relaxace). Ve fotoluminiscenční spektroskopii se pomocí optického spektrometru měří intenzita emitovaného světla v závislosti na vlnové délce. [39]

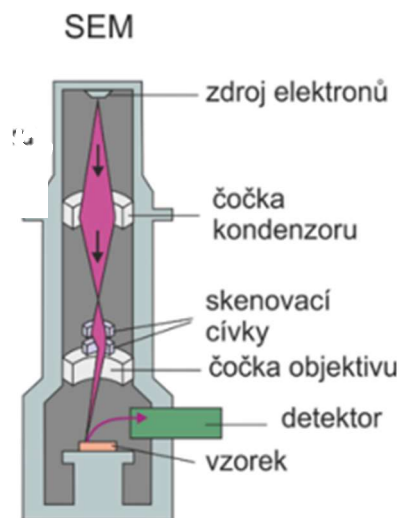


Obrázek 24 - princip fotoluminiscence, [39]

### 1.11.3 Elektronový mikroskop

Urychlené elektrony ve vakuu se chovají podobně jako světlo. Mohou se šířit rovnoměrně a přímočaře a platí pro ně zákony optiky. Jejich pohyb navíc lze řídit pomocí elektrického a magnetického pole. Podle de Broglieho hypotézy lze každé volně pohybující se částici přiřadit vlnovou délku, kterou lze regulovat vložím urychlujícího napětí (pohybuje se v rozmezí 0,5 – 30 kV).

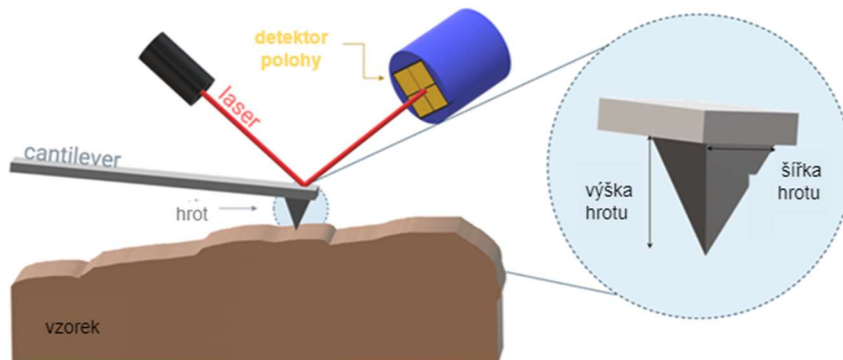
Skenovací elektronový mikroskop (SEM) funguje na principu podobném světelnému mikroskopu, ale s několika rozdíly. Namísto světelného paprsku se využívá úzký svazek elektronů, který je elektromagnetickými cívkami bodově zaostřen na vzorek. Tento svazek je následně skenuje (rastruje) povrch vzorku pomocí skenovacích cívek, které postupně řádek po řádku zaznamenávají výsledky interakce elektronů s povrchem. Elektrony nepronikají vzorkem, ale interagují s jeho povrchem. Výsledky těchto interakcí jsou zachyceny pomocí detektoru (Obrázek 27). [40]



Obrázek 25 - Řez elektronovým mikroskopem, [29]

#### 1.11.4 Atomární silová mikroskopie (AFM)

Atomární silová mikroskopie (AFM) je jedna z nejdokladnějších diagnostických metod používaných pro mikro a nanoměření topografie a různých fyzikálních vlastností povrchu. Při této metodě dochází k interakci hrotu, nazývaného také cantilever, se vzorkem. Během skenování špička hrotu přechází přes povrch vzorku, přičemž variace výšky vzorku způsobují ohyb cantileveru. Tento ohyb, neboli změna odchylky kantileveru, je detekován pohybem laseru nebo superluminiscenční diody (SLD), který je odražen od kantileveru do polohově citlivého fotodetektoru (PSPD) (Obrázek 28). [41], [42]

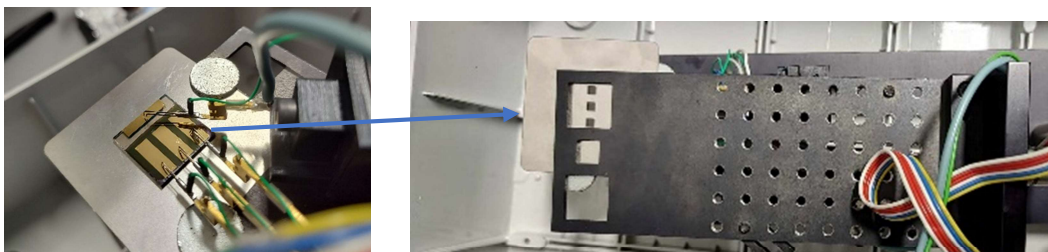


Obrázek 26 - popis AFM, [41]

#### 1.11.5 Měření V-A charakteristiky

Použití aparatura pro měření V-A charakteristiky je složena z několika klíčových komponent. Základem je kontinuální LED solární simulátor Wavelabs typ LS2, který se snaží co nejvěrněji napodobit solární spektrum AM 1,5. Tento simulátor patří do třídy AAA, což znamená, že splňuje vysoké standardy v oblasti spektrálního obsahu, prostorové uniformity a časové stability.

Pro měření se používá měřicí zdroj Keithley 2400, který je spojen s 4-bodovou kontaktovací stanicí, což zajišťuje přesné a spolehlivé kontaktní měření. Celý systém je automaticky ovládán softwarem LabVIEW, který umožňuje snadné a efektivní řízení měření a sběr dat.



Obrázek 27 - 4-bodová kontaktovací stanice v laboratoři ČVUT FEL

## 2 Praktická část

Hlavním cílem praktické části této bakalářské práce je porovnat elektronově vodivou vrstvu (ETL), která je jako jediná proměnná, u 8 různých vytvořených článků architektury n-i-p. Tato vrstva byla tvořena pomocí dvou metod, na oxid zinečnatý bylo využito magnetronové naprašovačky a oxid molybdenový byl nanesen pomocí pulzně laserové depozice. Dalším z cílů je porovnat celé perovskitové články určitými druhy měření.

Pro přehlednost je v následujícím odstavci postup výroby článků popsán v bodech.

### 2.1 Postup při tvorbě článků

1. Substrát – sklo s vrstvou průmyslově naneseného ITO  
(cínem dopovaný oxid inditý)



2. ETL – elektronově vodivá vrstva

- a. Oxid zinečnatý (ZnO)

- i. depozice pomocí magnetronové naprašovačky
- ii. vytvořené 4 vzorky při různých podmínkách depozice (energie a čas, viz. Tabulka 1)



- b. Oxid molybdenový (MnO<sub>3</sub>)

- i. Depozice pomocí PLD
- ii. Vytvořené 4 vzorky při různých podmínkách depozice (frekvence, počet pulzů, viz. tabulka )

3. Perovskit + HTL (děrově vodivá vrstva) – celá příprava probíhá v gloveboxu po dobu dvou dní

- a. 1.den

- i. Příprava roztoku perovskitu  
(Cs<sub>0.17</sub>FA<sub>0.83</sub>Pb(I<sub>0.6</sub>Br<sub>0.4</sub>)<sub>3</sub>)
- ii. Příprava Spiro-OMeTAD roztoku

- b. 2.den

- i. Filtrace roztoku perovskitu (přes filtr s velikostí pórů 0,2 um)
- ii. Čištění vzorků UV-ozonem
- iii. Depozice perovskitové vrstvy – pomocí metody rotačního nanášení



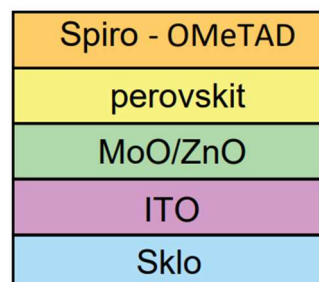
1. Na vzorek nanese 100 ul roztoku perovskitu rychlostí 100 rpm po dobu 10s

2. Poté plynulý přechod na rychlost 4000 rpm po dobu 30s
3. Po 25. s rotace bylo do středu vzorku aplikováno 150 ul chlorbenzenu
4. Po ukončení rotace byl vzorek 30 minut žíhán
5. Poté nechány vychladnout po dobu 20 minut



iv. Depozice HTL

1. Roztok Spiro-OMeTAD protřepán
2. Naneseno 75 ul roztoku
3. Přebytek odstraněn také pomocí metody rotačního nanášení (4000 rpm po dobu 30 s)



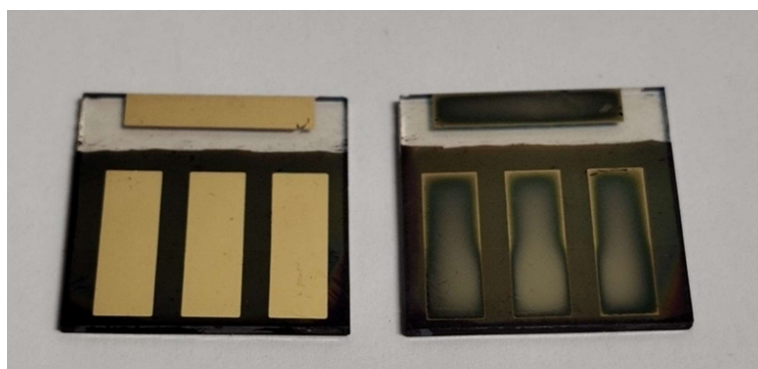
- c. Vzorky vyndány z gloveboxu a vloženy do vzduchotěsné dózy se silikagelem do tmy, aby přes noc dooxidovaly

4. Kontakty

- a. Tvorba kontaktů odstraněním části vrstev až na ITO
- b. Vytvoření zlatých kontaktů napařováním



Při depozici kontaktů se u čtyř vzorků zahřála moc napařovací komora a kontakty takto zčernaly. Tato chyba má bohužel za následek velké odchylky v měření (Obrázek 30).



Obrázek 29 - deponované kontakty, vlevo správně nadeponován, vpravo poničený zčernalý kontakt



## 2.2 Elektronově vodivá vrstva a její vlastnosti

Transportní vrstva elektronů (ETL) je zásadní pro efektivní extrakci a transport fotogenerovaných elektronů v perovskitových solárních článcích. Její hrubost vůči tloušťce vrstvy by měla být co nejmenší, ideálně v rozmezí 5–20 nm, aby se minimalizovaly ztráty způsobené rekombinací a zlepšila se celková účinnost zařízení.

### 2.2.1 Vrstvy z oxidu zinečnatého

Vrstvy z oxidu zinečnatého (ZnO) byly tvořené pomocí magnetronové naprašovačky (viz. Kap. 1.10.2). Při každé depozici se cíleně měnily její podmínky, a to konkrétně energie a čas depozice podle tabulky 1 níže.

V tabulce 1 se také nachází hodnoty tloušťky a hrubosti naměřené elipsometrem.

vzorek č.	energie [W]	čas [min]	tloušťka [nm]	hrubost [nm]	jméno vzorku 2x2
1	20	2:15	13,29 ± 4	10,69 ± 4	TZ1
2	30	2	14,48 ± 1	15,48 ± 2	TZ2
3	20	1:30	11,24 ± 4	12,23 ± 7	TZ3
4	10	4:00	X	X	TZ4

Tabulka 1

Při výkonu 10 W se žádná vrstva nenanese, a to ani při čtyřminutové depozici, protože výkon je příliš nízký.

Z tabulky 1 je vidět, že hrubost všech vrstev je téměř stejně velká jako jejich tloušťka, což není žádoucí. Magnetronové naprašování tudíž není ideální depoziční metodou pro tyto vrstvy.

### 2.2.2 Vrstvy z oxidu molybdenového

Vrstvy z oxidu molybdenu byly nanášené pomocí PLD (viz. Kap. 1.10.1). Při depozičních byla měněna frekvence a teplota podle následující tabulky 2, ve které čísla určují číslo vytvářeného vzorku.

Počet pulzů laseru byl 5000 a byl u všech depozic stejný.

Č. vzorku		T [°C]		
		25	100	500
f [Hz]	5	1	4	6
	25	2		
	50	3	5	7

Tabulka 2

Tloušťka a hrubost jednotlivých vzorků měřeným pomocí elipsometru jsou níže uvedené v tabulce 3 :

vzorek č.	tloušťka [nm]	hrubost [nm]
1	43,1	11,9
2	45,6	11,7
3	45,85	13,4
4	29,6	9,48
5	28,1	10,6

Tabulka 3

Vzorky 6 a 7 se bohužel nepodařilo změřit na elipsometru. Důvodem je jejich krystalická struktura, což potvrdila měření na elektronovém mikroskopu (viz. Kap. 1.11.3). Modely používané na elipsometru v laboratoři ČVUT FEL jsou navrženy pro amorfní materiály, a proto se nepovedlo najít model, který by odpovídal těmto krystalickým strukturám.

Pro molybdenové vzorky už je hrubost ku tloušťce značně menší, což je nejspíše způsobeno použitím jiné formy depozice (PLD).

Počet pulzů byl snížen na jednu pětinu (až třetinu), protože bylo cíleno na cca 3×-5× menší tloušťku než byla dosažena ve zkušebních vzorcích výše.

Pro velké vzorky 2cm ×2 cm, z kterých se tvořily výsledné články, byla vybrána teplota 25°C a měněna byla pouze frekvence a počet pulzů, zaznamenáno v tabulce 4 níže.

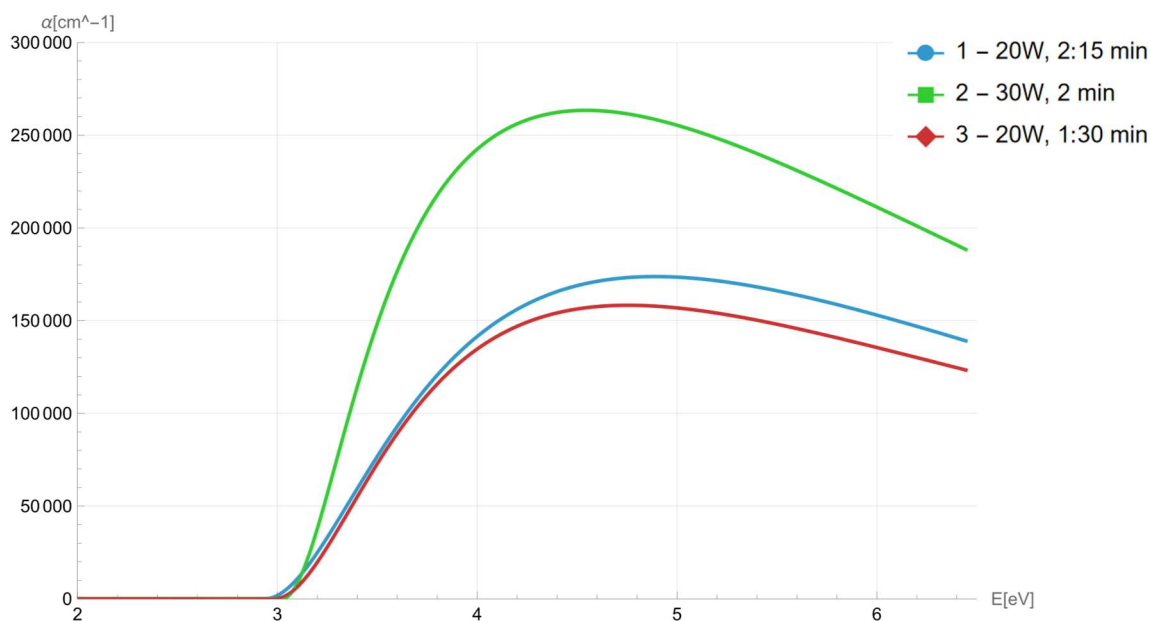
		počet pulzů	
		1000	1500
f [Hz]	5	TM1	TM3
	50	TM2	TM4

Tabulka 4

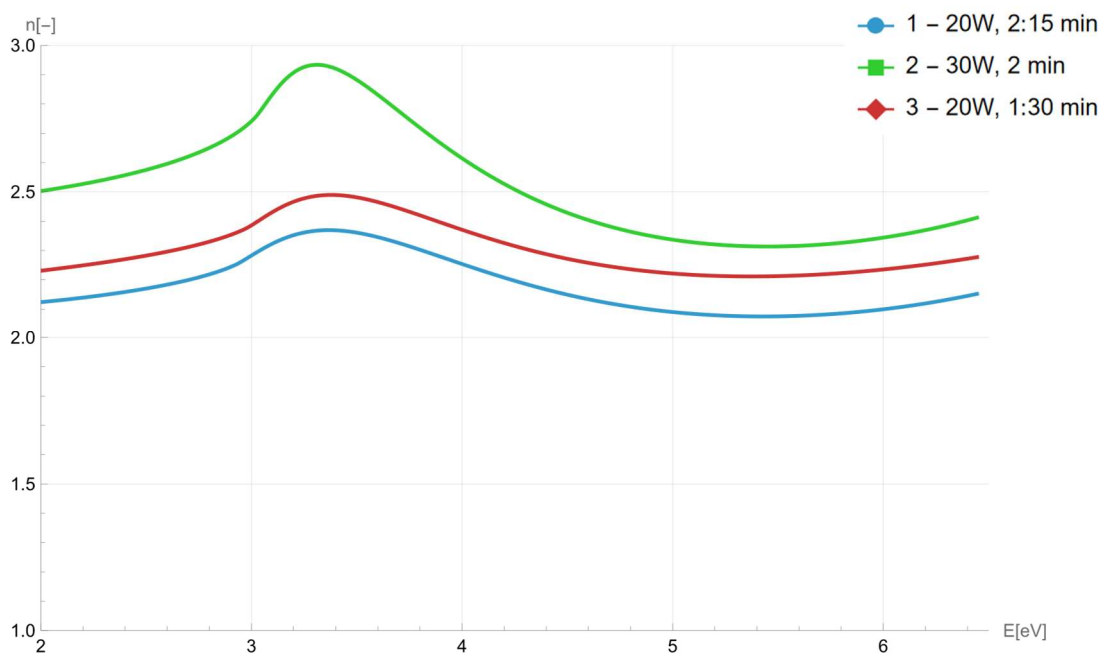
## 2.2.3 Naměřené optické vlastnosti ETL vrstev

### 2.2.3.1 Zinkoxidové vrstvy měřené na elipsometru

Graf 1 - Závislost absorpčního koeficientu na energii



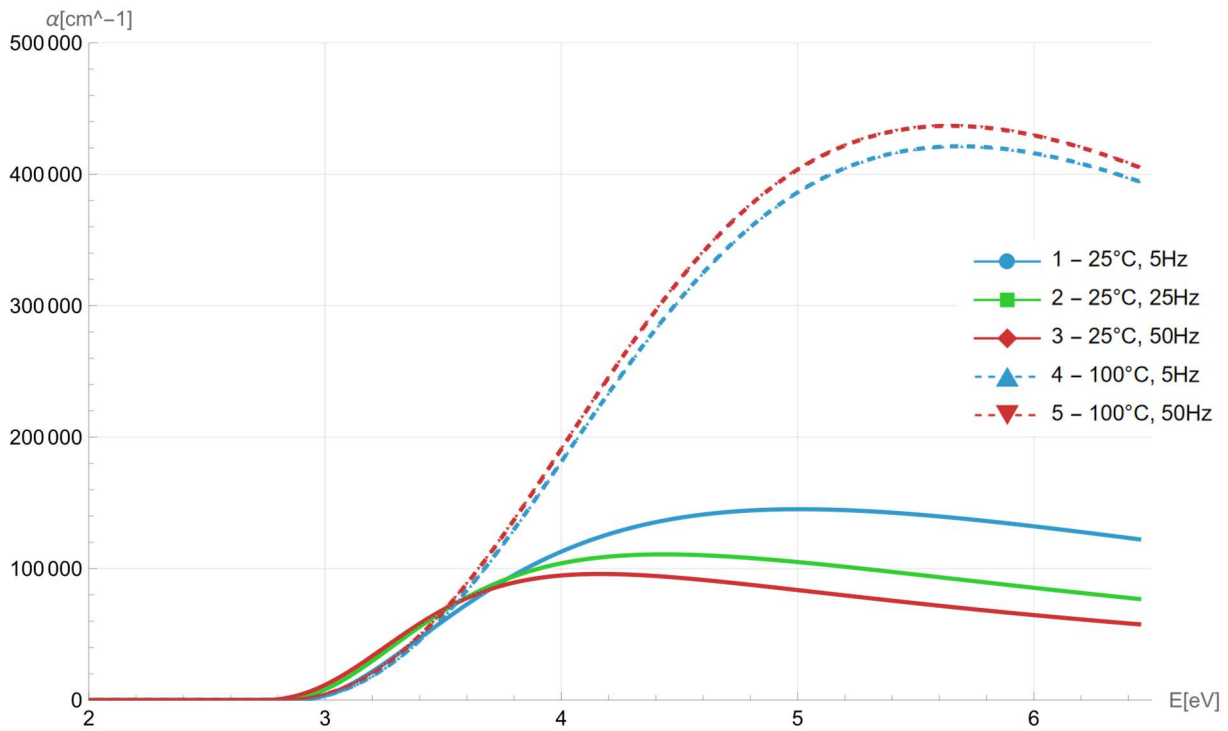
Graf 2 - Závislost indexu lomu na energii



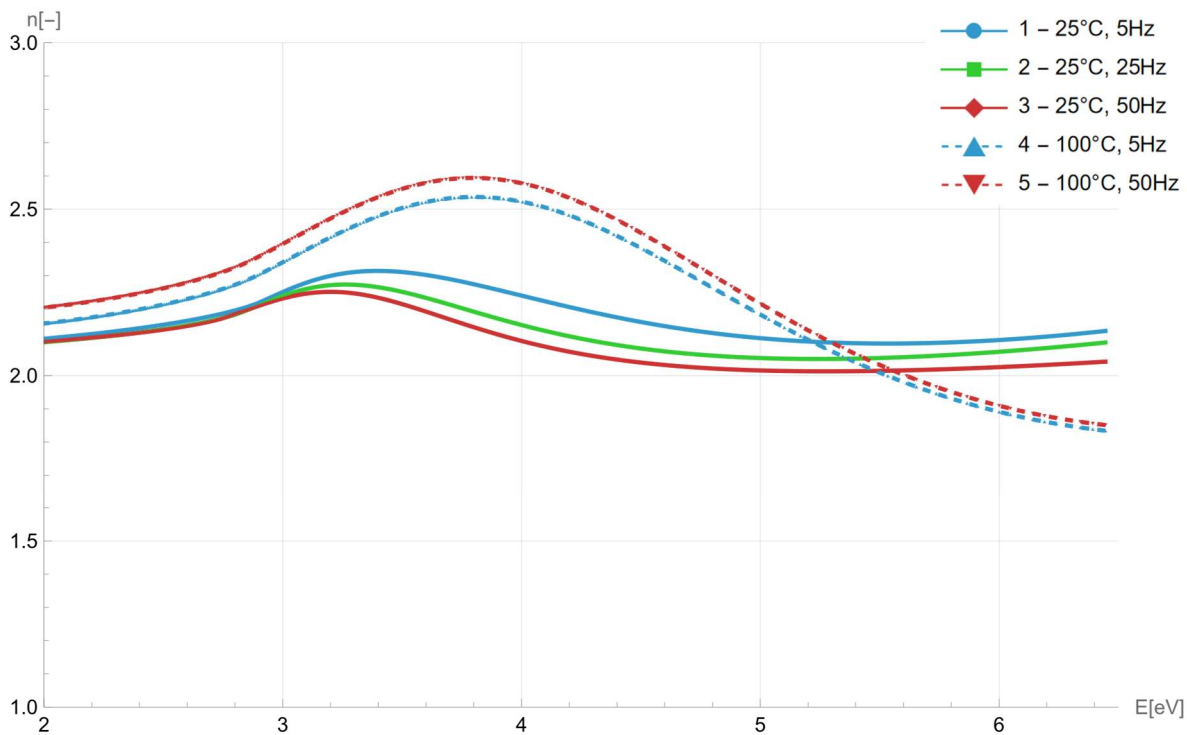
Vzorků není dostatek, aby mohla být určena jasná závislost. Ale z grafů 1 a 2 je vidět, že vzorek vytvořený při největším výkonu má největší absorpční koeficient i index lomu. U druhých dvou vzorků je energie při naprašování stejná, ale čas jiný a jejich vlastnosti jsou podobné.

### 2.2.3.3 Molybdenové vrstvy měřené na elipsometru

Graf 3 - Závislost absorpčního koeficientu na energii



Graf 4 - Závislost indexu lomu na energii



V grafech 3 a 4 jsou viditelné rozdíly pro odlišné teploty při depozici, kdy pro vyšší teploty dosahují hodnoty absorpčního koeficientu i indexu lomu značně vyšších hodnot. Co se týče frekvence, tak u

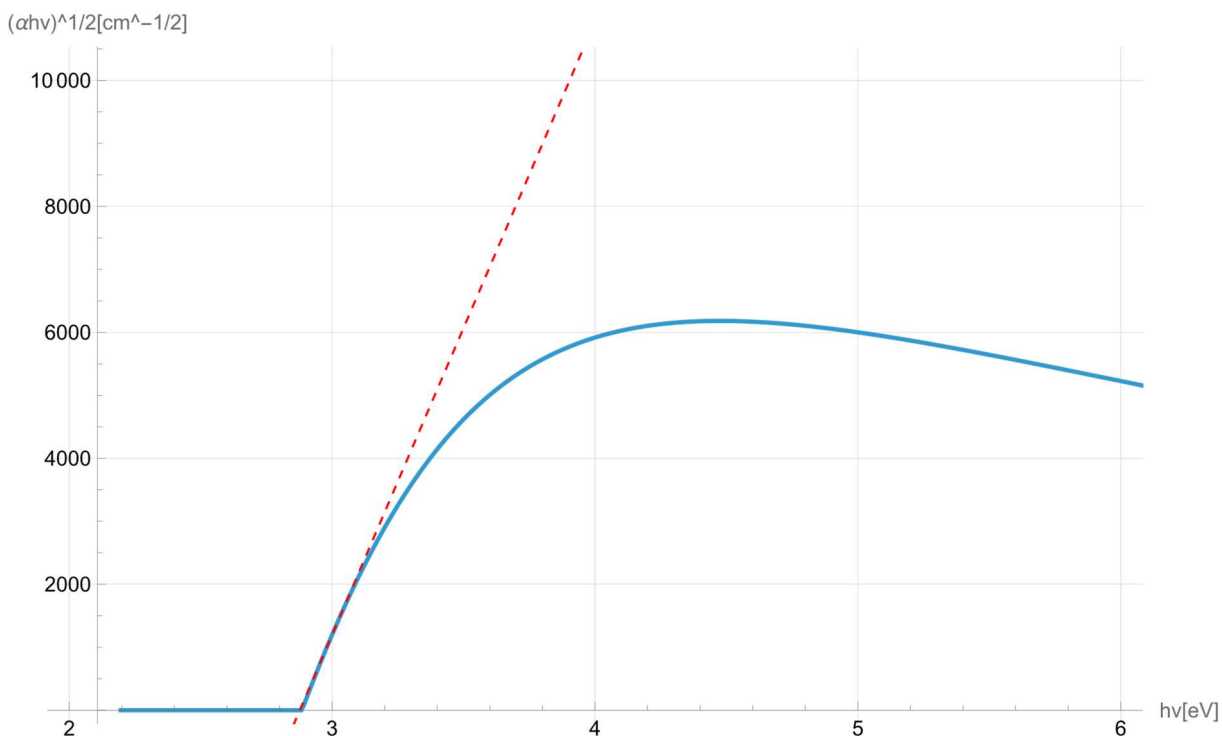
pokožkové teploty se projevuje nepřímá úměra, tudíž čím menší frekvence tím větší hodnoty, naopak u 100°C tato závislost neopovídá, ale hodnoty při obou frekvencích (5Hz i 50 Hz) jsou velmi podobné.

#### 2.2.4 Výpočet šířky zakázaného pásu pomocí Taucovi metody

Pro určení šířky zakázaného pásu byla použita Taucova metoda. Níže (Graf 5) je příklad u molybdenového vzorku č.1.

Pro přehlednost této práce jsou zbylé grafy v kapitole Přílohy.

Graf 5 - Taucova metoda pro vzorek M1



Tabulka 5: šířek zakázaných pásů:

oxid zinečnatý		oxid molybdenový	
č.vzorku	šířka zakázaného pásu [eV]	č.vzorku	šířka zakázaného pásu [eV]
Z1 - 20W, 2:15 min	2,93	M1 - 25°C, 5Hz	2,88
Z2 - 30W, 2 min	3,02	M2 - 25°C, 25Hz	2,8
Z3 - 20W, 1:30 min	2,98	M3 - 25°C, 50Hz	2,73
Z4 - 10W, 4:00 min	X	M4 - 100°C, 5Hz	2,85
		M5 - 100°C, 50Hz	2,83

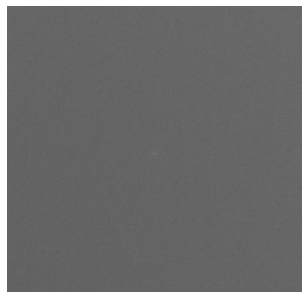
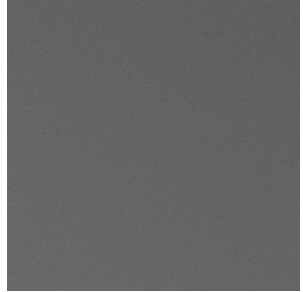
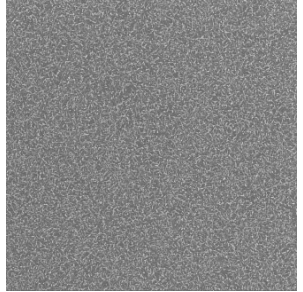
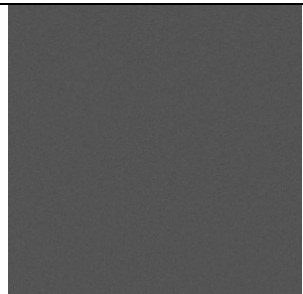
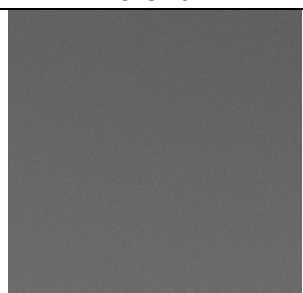
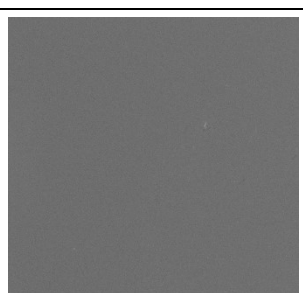
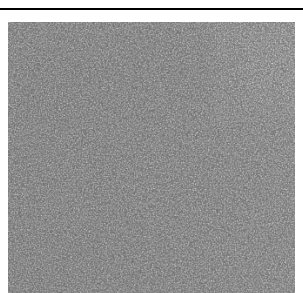
Tabulka 5

U zinkových vzorků dosahuje největší šířky zakázaného pásu vzorek deponovaný při největším výkonu.

U molybdenových vzorků lze vidět snížení šířky zakázaného pásu se zvyšující se frekvencí, pro různé teploty se hodnoty zakázaného pásu výrazně nemění.

### 2.2.5 Molybdenové vrstvy pod elektronovým mikroskopem

Zvětšení: 20 000x

Č. vzorku		T [°C]		
		25	100	500
f [Hz]	5	 Vzorek č. 1	 Vzorek č. 4	 Vzorek č. 6
	25	 Vzorek č. 2		
	50	 Vzorek č. 3	 Vzorek č. 5	 Vzorek č. 7

Tabulka 6

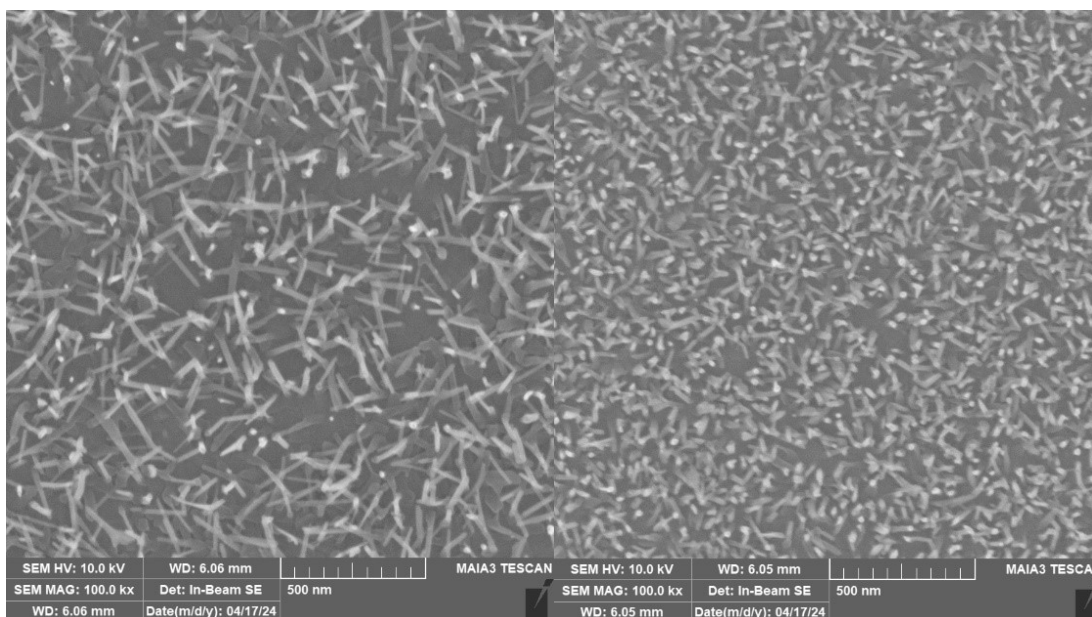
4 um

Jak je vidět z tabulky 6, vzorky 1 až 5 mají viditelně amorfní strukturu. U vzorků 6, 7 je vidět krystalická struktura. Byly dělané při teplotě 500 °C. Vzorek č. 6 při frekvenci 5 Hz a vzorek č. 7 při 50 Hz.

Zvětšení: 100 000x

Vzorek č. 6

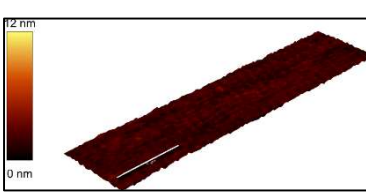
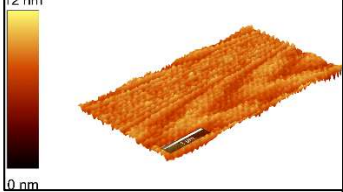
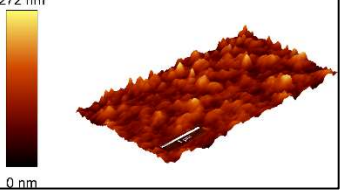
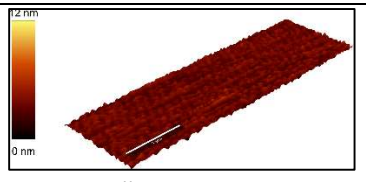
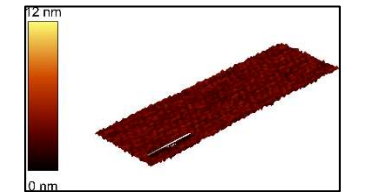
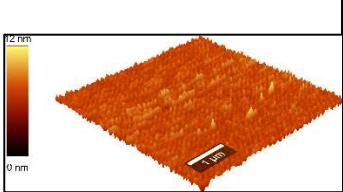
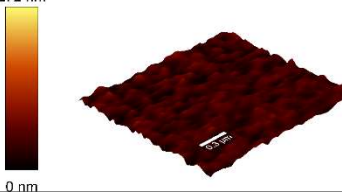
Vzorek č. 7



U vzorku č. 6 deponovaném při nižší frekvenci je vidět méně zárodečných struktur, za to jejich růst dosahuje větší velikosti. U vzorku č. 7 je vidět značně více zárodečných struktur, které dosahují menších velikostí.

### 2.2.6 Molybdenové vrstvy pod AFM mikroskopem

V následující tabulce 7 jsou naměřené hodnoty hrubosti molybdenových vrstev pod AFM. Lze vidět závislost, že se zvyšující se teplotou roste hrubost vzorku, velký skok je vidět u krystalických vrstev deponovaných při 500°C.

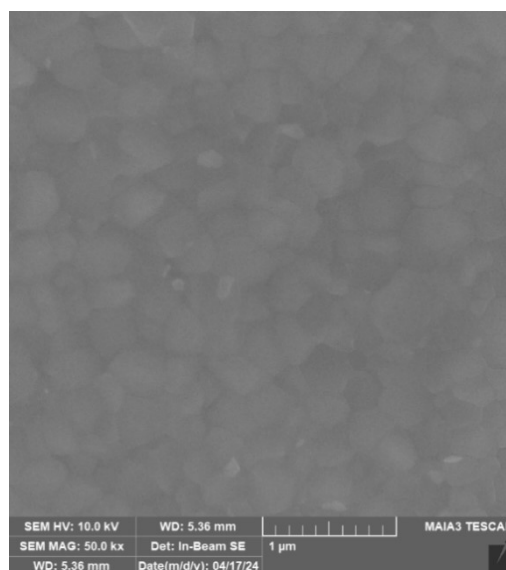
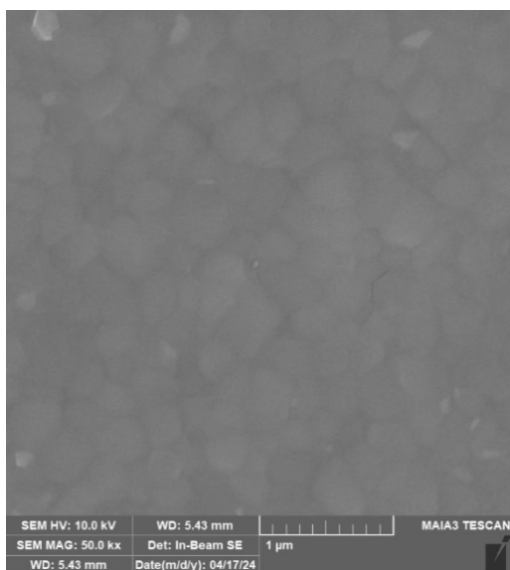
		T [°C]		
		25	100	500
f [Hz]	5	 <p>Vzorek č. 1 - <math>2.2 \pm 0.6</math> nm</p>	 <p>Vzorek č. 4 - <math>8 \pm 1</math> nm</p>	 <p>Vzorek č. 6 - <math>95 \pm 34</math> nm</p>
	2 5	 <p>Vzorek č. 2 - <math>3.5 \pm 0.8</math> nm</p>		
	5 0	 <p>Vzorek č. 3 - <math>2.9 \pm 0.8</math> nm</p>	 <p>Vzorek č. 5 - <math>6.9 \pm 0.8</math> nm</p>	 <p>Vzorek č. 7 - <math>44 \pm 15</math> nm</p>

Tabulka 7



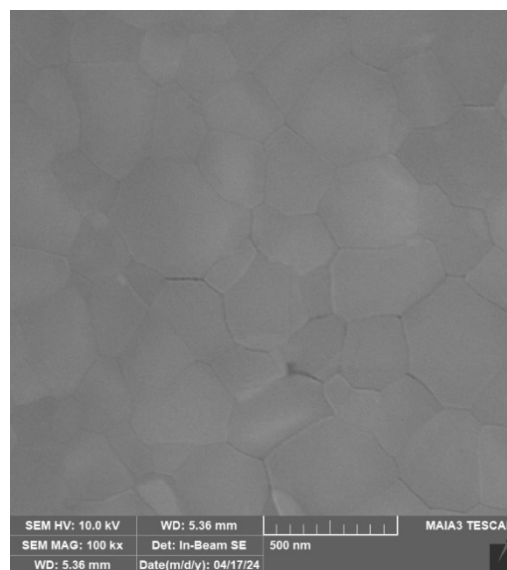
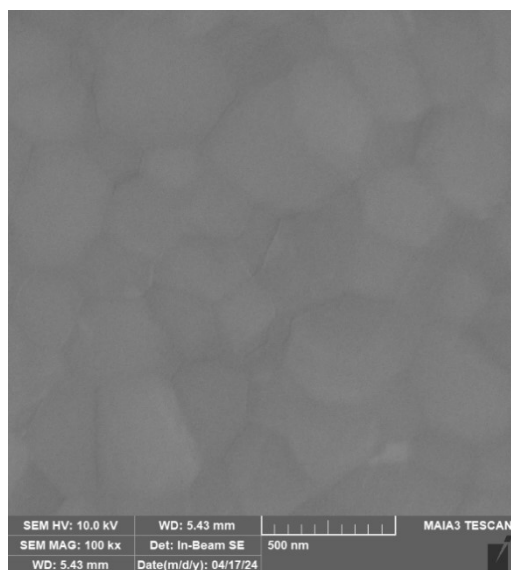
## 2.2.7 Perovskity pod elektronovým mikroskopem

Zvětšení: 50 000x



Vlevo vzorek G1 (žíháno 30 minut), vpravo vzorek G2 (žíháno 10 minut)

Zvětšení: 100 000x

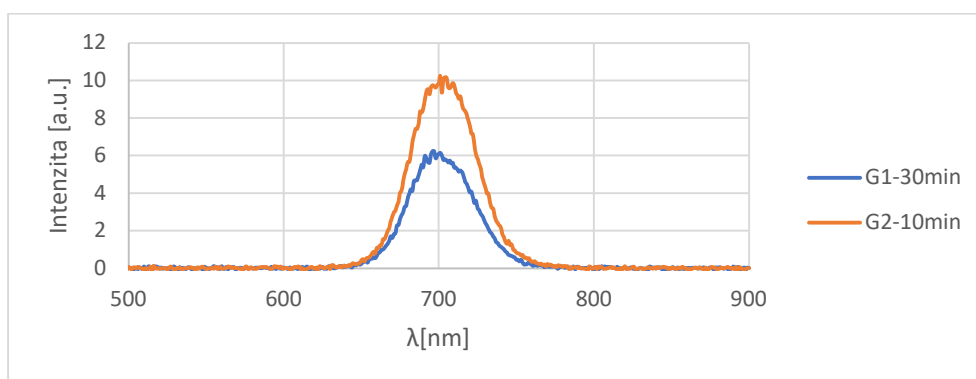


Žádný velký rozdíl ve struktuře není pozorován.

### 2.2.8 Měření luminiscence

Při tvorbě perovskitové vrstvy byly vytvořeny dva vzorky, které se skládaly pouze ze skla a na něm vrstvy perovskitu, která byla tvořena stejně jako u celých článků. Rozdíl byl pouze v době žíhání, kde u 1. vzorku (G1) byla doba 30 minut (stejná jako u finálních článků) a u 2. vzorku (G2) byla doba žíhání pouze 10 minut.

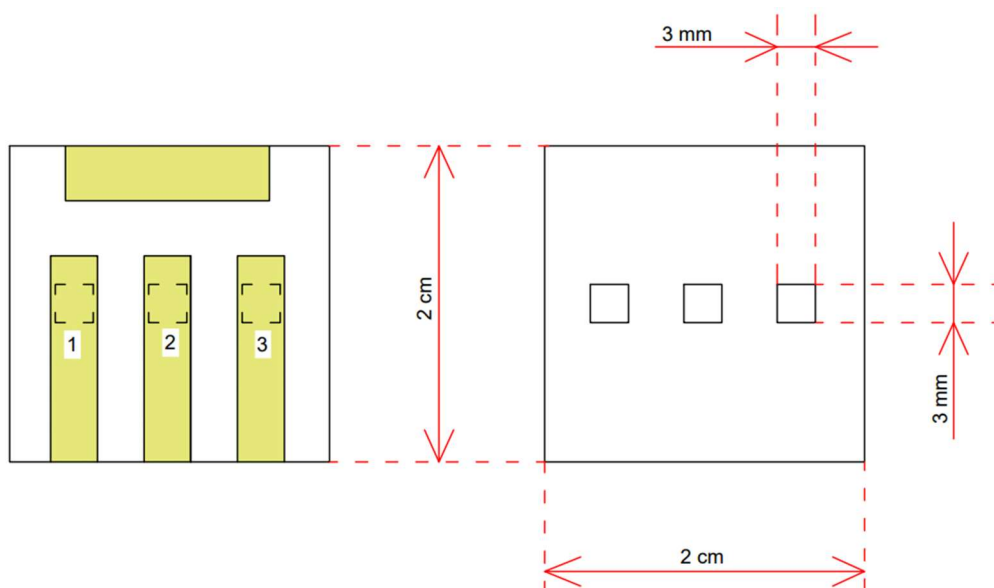
Graf 6 - měření luminiscence



Z měření luminiscence je vidět, že pro kratší žíhání je intenzita, jejíž vrchol nastává u obou vzorků v oblasti kolem 700 nm, mnohem větší.

### 2.2.9 VA charakteristiky vyrobených článků

Následující náčrtek (Obrázek 31) představuje rozložení komponent při měření VA charakteristik solárního článku pomocí čtyřbodové metody. Tento diagram znázorňuje umístění sond, které jsou strategicky rozmístěny pro přesné měření napětí a proudu v článku a poté ukazuje i osvětlenou stranu.

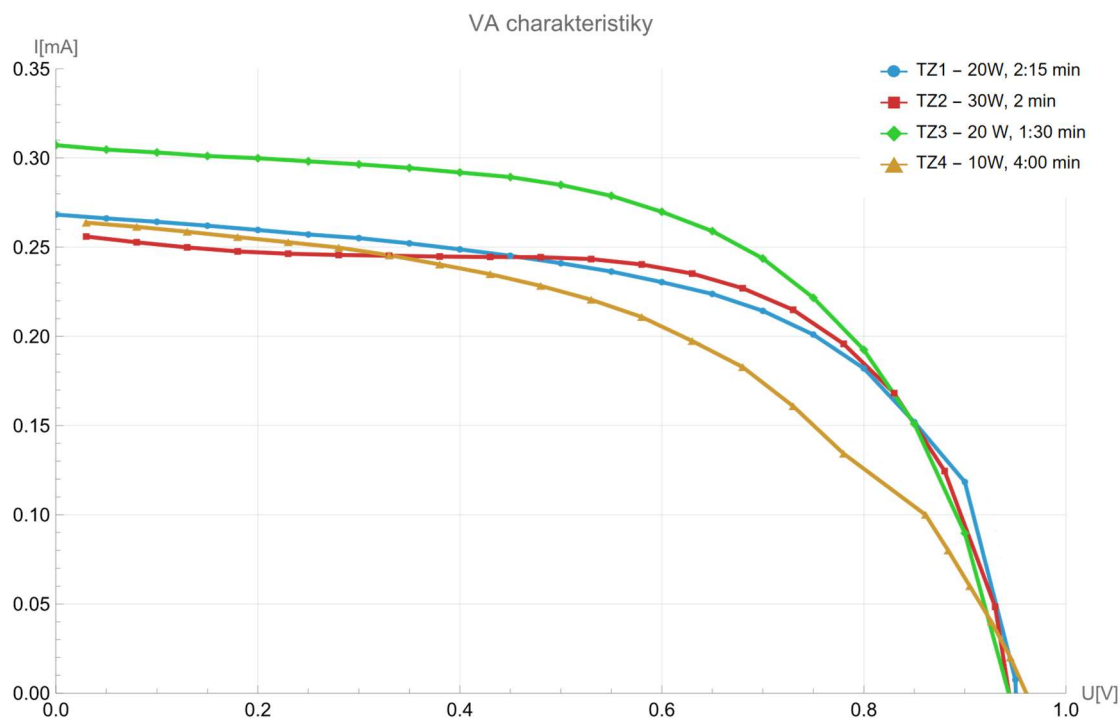


Obrázek 30 - 4 - bodová metoda, vlevo strana článku s kontakty, kde jsou připojené sondy, vpravo osvětlená strana článku

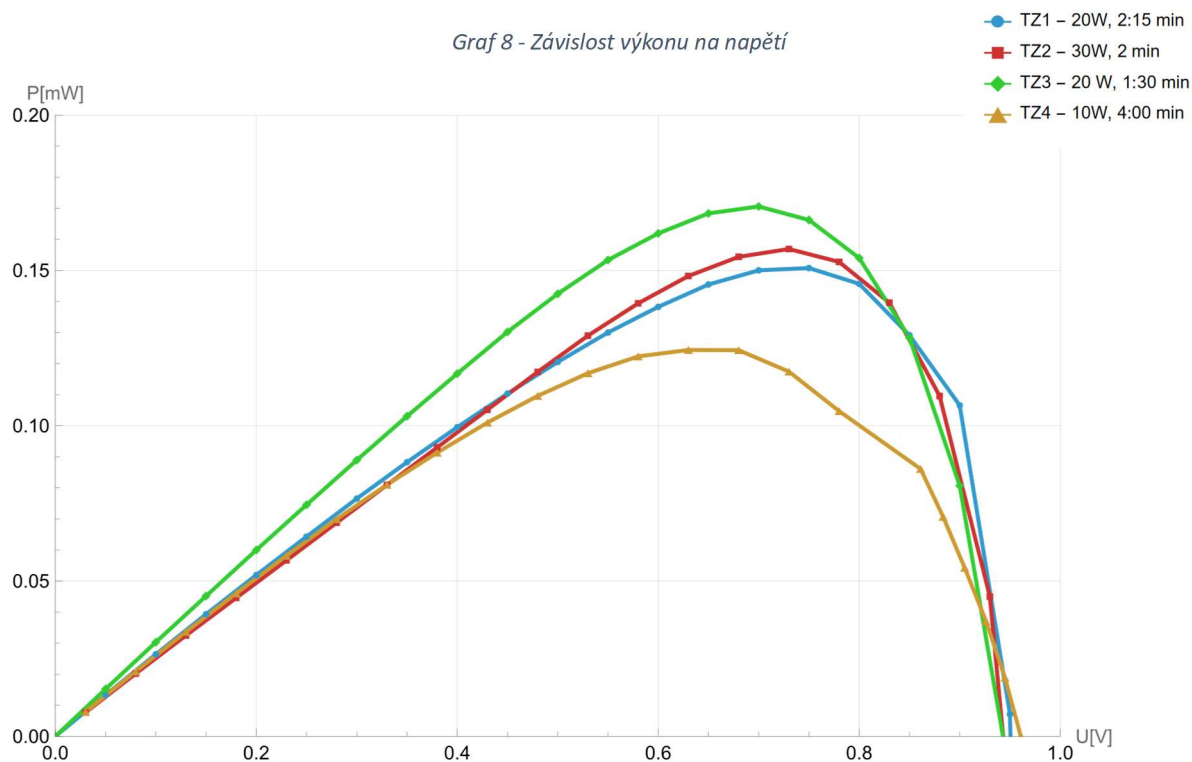
## ZnO jako ETL vrstva

Z grafů 7 a 8 je vidět že nejvyšší výkonu dosahuje článek TZ3, který byl deponován výkonem 20W po dobu 90 sekund. Naopak nejnižšího výkonu dosahuje článek TZ4, na který se při depozici ETL nenanesla nejspíše žádná vrstva a také jeho kontakty byly poničené a zčernalé.

Graf 7 - VA charakteristiky



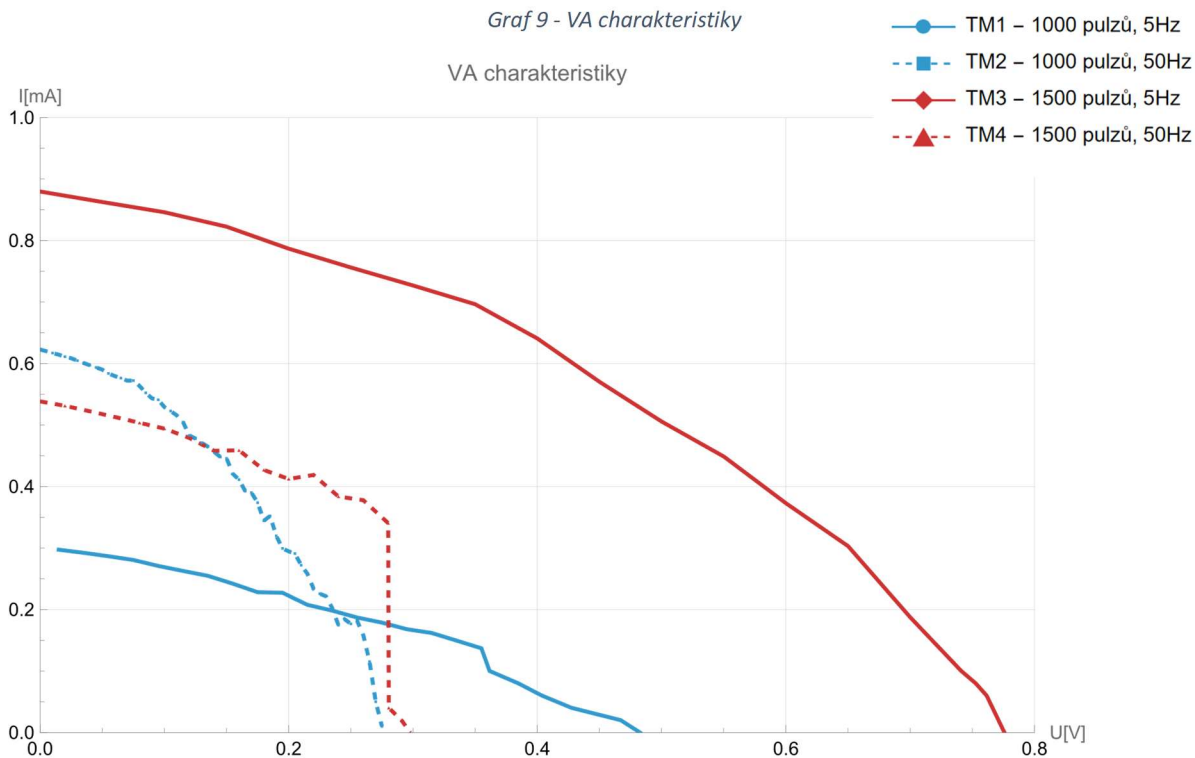
Graf 8 - Závislost výkonu na napětí



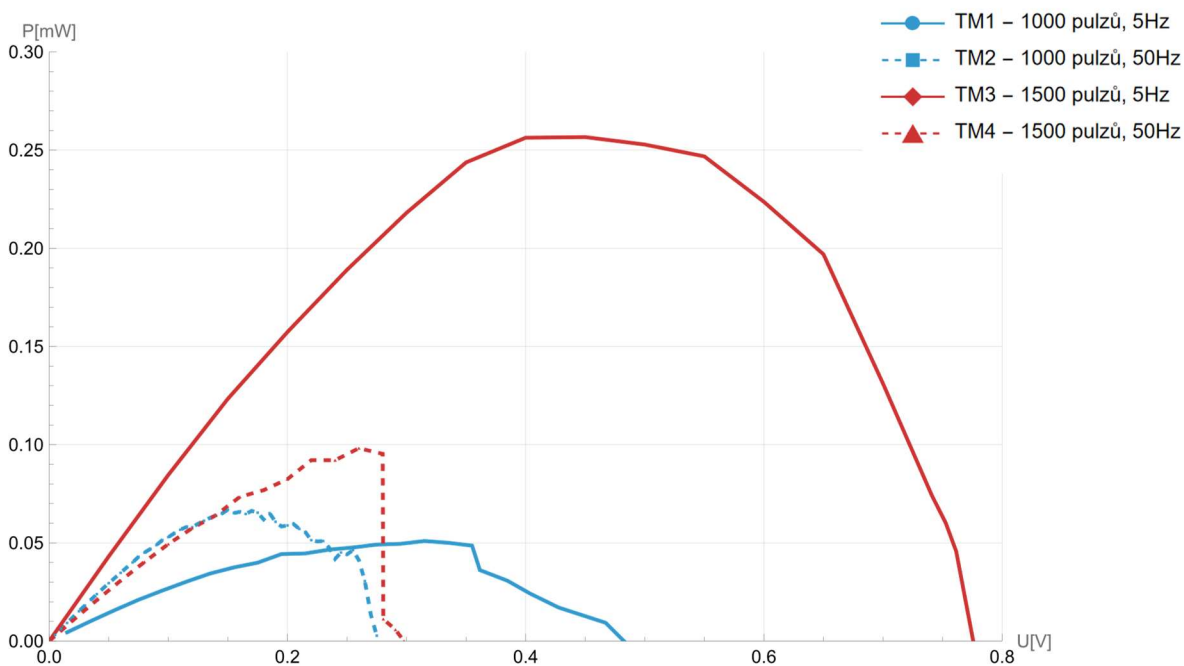
### MoO<sub>3</sub> jako ETL vrstva

Bohužel u molybdenových vzorků byly poničené kontakty u tří ze čtyř vzorků, což dělá širší analýzu prakticky nemožnou. Jediný vzorek, který neměl poničené kontakty a zároveň dosahuje “pěkné” charakteristiky je TM3. Z plochosti charakteristiky tohoto vzorku je vidět velký sériový odpor a naopak ne zas tak veliký paralelní odpor (Grafy 9 a 10).

Graf 9 - VA charakteristiky



Graf 10 - Závislost výkonu na napětí



## 2.2.10 Výpočet faktorů plnění a účinností vytvořených článků

Pomocí rovnic z teoretického úvodu (viz.

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2), \quad \eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \quad (3))$$

byly dopočítány hodnoty FF a účinnosti pro všechny vytvořené články.

Hodnota dopadajícího záření byla určena výpočtem ze střední intenzity záření (1000 W/m<sup>2</sup>) pro plochu 9 mm<sup>2</sup>. (viz. Obrázek 28)

### ZnO

	Uoc [V]	Isc [mA]	Pm [mW]	Um [V]	FF [%]	η [%]
<b>TZ1 - 20W, 2:15 min</b>	0,951	0,268	0,151	0,73	59,246	1,68
<b>TZ2 - 30W, 2 min</b>	0,948	0,258	0,157	0,73	64,191	1,74
<b>TZ3 - 20W, 1:30 min</b>	0,944	0,307	0,171	0,69	59,005	1,90
<b>TZ4 - 10W, 4:00 min</b>	0,961	0,264	0,125	0,66	49,270	1,39

Tabulka 8

### MoO<sub>3</sub>

	Uoc [V]	Isc [mA]	Pm [mW]	Um [V]	FF [%]	η [%]
<b>TM1 - 1000 pulzů, 5Hz</b>	0,483	0,301	0,051	0,32	35,080	0,57
<b>TM2 - 1000 pulzů, 50Hz</b>	0,623	0,275	0,066	0,17	38,523	0,73
<b>TM3 - 1500 pulzů, 5Hz</b>	0,776	0,88	0,257	0,43	37,635	2,86
<b>TM4 - 1500 pulzů, 50Hz</b>	0,298	0,539	0,098	0,26	61,013	1,09

Tabulka 9

Při porovnání vzorků ZnO a MnO<sub>3</sub> mají zinkové vzorky mnohem lepší tvar VA charakteristiky, i přesto ale dosahují molybdenové vzorky mnohem větších hodnot proudů a vzorek TM3 dosahuje dokonce nejvyšší účinnosti ze všech vytvořených vzorků, a to 2,86%.

### 3 Závěr

Bakalářská práce představila proces výroby n-i-p perovskitových solárních článků a zkoumala vliv depozice elektronově vodivých vrstev (ETL) na vlastnosti a výkon těchto zařízení. Hlavním cílem bylo analyzovat různé depoziční metody a parametry, jako je teplota, frekvence a čas, a jejich dopad na strukturu a vlastnosti vrstev.

Pro zhodnocení vrstev byly použity různé měřicí a zobrazovací metody, od elipsometrie až po 4-bodovou metodu měření VA charakteristik. Experimenty ukázaly, že magnetronové naprašování není ideální metodou pro depozici tenkých vrstev, zatímco pulzní laserová depozice (PLD) vedla k vrstvám s menší hrubostí a lepšími vlastnostmi.

Analýza molybdenových vrstev ukázala, že s rostoucí teplotou se zvyšuje jejich hrubost a při 500°C se vyvíjí krystalická struktura. Dále bylo zjištěno, že doba žíhání perovskitových vrstev negativně ovlivňuje intenzitu fotoluminiscence.

Výsledky ukázaly, že nejlepší účinnost byla dosažena u článků z oxidu zinečnatého při depozici při 20 W a délce 90 sekund. U článku s molybdenovou vrstvou se významné závěry nedaly vyvodit kvůli poničeným kontaktům. Nicméně, ve srovnání se zinkem, měl nepoškozený vzorek molybdenu nejvyšší účinnost ze všech vzorků, a to 2,86%.

Tím bylo prokázáno efektivní využití oxidu molybdenového jako ETL v perovskitových solárních člancích. Pro detailnější závěry by však bylo nutné provést další práce založené na širším vzorku.

Celkově lze tedy konstatovat, že volba depoziční metody a parametrů má klíčový vliv na vlastnosti a výkon perovskitových solárních článků, a důkladné studium těchto procesů je nezbytné pro optimalizaci jejich účinnosti a spolehlivosti.

Tato práce nabízí důležitý příspěvek k porozumění procesům depozice ETL vrstev a jejich vlivu na výkon perovskitových solárních článků. Další výzkum by se mohl zaměřit na další optimalizaci depozičních metod a parametrů, aby bylo možné dosáhnout ještě lepších vlastností a účinností těchto zařízení.



## 4 Bibliografie

- [1] „Semiconductor Materials | PVEducation". Viděno: 18. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/semiconductor-materials>
- [2] „Index of /vyuka/konicek/F2-B1B02FY2". Viděno: 8. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <http://aldebaran.feld.cvut.cz/vyuka/konicek/F2-B1B02FY2/>
- [3] „Polovodivé materiály". Viděno: 2. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/05.html>
- [4] „Semiconductor material...Silicon | Semiconductor", SHINDENGEN ELECTRIC MFG.CO.,LTD. Viděno: 3. květen 2024. [Online]. Dostupné z: [https://www.shindengen.com/products/semi/column/basic/semi/semi\\_basic.html](https://www.shindengen.com/products/semi/column/basic/semi/semi_basic.html)
- [5] I. Štoll, *Dějiny fyziky*, 1. vyd. Praha: Prometheus, 2009. [Online]. Dostupné z: [https://techlib.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwY2AwNtlz0EUrEwzMU0xTTC0tk1MMEk1SgbW8qQGwZrQwTk5LS7Q0NgFtf\\_b1NQoINXUJtvSDnpD2hoDOQ9VD3SeKXjdBXSBgQzM9AmlWYGZmNz0KH57k6gK5wsgFUmME2Zm5pCTteB842ADVyoMUgViJsgAwtoU4EQA1NysTADO3JZZXKxCAOfy5HZWZl5IQppVWZ2ZWiDApuriHOHrpQl-KhgyvxcHcYitGwADvsqRIMCsaGSYlpKcCq3TLRxCTN0MliZRRY01qmmpqbG6YIJ5tKMkjiNEYKj5w0AxdkLgM0ACDDwJoGTKCpsnBvyYHDAAAEH2KZ](https://techlib.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwY2AwNtlz0EUrEwzMU0xTTC0tk1MMEk1SgbW8qQGwZrQwTk5LS7Q0NgFtf_b1NQoINXUJtvSDnpD2hoDOQ9VD3SeKXjdBXSBgQzM9AmlWYGZmNz0KH57k6gK5wsgFUmME2Zm5pCTteB842ADVyoMUgViJsgAwtoU4EQA1NysTADO3JZZXKxCAOfy5HZWZl5IQppVWZ2ZWiDApuriHOHrpQl-KhgyvxcHcYitGwADvsqRIMCsaGSYlpKcCq3TLRxCTN0MliZRRY01qmmpqbG6YIJ5tKMkjiNEYKj5w0AxdkLgM0ACDDwJoGTKCpsnBvyYHDAAAEH2KZ)
- [6] J. Reichl a M. Všetická, „Encyklopedie fyziky". Viděno: 18. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/262-vlastni-polovodice>
- [7] „Vlastnosti elektrotechnických materiálů". Viděno: 18. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/03.html>
- [8] J. Toušková a J. Toušek, „Sluneční energie a fotovoltaika", 2020.
- [9] „PřF:F5090 Elektronika (2a)". Viděno: 8. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/jaro2015/F5090/um/54533496/>
- [10] „Index of /files/29/2902". Viděno: 8. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://mfi.upol.cz/files/29/2902/>
- [11] M. Libra a V. Poulek, *Solární energie: fotovoltaika : perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*, 2. dopl. vyd. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2006. [Online]. Dostupné z: <https://go.exlibris.link/x33W9gbV>
- [12] „Absorption of Light | PVEducation". Viděno: 18. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/absorption-of-light>
- [13] „ČEZ - SOLÁRNÍ ENERGIE". Viděno: 21. duben 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k31.htm>
- [14] A. McEvoy, T. Markvart, a L. Castaner, *Practical Handbook of Photovoltaics - Fundamentals and Applications (2nd Edition)*, 2. vyd. San Diego: Elsevier, 2012. [Online]. Dostupné z: [https://techlib.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwtV1LS8NAEB76QNCLb6yPGhC8peSx2SQnqTWHpSAD7yF7CMIlaTa6sE\\_4N92J9nEUg-ehEAILEl2GL6d2W\\_mWwDXGVjmCiYwwinKvAjpZ4KIKkaWgR8wmlEXWz3L4osbJ37wru7C2xawujWmZAx1meKgsqGS0WZU3U3y1FzXXQ5qBoCLKQJ0irDUz53Pns18aApJGT1qRtt6DrICXagqxaAqEnxMf5w\\_B-q0KU26sXQZuMGYxyHlhmeQn2UCyNEK\\_nUz0h6TvPiQ778Qvhy2RpvwlcZQ12voucy4J8repD\\_a4Yt6ErsqtiGlsx3YGNJBXEXzirNJOUsxiTNBb7eKDlji4WhQJP9Rk-34PHcXQ\\_mpj67AYzpdicADKRct\\_hPAildEOaWmGaeYSHVDBP2B4nnoJZFysIOw1UDGVxm5OUBpwJFVNkKnXeh05e5PIADCZYCVsQZZWxZchEzy0JPEFkdTKMtGDfmXtZFYpdCT4p8l0Fk\\_i8TCyhj04rY2WLSysiS5HIWUO\\_xxxBOvVdjJex9BZvL3LE1jTtu9rL-pD--na\\_gZp4eSF](https://techlib.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwtV1LS8NAEB76QNCLb6yPGhC8peSx2SQnqTWHpSAD7yF7CMIlaTa6sE_4N92J9nEUg-ehEAILEl2GL6d2W_mWwDXGVjmCiYwwinKvAjpZ4KIKkaWgR8wmlEXWz3L4osbJ37wru7C2xawujWmZAx1meKgsqGS0WZU3U3y1FzXXQ5qBoCLKQJ0irDUz53Pns18aApJGT1qRtt6DrICXagqxaAqEnxMf5w_B-q0KU26sXQZuMGYxyHlhmeQn2UCyNEK_nUz0h6TvPiQ778Qvhy2RpvwlcZQ12voucy4J8repD_a4Yt6ErsqtiGlsx3YGNJBXEXzirNJOUsxiTNBb7eKDlji4WhQJP9Rk-34PHcXQ_mpj67AYzpdicADKRct_hPAildEOaWmGaeYSHVDBP2B4nnoJZFysIOw1UDGVxm5OUBpwJFVNkKnXeh05e5PIADCZYCVsQZZWxZchEzy0JPEFkdTKMtGDfmXtZFYpdCT4p8l0Fk_i8TCyhj04rY2WLSysiS5HIWUO_xxxBOvVdjJex9BZvL3LE1jTtu9rL-pD--na_gZp4eSF)
- [15] A. K. Htal, „The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems", Viděno: 21. květen 2024. [Online]. Dostupné z: [https://www.academia.edu/82340444/The\\_physics\\_and\\_engineering\\_of\\_photovoltaic\\_conversion\\_technologies\\_and\\_systems](https://www.academia.edu/82340444/The_physics_and_engineering_of_photovoltaic_conversion_technologies_and_systems)
- [16] „Teorie - Zatěžovací charakteristika solárního článku". Viděno: 19. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <http://remote-lab.fyzika.net/experiment/10/experiment-10-teorie.php?lng=cs>



- [17] J. Pastuszak a P. Węgierek, „Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development”, *Materials*, roč. 15, č. 16, s. 5542, srp. 2022, doi: 10.3390/ma15165542.
- [18] „Generace - Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů”. Viděno: 20. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/03.html#3-1>
- [19] H. Benešová, „Nové trendy v oblasti solárních systémů”, Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2014. Viděno: 8. květen 2024. [Online]. Dostupné z: [https://theses.cz/id/mlym20/?lang=cs#panel\\_latex](https://theses.cz/id/mlym20/?lang=cs#panel_latex)
- [20] „Perovskite Solar Cells: Properties, Application and Efficiency”. Viděno: 12. březen 2024. [Online]. Dostupné z: [https://web-p-ebcohost.com.ezproxy.techlib.cz/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fMjI0Nm1MF9fQU41?sid=472a48d5-4c65-4841-a248-20504e4e3cf0@redis&vid=0&lpid=lp\\_vii&format=EB](https://web-p-ebcohost.com.ezproxy.techlib.cz/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fMjI0Nm1MF9fQU41?sid=472a48d5-4c65-4841-a248-20504e4e3cf0@redis&vid=0&lpid=lp_vii&format=EB)
- [21] M. Švestka, „Inovativní fotovoltaické technologie - perovskitové, „dye sensitized“, a průhledné články”, srp. 2023, Viděno: 12. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/111148>
- [22] „Tandem Cells | PVEducation”. Viděno: 12. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20240122060617/https://www.pveducation.org/pvcrom/tandem-cells>
- [23] H. Benešová a J. Škorpil, „Tandemové fotovoltaické články – jeden ze směrů výzkumu a vývoje v oblasti fotovoltaiky III. generace”.
- [24] J. You, L. Dou, Z. Hong, G. Li, a Y. Yang, „Recent trends in polymer tandem solar cells research”, *Prog. Polym. Sci.*, roč. 38, č. 12, s. 1909–1928, pro. 2013, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2013.04.005.
- [25] Zdeňka Hájková, Lucie Abelová, Tereza Schönfeldová, Neda Neykova, a Jakub Holovský a Martin Ledinský, „Perovskity – nový fenomén ve fotovoltaice”.
- [26] J. Warby *et al.*, „Understanding Performance Limiting Interfacial Recombination in pin Perovskite Solar Cells”, *Adv. Energy Mater.*, roč. 12, č. 12, s. 2103567, 2022, doi: 10.1002/aenm.202103567.
- [27] L. G. Gerling *et al.*, „Transition metal oxides as hole-selective contacts in silicon heterojunctions solar cells”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, roč. 145, s. 109–115, úno. 2016, doi: 10.1016/j.solmat.2015.08.028.
- [28] „ZnO-Based Electron Transporting Layer for Perovskite Solar Cells | IntechOpen”. Viděno: 22. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/52235>
- [29] F. Hou *et al.*, „Efficient and stable planar heterojunction perovskite solar cells with an MoO<sub>3</sub>/PEDOT:PSS hole transporting layer”, *Nanoscale*, roč. 7, č. 21, s. 9427–9432, kvě. 2015, doi: 10.1039/C5NR01864A.
- [30] V. D. Patel a D. Gupta, „Solution-processed metal-oxide based hole transport layers for organic and perovskite solar cell: A review”, *Mater. Today Commun.*, roč. 31, s. 103664, čer. 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103664.
- [31] H. Hosono a K. Ueda, „Transparent Conductive Oxides”, in *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, S. Kasap a P. Capper, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 1–1. doi: 10.1007/978-3-319-48933-9\_58.
- [32] C. G. Granqvist a A. Hultåker, „Transparent and conducting ITO films: new developments and applications”, *Thin Solid Films*, roč. 411, č. 1, s. 1–5, kvě. 2002, doi: 10.1016/S0040-6090(02)00163-3.
- [33] S. Ahmad, S. Kazim, a M. Grätzel, Ed., *Perovskite solar cells: materials, processes, and devices*. Weinheim: Wiley-VCH, 2022.
- [34] L. Eckertová, *Fyzika tenkých vrstev*, 1. vyd., roč. 21. Praha: SNTL, 1973. Viděno: 12. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://go.exlibris.link/F6vVH1Kg>
- [35] K. Seshan, *Handbook of thin-film deposition processes and techniques: principles, methods, equipment and applications*, 2nd vyd. Norwich: Noyes Publications, 2002. Viděno: 12. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://go.exlibris.link/VvlcYtB8>

- [36] „Pulsed Laser Deposition - an overview | ScienceDirect Topics". Viděno: 7. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/pulsed-laser-deposition>
- [37] M. D. Tyona, „A theoretical study on spin coating technique", *Adv. Mater. Res.*, roč. 2, č. 4, Art. č. 4, pro. 2013.
- [38] M. Cerman, „Studium vrstev vytvořených tenkovrstvými technologiemi", čer. 2021, Viděno: 23. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/94799>
- [39] „What is Ellipsometry?", J.A. Woollam. Viděno: 6. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/what-is-ellipsometry>
- [40] Q. Li, M. Anpo, J. You, T. Yan, a X. Wang, „Photoluminescence (PL) Spectroscopy", in *Springer Handbook of Advanced Catalyst Characterization*, I. E. Wachs a M. A. Bañares, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2023, s. 295–321. doi: 10.1007/978-3-031-07125-6\_14.
- [41] ZDEŇKA HÁJKOVÁ, PAVLA BAUEROVÁ, ANTONÍN FEJFAR, a MIROSLAV ŠLOUF, „ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP – KLÍČ K ODHALENÍ TAJEMSTVÍ MIKROA NANOSVĚTA", in *Výuka chemie*.
- [42] „„What is Atomic Force Microscopy?’ and Other AFM FAQs". Viděno: 12. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/microscopes/materials-afm/faq.html>
- [43] „Utilization of AFM mapping of surface’s mechanical properties in diagnostics of the materials for electrotechnics". Viděno: 12. květen 2024. [Online]. Dostupné z: [https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BPS4-0001-0002?fbclid=IwAR1Ii2seVeJpRmFO7kjH9i4LTX7\\_1JEpMaiuRVI5wGAKepmk2MMYYFyZDU](https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BPS4-0001-0002?fbclid=IwAR1Ii2seVeJpRmFO7kjH9i4LTX7_1JEpMaiuRVI5wGAKepmk2MMYYFyZDU)

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – struktura intrinstického polovoče (křemík – Si) [4] .....	1
Obrázek 2 – struktura polovodiče typu N [4] .....	2
Obrázek 4 – struktura polovodiče typu P, [4] .....	2
Obrázek 5 - Pásmový model polovodiče, [vlastní].....	3
Obrázek 6 - spojení P a N polovodiče a vytvoření depletiční oblasti, [9] .....	4
Obrázek 7 – Pásmové schéma P-N přechodu, $V_D$ je difúzní napětí, $E_g$ značí šířku zakázaného pásu, modré kroužky označují elektrony a bílé díry [10] .....	4
Obrázek 8 – Pásmové schéma osvětleného P-N přechodu [10] .....	5
Obrázek 9 - struktura křemíkového článku, [13] .....	6
Obrázek 10 - VA charakteristika diody a FV článku .....	6
Obrázek 11 - Náhradní schéma solárního článku (plnou čarou ideální stav, tečkovanou při uvažování neideálních součástí), [14].....	7
Obrázek 12 - VA charakteristika FV článku .....	7
Obrázek 13 - diagram vývoje fotovoltaických článků, [17].....	8
Obrázek 15 - Porovnání spektra slunečního záření(šedá barva) absorbovaného v perovskitové a v křemíkové vrstvě tandemového článku, [22] .....	10
Obrázek 16 – n-i-p a p-i-n struktura perovskitových článků [20], vlastní.....	11
Obrázek 17 - obecná struktura perovskitových materiálů, [30] .....	13
Obrázek 19 - PLD v laboratoři ČVUT FEL.....	15
Obrázek 18 - princip metody PLD, [30].....	15
Obrázek 20 – Magnetronová naprašovačka v laboratoři ČVUT FEL .....	15
Obrázek 21 - popis metody magnetronového naprašování, [30].....	16
Obrázek 22 - 4 fáze metody rotačního nanášení, [29] .....	17
Obrázek 23 - Glovebox v laboratoři ČVUT FEL, vlastní .....	17
Obrázek 24 - Napařovačka v laboratoři ČVUT FEL.....	17
Obrázek 25 - princip elipsometrie, [35].....	18
Obrázek 26 - princip fotoluminiscence.....	19
Obrázek 27 - Řez elektronovým mikroskopem, [29] .....	19
Obrázek 28 - popis AFM, [37] .....	20
Obrázek 29 - 4-bodová kontaktovací stanice v laboratoři ČVUT FEL.....	21
Obrázek 30 - deponované kontakty, vlevo správně nadeponován, vpravo poničený zčernalý kontakt .	22
Obrázek 31 - 4 - bodová metoda, vlevo strana článku s kontakty, kde jsou připojené sondy, vpravo osvětlená strana článku .....	32

## Seznam tabulek

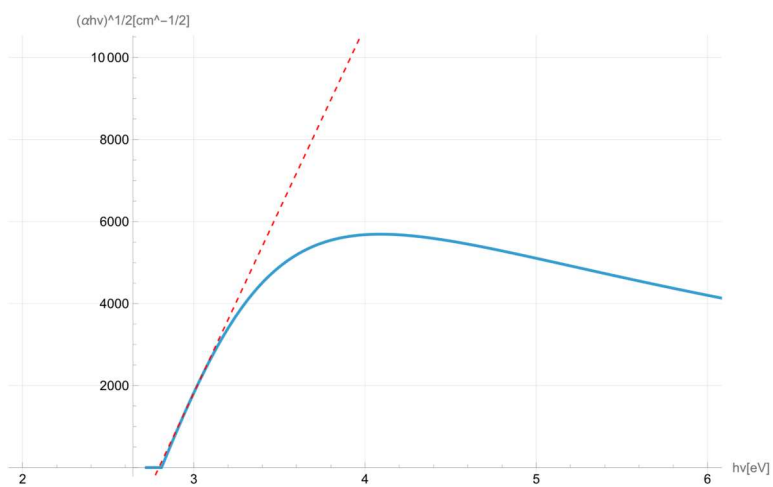
Tabulka 1 .....	23
Tabulka 2 .....	23
Tabulka 3 .....	24
Tabulka 4 .....	24
Tabulka 5 .....	27
Tabulka 6 .....	28
Tabulka 7 .....	30
Tabulka 8 .....	35
Tabulka 9 .....	35

## Seznam grafů

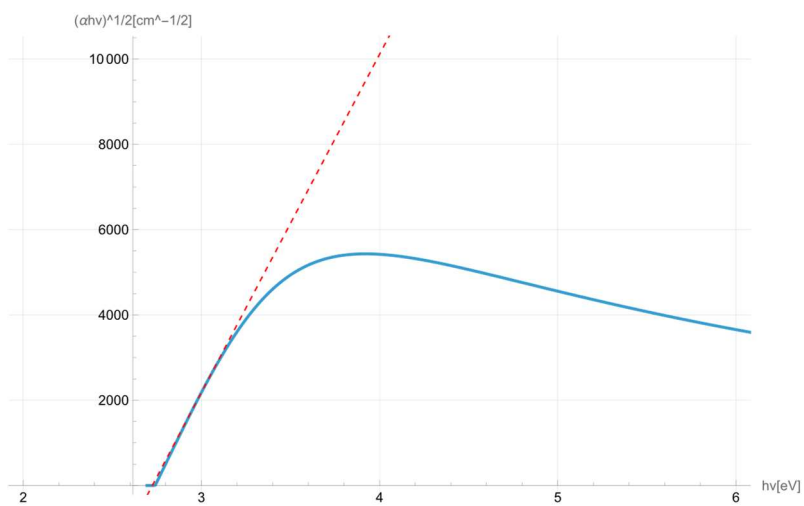
Graf 1 - Závislost absorpčního koeficientu na energii.....	25
Graf 2 - Závislost indexu lomu na energii.....	25
Graf 3 - Závislost absorpčního koeficientu na energii .....	26
Graf 4 - Závislost indexu lomu na energii.....	26
Graf 5 - Taucova metoda pro vzorek M1.....	27
Graf 6 - měření luminiscence.....	32
Graf 7 - VA charakteristiky .....	33
Graf 8 - Závislost výkonu na napětí.....	33
Graf 9 - VA charakteristiky .....	34
Graf 10 - Závislost výkonu na napětí.....	34
Graf 11 - MoO <sub>3</sub> – vzorek č. 2 .....	43
Graf 12 - MoO <sub>3</sub> – vzorek č. 3 .....	43
Graf 13 - MoO <sub>3</sub> – vzorek č. 4 .....	43
Graf 14 - MoO <sub>3</sub> – vzorek č. 5 .....	44
Graf 15 – ZnO – vzorek č. 1 .....	44
Graf 16 - ZnO – vzorek č. 2.....	44
Graf 17 - ZnO – vzorek č. 3.....	45

## Přílohy

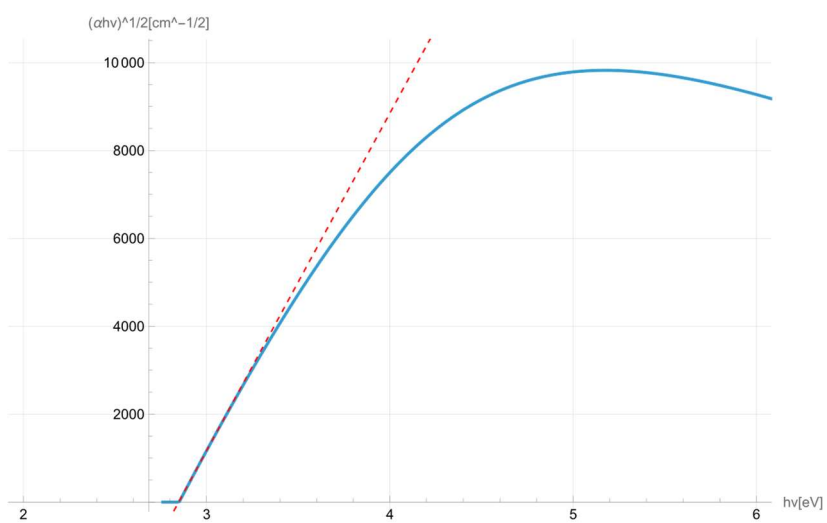
Graf 11 - MoO<sub>3</sub> – vzorek č. 2



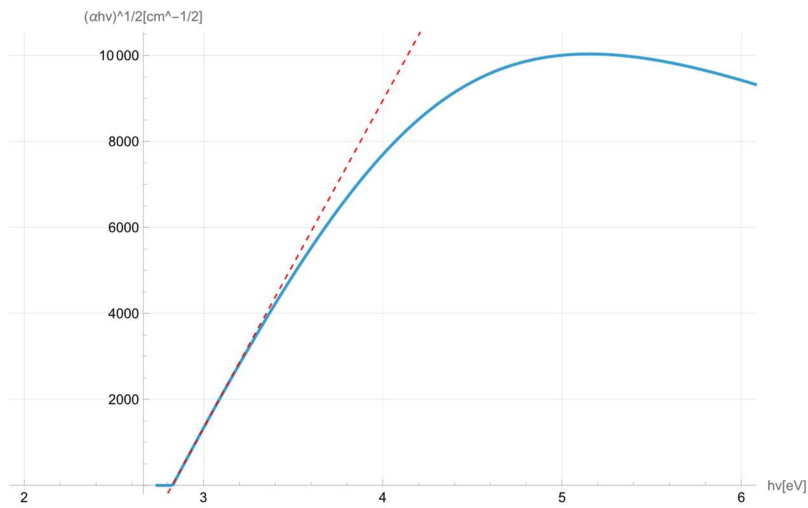
Graf 12 - MoO<sub>3</sub> – vzorek č. 3



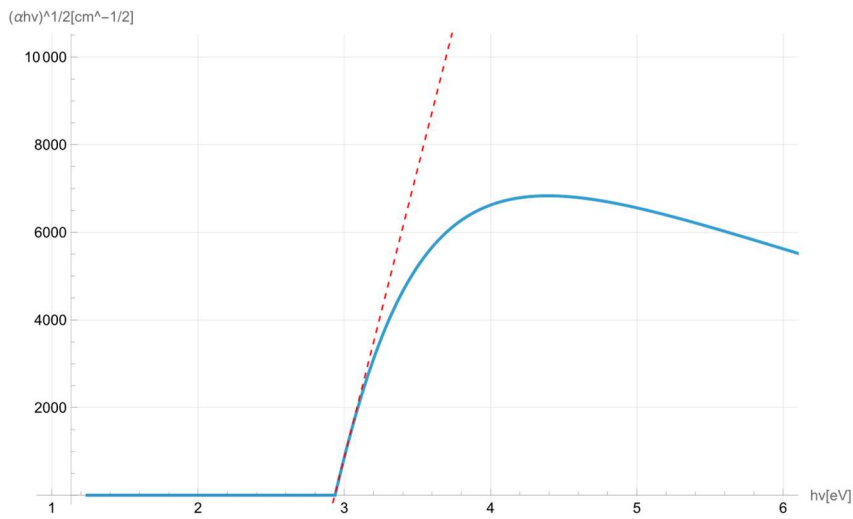
Graf 13 - MoO<sub>3</sub> – vzorek č. 4



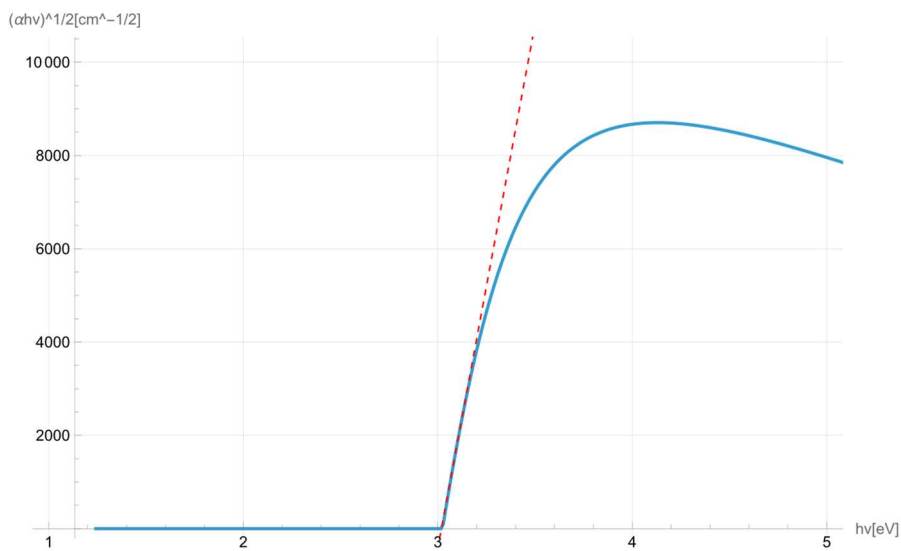
Graf 14 - MoO<sub>3</sub> – vzorek č. 5



Graf 15 – ZnO – vzorek č. 1



Graf 16 - ZnO – vzorek č. 2



Graf 17 - ZnO – vzorek č. 3

