

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2024

**MARKÉTA
ROUBOVÁ**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Roubová** Jméno: **Markéta** Osobní číslo: **507352**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv použití transparentních elektrod u perovskitových solárních článků

Název bakalářské práce anglicky:

The effect of the transparent electrode in perovskite solar cells

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši následujících témat: tenkovrstvé technologie, transparentní oxidy, perovskitové články
2. Připravte perovskitový článek metodou rotačního nanášení
3. Na připravený článek naneste buď standardní stříbrné kontakty nebo vrstvu transparentního vodivého oxidu
4. Proměřte vlastnosti jak připravené oxidové vrstvy, tak celého článku
5. Proveďte ekonomické zhodnocení výhodnosti tandemových článků oproti konvenčně používaným křemíkovým článkům

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] A. Shahzada: Perovskite Solar Cells, Wiley-VCH Verlag GmbH 2021

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Neda Neykova, Ph.D. katedra Elektrotechnologie, Fakulta Elektrotechnická CVUT v Praze

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

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2024** 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 Vliv použití transparentních elektrod u perovskitových solárních článků vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, a ve znění pozdějších předpisů z tohoto zákona vycházejících.

V Praze dne:

.....

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala své vedoucí bakalářské práce Ing. Mgr. Nedě Neykové, Ph.D. za ochotu, její odborné vedení a přívětivý přístup. Dále děkuji doc. Mgr. Jakubu Holovskému, Ph.D. a Ing. Evě Horynové za jejich odborné vedení, pomoc při práci v laboratoři a všechny jejich podnětné rady.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na přípravu experimentálních perovskitových solárních článků a na vliv použití transparentních elektrod. Vliv transparentních elektrod byl porovnán se standartními stříbrnými. Mimo jiné zde proběhla analýza časově rozdílné depozice perovskitové absorpční vrstvy. V práci jsou popsány jednoduché principy fungování článku, jeho výroba a měřicí metody, jimiž jsou následně zkoumány. V rámci ekonomické části proběhlo grafické porovnání výhodnosti perovskitových tandemových článků s konvenčními křemíkovými články.

Klíčová slova: perovskit, perovskitový solární článek, transparentní oxidy, tandemový solární článek perovskit-křemík, grafická metoda

Abstract

This bachelor thesis focuses on the preparation of experimental perovskite solar cells and the effect of using transparent electrodes. The effect of transparent electrodes was compared with standard silver electrodes. Among other things, an analysis of the time-varying deposition of the perovskite absorbing layer has been carried out. The simple principles of operation of the cell, its manufacture and the measurement methods by which it is then examined are described. In the economic part, a graphical comparison of the profitability of perovskite tandem cells with conventional silicon cells was made.

Key words: perovskite, perovskite solar cell, transparent oxides, perovskite-silicon tandem solar cell, graphical method

Obsah

1 Úvod	1
2 Teoretická část	3
2.1 Články z perovskitu	3
2.2 Struktura p-i-n článku	4
2.3 Jednoduchý princip p-i-n článku	5
2.4 Transparentní vodivý oxid (TCO)	6
2.5 Děrová transportní vrstva (HTL)	6
2.6 Absorpční vrstva z perovskitu	7
2.7 Elektronová transportní vrstva (ETL)	9
2.8 Depozice horních kontaktů ITO	10
2.9 Depozice horních kontaktů ze stříbra	11
2.10 Elipsometrie	11
2.11 Fotoluminiscenční spektroskopie	14
2.12 Skenovací elektronová mikroskopie	15
2.13 Voltampérová charakteristika	16
3 Experimentální část	18
3.1 Příprava článku	18
3.2 Měření svrchní tloušťky ITO pomocí elipsometrie	20
3.3 Měření fotoluminiscence perovskitové vrstvy	23
3.4 Zkoumání perovskitové vrstvy pomocí elektronového mikroskopu	26
3.5 Měření voltampérové charakteristiky	27

4 Ekonomická část	31
4.1 Použitá data křemíkových modulů	31
4.2 Nasbíraná data	32
4.3 Ostatní náklady spojené s pořízením FV modulů – BOS	33
4.4 Určení bodů pro tandemovou technologii	35
4.5 Grafická metoda	38
4.6 Výsledky grafického zhodnocení	39
4.7 Vliv změny nákladů BOS na grafické zhodnocení	40
5 Závěr	42
6 Citace	45
7 Seznam elektronických příloh	52

Seznam použitých zkratek

Ag	Stříbro
BCP	Bathocuproin
BOS	Balance of system (rovnováha systému)
CaTiO₃	Titanát vápenatý
CIS, CIGS	Měď-indium-galium selenid (Copper indium galium selenide)
ETL	Elektronová transportní vrstva (Electron transport layer)
ETM	Materiál přenášející elektrony (Electron transport material)
FV	Fotovoltaický
HTL	Děrová transportní vrstva (Hole transport layer)
HTM	Materiál přenášející díry (Hole transport material)
ITO	Oxid india s příměsí cínu
LED	Elektroluminiscenční dioda (Light-emitting diode)
MBE	Epitaxe molekulárním paprskem (Molecule beam epitaxy)
PCBM	Methylester kyseliny [6,6]-fenyl-C71-butanové
PME	Fázová modulace
PTAA	Poly[bis(4-fenyl)(2,4,6-trimethylfenyl)amin]
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
STC	Standartní zkušební podmínky (Standart test conditions)
TCO	Transparentní vodivý oxid (Transparent conducting metal oxid)
UV	Ultrafialový (Ultraviolet)
VA	Voltampérová

Seznam použitých symbolů

E [eV]	Energie
FF [%]	Činitel plnění
h [mm]	Výška
I_{mp} [A]	Proud při maximálním výkonu
I_{sc} [A]	Proud nakrátko
k [-]	Koeficient extinkce
k_η [-]	Koeficient posunu tandemové technologie
M_p [Kč/m²]	Cena experimentálního perovskitového článku
M_{Si} [Kč]	Cena křemíkového modulu
M_{sim} [Kč/m²]	Cena křemíkového modulu na m ²
M_T [Kč/m²]	Cena tandemu
n [-]	Index lomu
P_m [W]	Maximální výkon
P_{in} [W]	Dopadající výkon
S [m²]	Obsah
U_{mp} [V]	Napětí při maximálním výkonu
U_{oc} [V]	Napětí naprázdno
w [mm]	Šířka
α [1/cm]	Absorpční koeficient
η [%]	Účinnost
η_{si} [%]	Účinnost křemíkových modulů
η_T [%]	Účinnost tandemových modulů

Kapitola 1

Úvod

Se stále větší nutností omezit produkci CO₂ do zemské atmosféry, je deklarováným cílem nejvyspělejších ekonomik světa, přejít k bezemisní výrobě elektřiny pouze z obnovitelných zdrojů. Aktuálně vykazují obnovitelné zdroje nejmenší podíl v celosvětovém mixu výroby elektrické energie [1]. Přestože výroba ze solární energie má obrovský potenciál, tento způsob přeměny slunečního záření na elektrickou energii v celkové výrobě zaostává i za výrobou energie z větru a vody.

Velký potenciál solární energie tkví v tom, že ze Slunce přichází mnohonásobně více energie, než jsme schopni zpracovat. Přesněji řečeno za den se na povrch Země vyzáří ze Slunce více energie, než naše populace spotřebuje za celý rok [2]. Pokud by se pokrylo přibližně 1 % plochy pouští slunečními články s alespoň 15% účinností, vyrobilo by se více energie, než vyrobí všechny současné elektrárny na světě dohromady [3]. Vedle toho, sluneční záření dopadá rovnoměrně na celou zeměkouli a nenastává zde problém jako například u vodních či větrných elektráren, které díky lokálním podmínkám nelze postavit všude. Pro přiblížení, například větrná elektrárna má nutnou podmínku na minimální roční průměrnou rychlost větru, aby se její výstavba vyplatila. Pro výstavbu vodní elektrárny je nutný vodní tok, ať už je to přirozený vodní tok či člověkem vytvořený.

Proč tedy nevyrábíme všechnu elektrickou energii pouze za pomoci energie vyzářené Sluncem? Problémem je poměrně vysoká cena používané technologie vzhledem k její efektivitě. Aktuálně nejpoužívanější křemíkové články dosahují v laboratorních podmínkách účinnosti do 30 %, nicméně v praxi, tedy v běžných komerčních aplikacích křemíkových solárních článků, dosahují pouze do 23 % [4]. I přesto se v současnosti oproti ostatním i účinnějším technologiím považují křemíkové články za nejvýhodnější z hlediska poměru výkonu a ceny a také proto tvoří křemíkové články 95 % současné celosvětové produkce solárních panelů [5].

V této práci se věnuji výzkumu jedné z nejslibnějších alternativ technologie výroby solárních článků na bázi perovskitu. Zaměřila jsem se na výrobu perovskitových článků v laboratorních podmínkách, testování jejich účinnosti a ekonomické zhodnocení výhodnosti tandemových perovskitových článků s konvenčními křemíkovými články. V této práci objasňuji přípravu a způsob výroby perovskitových článků v laboratoři a na teoretické úrovni pracuji i s tandemovými články, které jsou kombinací křemíkové a perovskitové technologie, a to proto, že vývoj tandemových solárních článků ve světě již aktuálně směřuje k transferu této technologie do komerční výroby. Toto spojení dvou technologií docílilo účinnosti až přes 30 % [6]. V listopadu loňského roku dokonce společnost LONGi oznámila

rekordní prolomení účinnosti 33,9 % [7]. Tandemové články také oproti perovskitovým vykazují větší stabilitu a odolnost [8].

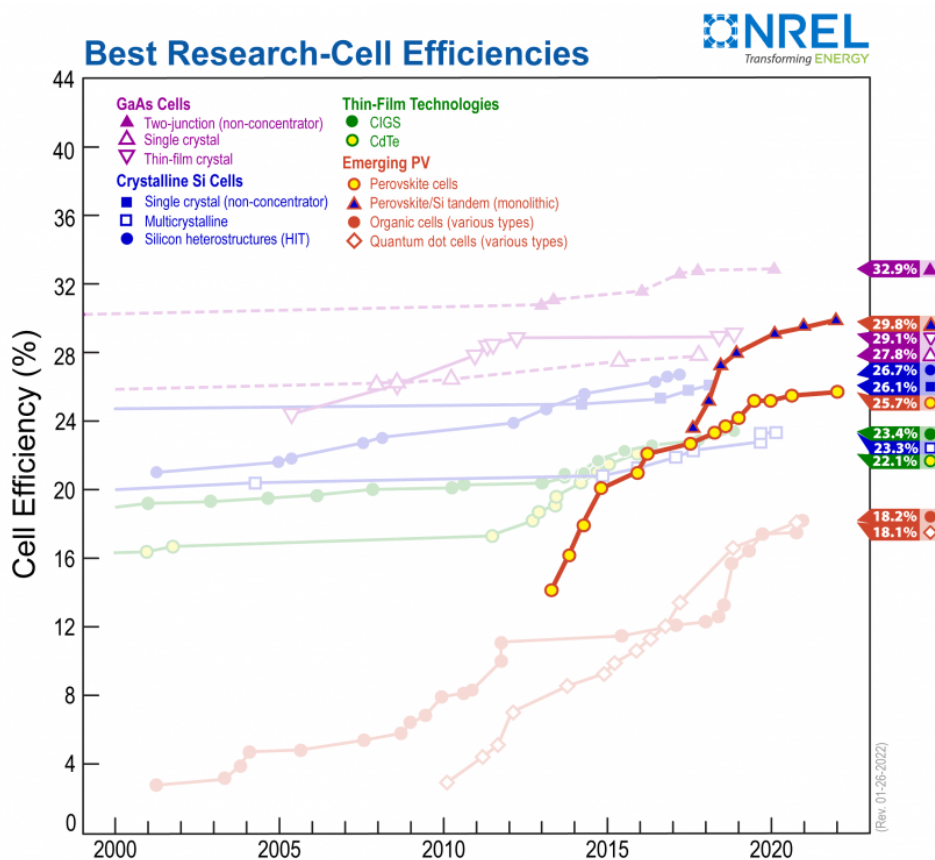
Kapitola 2

Teoretická část

2.1 Články z perovskitu

Perovskitové solární články jsou poměrně novou technologií, které se v posledních letech dostává čím dál větší pozornosti. Důvodem je veliký pokrok v účinnosti těchto článků. V roce 2009 se pohybovala účinnost na 3 % a v současnosti vykazují perovskitové články až 25% účinnost [9]. Mimo jiné v kombinaci s křemíkovou technologií je udávána maximální teoretická účinnost na 43 %. V současné době se právě tato kombinovaná technologie pohybuje na 27 % pro komerční použití, to už překračuje účinnost nyní komerčně prodávaných křemíkových článků [10].

Na obrázku 1 vidíme dosažené rekordní účinnosti vybraných fotovoltaických technologií. Na obrázku jsou zvýrazněné účinnosti pro perovskitové články a kombinace perovskitové a křemíkové technologie. Vidíme, že tandemy křemík/perovskit vykazují jednu z největších účinností oproti ostatním zobrazeným technologiím.



Obrázek 1 - rekordy účinností vybraných fotovoltaických technologií, převzato z [11]

Perovskitové články se vyrábí především ve dvou strukturách, a to struktury n-i-p a p-i-n. Liší se pořadím nanášení jednotlivých elektronových a děrových vrstev vzhledem k průhlednému vodivému

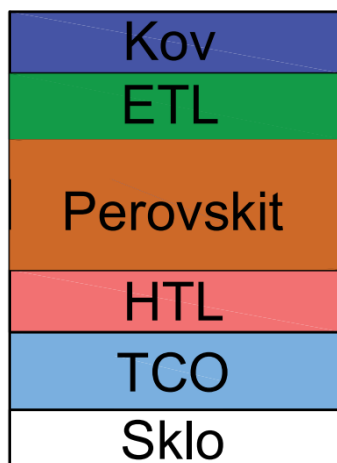
oxidu. Se strukturou n-i-p se aktuálně vyrábí nejvýkonnější články. Naopak struktura p-i-n ale vykazuje vyšší provozní stability, a zároveň s touto strukturou dochází k úspěšné integraci do tandemových solárních článků. Z tohoto důvodu je tedy struktura p-i-n v tandemových technologiích nejpoužívanější [12]. V této bakalářské práci budu vyrábět p-i-n článek.

Za tandemové technologie označujeme v této práci solární články perovskit/křemík. V tomto případě je tenká vrstva perovskitu na křemíkovém solárním článku. Perovskit využívá viditelné světlo [380–700 nm] pro přeměnu na elektrickou energii, a zároveň propouští blízké infračervené světlo [800–2500 nm] na křemíkový článek, který ho následně také přemění na elektrickou energii [13].

Mimo jiné se ale v tandemovém spojení vyrábí i solární články perovskit/perovskit. Tyto vícepřechodové perovskitové solární články vykazují také větší účinnost, než články jednopřechodové [14].

2.2 Struktura p-i-n článku

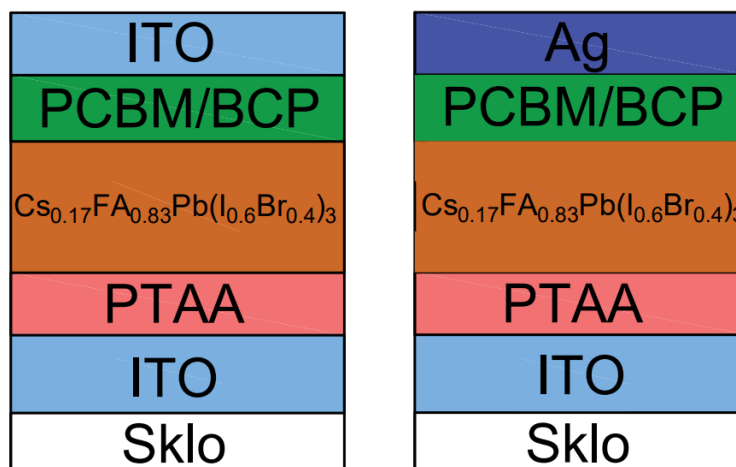
Pro jednoduché nastínění, jaká je struktura perovskitového p-i-n článku, jsem vytvořila obrázek.



Obrázek 2 – obecná struktura p-i-n článku

Kde TCO (transparent conductive oxide) reprezentuje transparentní vodivý oxid. HTL (hole transporting layer) je vrstva pro transport děr a ETL (electron transporting layer) je vrstva pro přenos elektronů.

V mém konkrétním případě je struktura následující:



Obrázek 3 – struktura našeho prototypu p-i-n článku

Kde dolní vrstva ITO je už komerčně připravená na sklo. Místo kovu používám jako horní kontakt další vrstvu ITO. Běžně se jako horní kontakt využívají stříbrné, měděné, popřípadě jiné kovové kontakty. Proto pro porovnání vyrobím ještě články s horním kontaktem ze stříbra.

Použitím transparentního vodivého oxidu se vyřeší nejen dobré vodivé vlastnosti, ale i vlastnosti optické. Protože transparentní vodivé oxidy by měly vykazovat vysokou vodivost a vysokou průhlednost v celém spektrálním rozsahu relevantním pro solární články, tj. mezi 300 nm a 1100 nm [15].

2.3 Jednoduchý princip p-i-n článku

Vlastnosti jednotlivých složek p-i-n článku jsou následující. První vrstva na článku je TCO, transparentní vodivý oxid. Tato část je využívána jako antireflexní vrstva ke snížení ztrát odrazem světla a zlepšení účinnosti baterie. HTL, vrstva pro přenos děr, blokuje elektrony a zvyšuje transport děr. Třetí komponenta v článku, a to perovskitová vrstva, funguje jako vrstva absorpční, vstřebává zejména světlo v rozsahu vlnových délek 300-800 nm. ETL je vrstva využívána pro svoji vlastnost přenosu elektronu. Tento úsek zajišťuje přenos elektronů a blokování děr. Tato struktura, tedy obdobně jako u článků křemíkových, tvoří P-N přechod [16].

P-N přechod je předěl vrstev P a N. Vrstva P je charakteristická tím, že v jejích vazbách chybějí elektrony, a tudíž se na místech chybějících elektronů vyskytují díry. N vrstva má naopak ve své struktuře přebytek elektronů. Tyto elektrony se mohou volně pohybovat. Na rozhraní těchto vrstev se právě přebývající elektrony N vrstvy přesouvají do děr vrstvy P. Takto na rozhraní vzniká depleční zóna [17].

Takto popsaná struktura je charakteristická tím, že když se vystaví slunečnímu záření, může se na ní objevit napětí. Fotony ze slunečního záření dopadnou na článek, kde se absorbují v absorbéru. V mém případě je absorbér perovskit. Pokud na článek dopadne dostatečné množství fotonů a absorbuje se z nich dostatečně velká energie, uvolní se elektrony ze svých vazeb. Elektrony se následně začnou přesouvat ke kladnému náboji děr. Jestliže se přesune dostatek elektronů se záporným nábojem směrem k vrstvě P, vytvoří se na P-N přechodu napětí. A proto když se článek zatíží, začne proudit elektrický proud [18].

Energie dopadajících fotonů musí být zpravidla stejná nebo větší než šířka zakázaného pásu. Tato šířka odpovídá energii E_g , tedy energii, kterou je nutno dodat, aby se elektron dostal z valenčního do vodivostního pásu. Například pro křemík odpovídá tato energie 1,1 eV [19].

2.4 Transparentní vodivý oxid (TCO)

V rámci této bakalářské práce, mimo jiné, pracuji i s transparentními vodivými oxidy (TCO), které se používají při výrobě tenkovrstvých fotovoltaických panelů. Transparentní vodivé oxidy klasifikujeme jako materiály, které mají vysokou vodivost a jsou průhledné nebo téměř průhledné [20]. Tyto oxidy mají v dnešní době veliké využití jako transparentní elektrody v různých aplikacích od, už zmíněných, fotovoltaických panelů po mobilní telefony. Těchto vodivých oxidů je větší množství, v mém případě se ale zaměříme na ITO. Tedy oxid india s příměsí cínu. ITO je dnes nejpoužívanějším typem transparentních oxidů, který se užívá v světelných diodách, displejích z tekutých krystalů, senzorech plynu, ale právě i v solárních článcích [21].

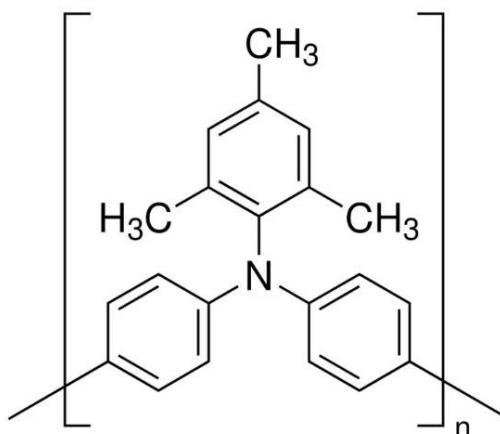
Oxid india s příměsí cínu je polovodič typu N. Tento oxid má vysokou koncentraci nábojů, díky velkému objemu kyslíkových vakancí a dopantů [18]. Tento oxid je velmi užívaný kvůli svým dobrým elektrickým i optickým vlastnostem. ITO disponuje dobrou elektrickou vodivostí a optickou průhledností [22]. Šířka zakázaného pásu tohoto materiálu se pohybuje mezi 3,5 – 4,3 eV [23]. Právě díky těmto vlastnostem se ITO hojně využívá v přípravě fotovoltaických článků [24]. Výsledné vlastnosti materiálu se ovšem můžou lišit v závislosti na typu přípravy [21]. Časté metody depozice jsou například odpařování elektronovým paprskem, chemické napařování, pyrolýza rozprašováním, pulzní laserová depozice, magnetronové napařování či metodou sol-gel [22].

2.5 Děrová transportní vrstva (HTL)

Vrstva přenášející díry (HTL) má v p-i-n článcích též poměrně důležitou roli. Tato vrstva totiž umožňuje účinně vyjmout díry z perovskitové vrstvy a přenášet tyto díry na transparentní vodivý oxid (v mém případě na ITO). Mimo to funguje tato vrstva jako překážka pro elektrony. Díky ní se omezí kontakt perovskitové vrstvy a TCO. Tím se snižuje potenciální rekombinaci elektronů a děr [25].

Z toho tedy vyplývá že ideální materiál na tuto vrstvu (HTM) musí mít vysokou vnitřní pohyblivost děr, vhodnou energetickou hladinu, která odpovídá perovskitové vrstvě, dlouhodobou stabilitu na vzduchu a dobrou fotochemickou a tepelnou stabilitu. Ideálně by, mimo jiné, měl být zpracovatelný v roztoku, aby bylo možné připravit vrstvu [26].

Možnou skupinou materiálu, která se používá jako HTM (hole transporting material), jsou polymerní materiály. V mém případě PTAA. Poly[bis(4-fenyl)(2,4,6-trimethylfenyl)amin] (PTAA) je běžným materiálem používaným jako HTM, je to polymerní polovodič ze skupiny poly(triaryl)aminů. Tento polymer se vyznačuje tou vlastností, že usnadňuje transport děr a blokuje průnik elektronů. Je vhodný právě pro využití s perovskitovými materiály, jelikož jeho energetické pásy se shodují s většinou perovskitových absorbérů. Další výhodnou vlastností je, že oproti jiným organickým materiálům, které se používají jako HTL, má PTAA vyšší pohyblivost děr. PTAA má mimo jiné velmi dobrou optickou propustnost ve viditelném oboru, je stabilní na vzduchu a lze ho deponovat za nízkých teplot ve formě roztoku [27].

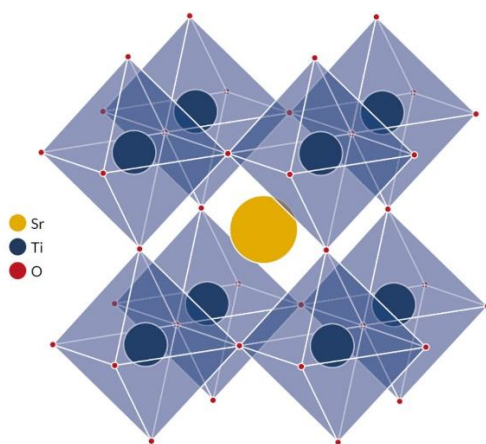


Obrázek 4 – struktura PTAA, převzato z [28]

2.6 Absorpční vrstva z perovskitu

Perovskit je minerál oxidu vápenatého a titaničitého s chemickým vzorcem CaTiO_3 . U této problematice si musíme dát pozor na termíny perovskit a perovskitová struktura. Perovskit je minerál, zato perovskitová struktura je cokoliv, co má obecnou formu ABX_3 a stejnou krystalografickou strukturu jako perovskit. Pro jednoduchou představu perovskitové struktury se podíváme na obrázek 5. Na kterém vidíme perovskitovou strukturu jako kubickou jednotkovou buňku s atomy titanu v rozích, atomy kyslíku ve středu hran a atomem vápníku uprostřed. Obecně lze říci, že uprostřed každé perovskitové mřížky, tedy ve středu krychle, je molekulární kationt typu A. V rozích krychle jsou kationty B a ve středu všech znázorněných hran jsou anionty X [29]. Anionty X bývají velmi často zastoupeny kyslíkem, či jinými velkými ionty, jako jsou halidy, sulfidy,

nitridy a jiné [30]. Znázorněné tvary s kationty B v jejich středu se nazývají oktaedry. Vlastnosti kationtu A, jako jeho tvar, velikost a rozložení jeho náboje, jsou důležitým faktorem pro vytvoření perovskitové struktury. Takto popsaná perovskitová struktura není ale velmi běžná, ve většině případů je struktura lehce deformovaná. To je zapříčiněno velikostí kationtů A, B a aniontů X. Deformované perovskity nejsou až tak symetrické, to má vliv na přechod krystalové struktury, a tudíž vliv na strukturní stabilitu perovskitového materiálu. Právě stabilita materiálu je prozatím největší komplikací v této problematice [31].



Obrázek 5 – perovskitová struktura (REF), převzato z [32]

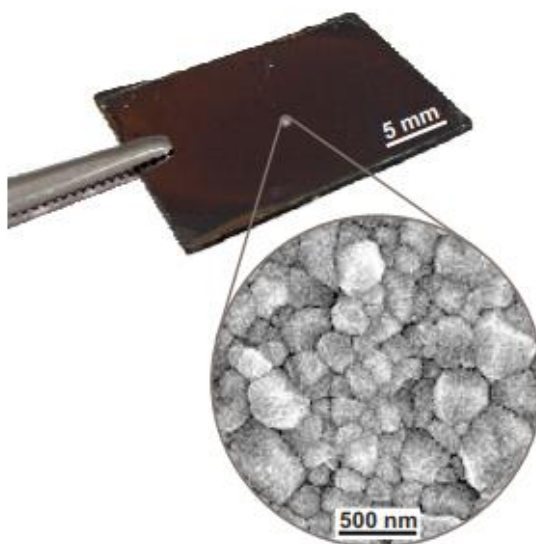
Od materiálu, který se používá do solárních článků, požadujeme odolnost, protože panely jsou venku vystaveny různým přírodním podmínkám. Tato dlouhodobá stabilita je problém. Perovskitové materiály, které vykazují výborné vlastnosti pro fotovoltaické aplikace, co se účinnosti týče, projevují náchylnost vůči molekulám vody, superoxidu a i světlu o vysoké intenzitě. To má za následek degradaci látky. Dále perovskitové látky postrádají tepelnou stabilitu. Při teplotě 55 °C a vyšší dochází k strukturnímu přechodu z tetragonální na kubickou fázi [31]. Tyto negativa zatím brání většímu komerčnímu použití perovskitových technologií. Další překážkou je, životnímu prostředí, toxické olovo. Perovskitové materiály jsou zatím ve valné většině na bázi olova [9].

Deformace, nebo mimo jiné, i posunutí pole aniontu kyslíku, které je způsobeno valenční změnou v poloze kationtu A, vede k deformaci oktaedrů s kationty B v jejich středu. Z tohoto důvodu by měl být jako kationt B vybrán prvek s potřebnou flexibilitou. Jako nejvhodnější se považují prvky přechodných kovů [30].

Možnost výběru vhodných prvků na místo kationtů A a B dává vzniknout různým typům komplexních látek se zvláštními vlastnostmi jako jsou dielektrické vlastnosti, optické vlastnosti, ferroelektricitu, supravodivost a jiné [26]. Perovskitové materiály jsou tedy hojně využívány i v jiných

oblastech než ve fotovoltaice jako například v LED, fotodetektorech, nanolaserech a vlnovodech [33]. Různým složením lze ladit i šířku zakázaného pásu v rozmezí 1,5 – 2,3 eV [34].

V této práci se pracuje s hybridními organicko-anorganickými metalhalidovými perovskity. Tyto perovskitové materiály disponují vysokou účinností [35]. Kromě vysoké účinnosti je jejich další výhodou jejich levná, snadná a časově nenáročná výroba. Časté typy přípravy jsou jednokrokové, dvoukrokové depozice či nanesení z plynné fáze. Také v porovnání s křemíkovou technologií stačí mnohem tenčí vrstva fotovoltaického aktivního materiálu, a to až tisíckrát (typicky 500 nm oproti 200 μm křemíkové vrstvy) [34]. Pro typickou strukturu krystalických zrn perovskitového materiálu se můžeme podívat na obrázek 6. Dalšími výhodnými vlastnosti těchto perovskitů je vysoký absorpční koeficient, vysoká pohyblivost nosičů či delší životnost nosičů. Nevýhodou je, prozatím, degradace výkonu [35].



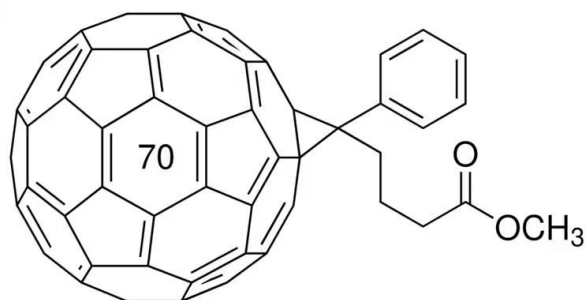
Obrázek 6 - vzorek s vrstvou $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ na skle, mikrofotografie krystalických zrn, převzato z [34]

2.7 Elektronová transportní vrstva (ETL)

Vrstva přenášející elektrony (ETL) je další z důležitých vrstev perovskitového článku. Vlastnosti ETL jsou důležité pro výsledný fotovoltaický účinek. Hlavní funkční vlastnosti ETL v p-i-n nebo n-i-p článcích jsou extrakce elektronů z perovskitového absorbéru a transport elektronů ke kontaktní elektrodě, usnadnění lepšího pokrytí/kontaktu mezi perovskitem a elektrodou. V závislosti na typu článku může působit i jako energetická bariéra blokující transport děr, vrstva odolná proti vlhkosti, bariéra proti difúzi kovových iontů či jiné. Materiál přenášející elektrony (ETM) by tedy měl plně pokrývat perovskitovou vrstvu, aby se zabránilo vzniku děr, měl by mít vysokou optickou propustnost a vhodný index lomu, aby se snížily optické ztráty. Mimo jiné by měl mít vhodnou pozici/uspořádání mezi minimem vodivostního pásu, nejnižším neobsazeným molekulovým

orbitalem a minimem vodivostního pásu perovskitu pro extrakci elektronů. V neposlední řadě by měl mít dostatečně vysokou pohyblivost elektronů pro jejich účinný transport v ETL. ETM má vykazovat dobrou stabilitu a vhodné výrobní podmínky, kompatibilní s předchozími a následnými materiály a procesy při výrobě p-i-n článku. V oblasti výroby perovskitových článků se používají jak organické, tak anorganické ETM. Obecně platí, že organické materiály mají nižší výrobní náklady, zatímco anorganické materiály mají vyšší tepelnou a dlouhodobou stabilitu [36]. V mém případě se používá organický materiál, a to PCBM.

PCBM, methylester kyseliny [6,6]-fenyl-C71-butanové, je jedna z nejužívanějších organických struktur jako ETL v p-i-n článcích [36].



Obrázek 7 – struktura PCBM, převzato z [37]

2.8 Depozice horních kontaktů ITO

ITO se nanáší pomocí techniky zvané naprašování. Naprašování je hojně rozšířená technika nanášení tenkých vrstev na vybrané substráty. V této metodě se bombarduje zdrojový materiál, jinak řečeno terč, ionty. V důsledku tohoto bombardování ionty se rozprašuje právě zdrojový materiál [38]. Druhů naprašování je velké množství, například diodové rozprašování, reaktivní naprašování nebo naprašování iontovým paprskem [39]. Nejběžnějším, a i mým, přístupem k depozici tenkých vrstev naprašováním, je naprašování za použití magnetronového zdroje. V magnetronovém zdroji kladné ionty (například argonu), které jsou přítomny v plazmatu magneticky zesíleného žhavého výboje, bombardují terč (katodu) [38]. Iontové bombardování krom odstranění cílových atomů způsobuje také emisi sekundárních elektronů z rozprašovaného terče. Díky těmto sekundárním elektronům se ionizuje naprašovaný plyn, a tím napomáhá vzniku plazmatu a udržuje proces naprašování [40]. Tento druh naprašování má několik výhod. Během naprašovacího procesu nedochází ke zvýšení teploty substrátu ani k jeho radiačnímu poškození. Mimo jiné je samotná depozice rychlejší než u jiných běžných naprašovacích metod [38].

2.9 Depozice horních kontaktů ze stříbra

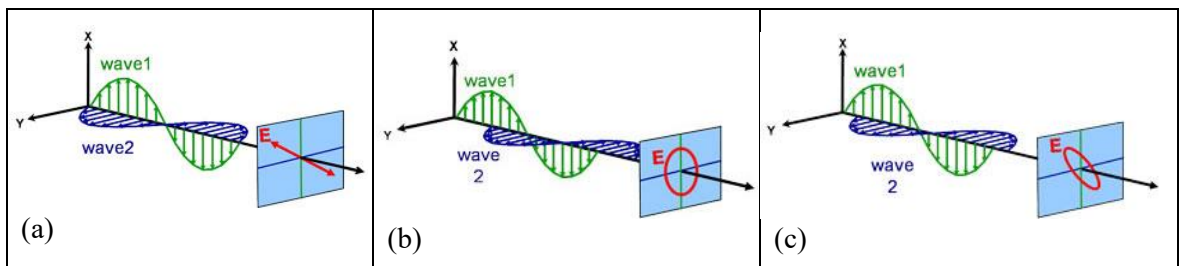
Stříbrné horní kontakty se nanáší technikou zvanou napařování. V této metodě se napařovaný materiál buď v pevné nebo kapalně formě přeměňuje na páru. Následně se ve formě páry přemísťuje vakuem či nízkotlakým plynným prostředím na substrát, na kterém zkondenzuje [41]. Typů vakuového napařování máme opět více. Patří mezi ně například konvekční vakuové napařování, epitaxe molekulárním paprskem (MBE), odpařování elektronovým paprskem či reaktivní odpařování [39]. V mém případě je použita nejpoužívanější metoda napařování pomocí odporového ohřevu. Odporový ohřev je charakteristický tím, že se odpařovaný materiál vloží na zdroj tepla, který má vyšší bod tání, než je bod tání právě odpařovaného materiálu. Jako další vlastnosti musí zdroj být schopen udržet náboj a také nesmí být s odpařovaným materiálem chemicky reaktivní. Zdroje mohou být ve formě spirály, kelímku či lodičky [42].

2.10 Elipsometrie

Elipsometrie je měřicí metoda, která měří změnu polarizace při odrazu nebo přenosu světla od struktury materiálu. [43]. V mém případě se pomocí elipsometrie změní svrchní vrstva naprášené vrstvy ITO.

Změna polarizace je dána jako poměr amplitudy Ψ a fázového rozdílu Δ . Výsledek tedy závisí na optických vlastnostech a tloušťce vrstvy jednotlivých materiálů. Elipsometrii užíváme ke stanovení tloušťky vrstvy a optických konstant. Mimo jiné i ke charakterizaci složení, krystalinity, drsnosti, koncentrace dopování a dalších vlastností spojených se změnou optické odezvy. [43]

Pro elipsometrii je důležité znát pojmy polarizované světlo a polarizace. Polarizované světlo popisujeme jako elektromagnetické vlnění, šířící se prostorem. Polarizace se chápe jako chování elektrického pole vlny v čase a v prostoru. Elektrické pole je vždy kolmé na směr šíření, z toho důvodu lze vlnu šířící se ve směru popsat složkami x a y. Polarizované světlo je elektrické pole sledující určitou dráhu a v každém bodě vytyčí určitý tvar. Polarizované světlo rozlišujeme na lineárně polarizované, kruhově polarizované a elipticky polarizované, právě proto je to elipsometrie [44].



Obrázek 8 - lineárně polarizované světlo(a), - kruhově polarizované světlo(b) a elipticky polarizované světlo [44]

Pro určení optických vlastností interakce světla s materiálem se užívají dvě hodnoty, které se obvykle vyjadřují jako komplexní číslo. Komplexní index lomu (\tilde{n}) se skládá z indexu lomu (n) a koeficientu extinkce (k) [45]:

$$\tilde{n} = n + ik \quad (2.1)$$

Optické vlastnosti lze také vyjádřit jako komplexní dielektrickou funkci [45]:

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.2)$$

Mezi těmito dvěma vztahy platí [45]:

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{n}^2 \quad (2.3)$$

Dále platí vztah [45]:

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.4)$$

Kde v je rychlost světla při jeho pohybu v materiálu a c je rychlost světla. Světlo se zpomaluje, když vstoupí do materiálu s vyšším indexem. Kvůli konstantní frekvenci světelných vln se zkracuje vlnová délka λ . Koeficient extinkce popisuje ztrátu energie vlnění v materiálu. Souvisí s koeficientem absorpce, jako [45]:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.5)$$

Světlo v absorbujícím materiálu ztrácí intenzitu podle Beerova zákona [45]:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.6)$$

Koeficient extinkce nám tedy říká, jak rychle světlo v materiálu zaniká [45].

Při interakci světla s materiálem platí Maxwellovy rovnice, to vede k okrajovým podmínkám na rozhraní. Část dopadajícího světla se na rozhraní odrazí a část se propouští pod úhlem lomu. Úhel mezi dopadajícím paprskem a normálou vzorku (θ_i) je roven úhlu odraženého světla (θ_r). Úhel θ_t udává úhel, pod kterým se světlo vstupující do materiálu láme a platí pro něj vztah [46]:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2.7)$$

Toto platí pro každé rozhraní, kde se světlo odrazí a láme. Tyto okrajové podmínky mají různá řešení pro elektrická pole rovnoběžná a kolmá k povrchu vzorku. Proto se světlo rozkládá na ortogonální složky vzhledem k rovině dopadu. Elektrická pole rovnoběžná k rovině dopadu označujeme jako p-polarizovaná, pole kolmá jako s-polarizovaná. Toto popisují Fresnelovy rovnice, které udávají množství světla odraženého a proslého na hranici mezi materiály [46]:

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (2.8)$$

$$t_p = \frac{E_{tp}}{E_{ip}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (2.9)$$

$$r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2.10)$$

$$t_s = \frac{E_{ts}}{E_{is}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2.11)$$

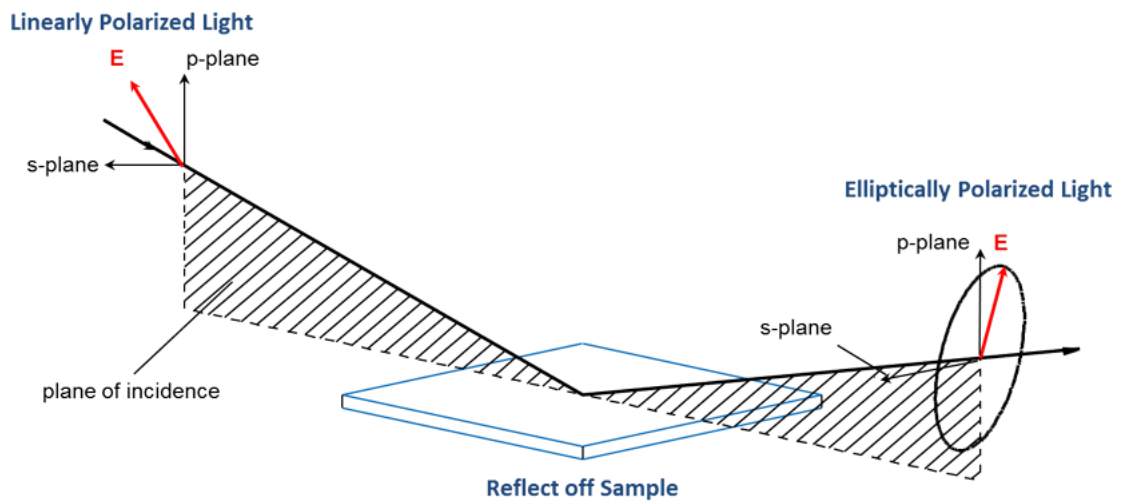
U tenkých vrstev a vícevrstvých struktur se takovýchto rozhraní vyskytuje více. Pro všechny tyto rozhraní platí Fresnelovy koeficienty odrazu a přenosu. Abychom správně určili celkové odražené nebo prošlé paprsky, sledujeme relativní fázi každé složky světla. Tloušťku fáze vrstvy definujeme jako [46]:

$$\beta = 2\pi\left(\frac{d_1}{\lambda}\right)n_1 \cos \theta_1 \quad (2.12)$$

Pro elipsometrii je důležité, jak se vzájemně mění p- a s- složky při odrazu nebo přenosu. Z tohoto důvodu je součástí měření referenční paprsek. Do měřeného vzorku se tedy propouští nebo se od něj odrazí známá polarizace, poté se měří polarizace výstupní. Právě tato změněná polarizace reprezentuje elipsometrické měření, které je vyjádřeno jako [47]:

$$\rho = \tan(\psi)e^{i\Delta} = \frac{r_p}{r_s} \quad (2.13)$$

Obrázek 9 představuje elipsometrické měření vzorku. Dopadající světlo je lineární a je složeno z p- i s- složek. Následně odražené světlo je už rozdílné od toho dopadajícího, jelikož prošlo změnami amplitudovými i fázovými u p- i s- složek. Elipsometrie měří právě tyto změny [47].



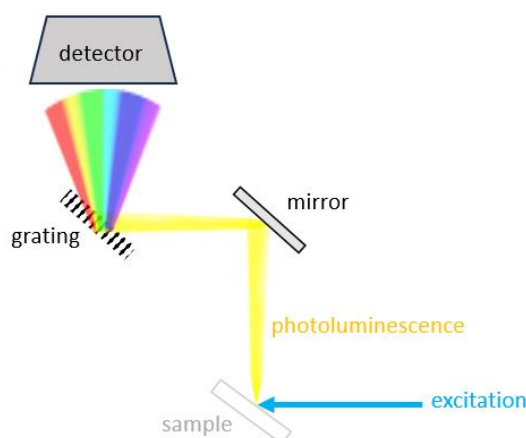
Obrázek 9 - Model elipsometrických měření, převzato z [47]

Pro elipsometrické měření je nutné mít zdroj světla, polarizační generátor, vzorek, polarizační analyzátor a detektor. Poslední dvě části, analyzátor a detektor, jsou složeny z optických prvků, které pracují s polarizací kompenzátorů, polarizátorů a fázových modulátorů. [47].

2.11 Fotoluminiscenční spektroskopie

Jako fotoluminiscence se označuje jev, kdy materiál po absorpci fotonu vyzařuje světlo [48]. Látce, která je schopna fotoluminiscence se přezdívá luminofor. Zpravidla platí, že dopadající záření má menší vlnovou délku než světlo emitované [49]. Známe tři typy fotoluminiscence, a to fluorescence, fosforescence a chemiluminiscence [50]. Jako hlavní typy považujeme fluorescenci a fosforescenci. Fluorescence je téměř okamžité vyzáření elektromagnetického záření, obvykle viditelného světla. Vyzáření se pohybuje cca okolo 8-10 s. Naproti tomu fosforescenci můžeme vnímat spíše jako dozáření i po odstranění zdroje, který fosforescenci vyvolal. Toto dozáření může trvat několik sekund až dny či měsíce [49].

Metoda, kterou se fotoluminiscence měří, se nazývá fotoluminiscenční spektroskopie. Toto měření spočívá v tom, že se vyšlou ze zdroje fotony s vysokou energií a ty excitují elektrony v měřeném vzorku. Následně se, ve většině případů, světlo z luminoforů ihned vyzáří ve formě nízkoenergetických fotonů. Toto vyzáření světlo projde filtrem a tím se odstraní jeho excitační špička. V tento moment už lze zachytit tyto emitované fotony pomocí spektrometru. Spektrometr je zaznamená skrze optické vlákno či přes přímý paprsek. K měření fotoluminiscence tedy potřebujeme spektrometr a monochromatický zdroj světla s nízkou vlnovou délkou [51]. Pro lepší představu, jak měření probíhá se můžeme podívat na obrázek 10. Touto metodou se budou zkoumat fotoluminiscenční vlastnosti perovskitové vrstvy.

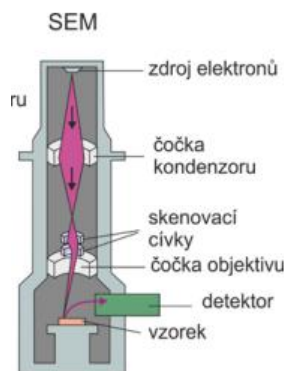


Obrázek 10 – princip měření fotoluminiscence [52]

2.12 Skenovací elektronová mikroskopie

Mimo fotoluminiscence se u perovskitové vrstvy budou zkoumat i další vlastnosti, a to struktura materiálu, velikost a tloušťka zrn této vrstvy nebo nečistoty vyskytující se v této vrstvě. Tyto údaje se posoudí pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM). Tento mikroskop je charakteristický tím, že místo světla používá elektrony ke zvětšení obrazu. Součástí mikroskopu je tzv. elektronové dělo, to se skládá z tlumiče, extraktoru a anody. Z elektronového děla, které je v horní části mikroskopu, je vyslán svazek elektronů. Anoda je na nulovém potenciálu, zatímco hrot vlákna z wolframového drátu je na záporném potenciálu. Extraktor má funkci vytváření silného elektrostatického pole na hrotu vlákna, je tedy umístěn přímo pod hrotem vlákna na kladném potenciálu o hodnotě několika kilovoltů. Aby se elektrony neemitovaly po stranách vlákna, je součástí supresor. Ten je umístěn hned za hrotem vlákna. Napětí mezi anodou a katodou určuje energii elektronů [53].

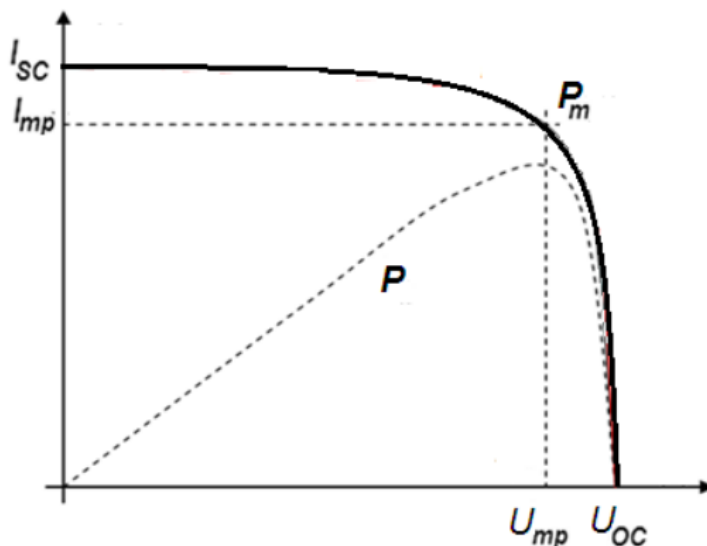
Svazek elektronů prochází svislou dráhou ve vakuu skrze mikroskop. Touto cestou prochází skrze čočky tvořené elektromagnetickým polem, které následně paprsek zaostří dolů na vzorek. Po dopadu paprsku na vzorek jsou z něj vyvrženy elektrony a rentgenové záření. Vycentrování děla má na starost soustava elektromagnetických vychylovacích cívek, které se nachází pod dělem. To je určeno k vychýlení elektronového svazku vysílaného z děla tak, aby dopadl do osy optického systému přístroje. Konečný zobrazovaný paprsek je upraven skrze pevnou clonu aparatury. Tato clona se nachází pod kondenzátorem a centrovacími cívkami. Další důležitou součástí je pomocná mezičočka. To je magnetická čočka, která mění paprsek vstupující do objektivu nebo paprsek zobrazí i v případě, že je objektiv vypnutý. Buzení objektivu určuje povrch vzorku a spodní část pólu objektivu určuje pracovní vzdálenost. Změna excitace pomocné mezičočky zapříčiňuje vychýlení elektronového svazku napříč optickou osou. Z tohoto důvodu je nutná kompenzace pomocí centrovacích cívek. Součástí soustavy je snímací rampa, která je připojena ke skenovacím cívkám. Frekvence rampy určuje rychlost skenování elektronového svazku, její amplituda určuje rozsah pozorovacího pole mikroskopu a také jeho zvětšení [53].



Obrázek 11 – řez elektronovým mikroskopem, převzato z [54]

2.13 Voltampérová charakteristika

Pro určení základních parametrů fotovoltaických článků se měří jejich voltampérová charakteristika. Tedy závislost proudu na napětí. Z té se určují nejdůležitější parametry, a to napětí naprázdno (U_{OC}), proud nakrátko (I_{SC}) a maximální výkon (P_m).



Obrázek 12 - V-A charakteristika fotovoltaického článku, převzato z přednášek prof. Ing. Bandy

Kde napětí naprázdno je napětí na nezatíženém článku. Proud nakrátko je maximální proud, který je článek schopen dodat za daného osvětlení. Maximální výkon je výkon, při kterém je součin proudu a napětí maximální [55]:

$$P_m = U_{mp} \cdot I_{mp} \quad (2.14)$$

Kromě těchto parametrů lze ještě z voltampérové charakteristiky určit činitel plnění FF a účinnost článku η [55].

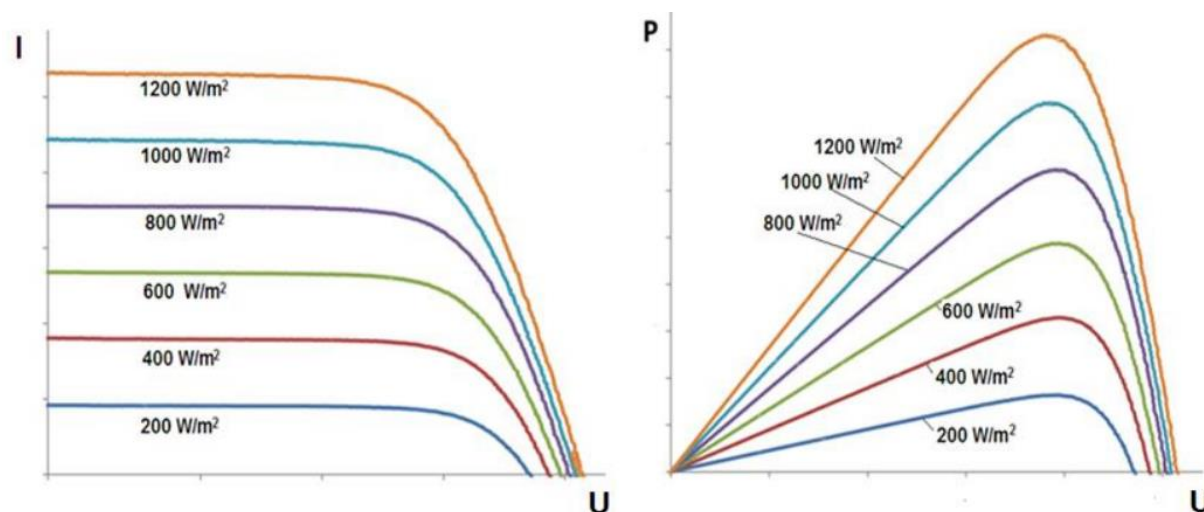
Činitel plnění FF je dán jako poměr skutečného dosažitelného výkonu ku součinu proudu nakrátko I_{SC} a napětí naprázdno U_{OC} . Je to další parametr, který se používá jako měřítko účinnosti [56].

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.15)$$

Poslední důležitý parametr, účinnost, je nejužívanějším parametrem k porovnávání článků mezi sebou. Účinnost je definovaná jako poměr výstupní energie ze solárního článku ku vstupní energii ze Slunce. Účinnost článku mimo jiné závisí i na spektru, intenzitě dopadajícího záření a teplotě samotného článku. Pokud výrobce udává maximální účinnost článku, je to účinnost měřena při teplotě článku 25°C a spektru 1,5AM. Účinnost solárního článku je dána jako [57]:

$$\eta = \frac{U_{OC} I_{SC} FF}{P_{in}} = \frac{U_{mp} I_{mp}}{P_{in}} \quad (2.16)$$

Na průběh voltampérové charakteristiky má vliv teplota a intenzita dopadajícího světla. Se změnou intenzity dopadajícího světla se mění všechny parametry solárního článku. Zpravidla platí, že s rostoucí intenzitou lineárně roste proud na krátko a lehce napětí na prázdno [58].



Obrázek 13 - vliv intenzity záření na VA charakteristiku, převzato z přednášek prof. Ing. Bendy

V této problematice se mimo jiné objevují termíny parazitních odporů sériového a paralelního. Parazitní z toho důvodu, že v ideálním případě je sériový odpor nulový a paralelní nekonečně velký. Ve skutečnosti tomu tak ale samozřejmě není. Sériový odpor nastává hlavně z důvodu průchodu proudu a kontaktním odporem mezi kontakty. Hlavním důsledkem sériového odporu je snížení činitele plnění. S rostoucím sériovým odporem klesá proud nakrátko [59]. Naproti tomu paralelní odpor je způsoben převážně výrobními vadami. Nízký paralelní odpor způsobuje ztrátu výkonu solárního článku. S klesajícím paralelním odporem klesá napětí naprázdno [60].

Kapitola 3

Experimentální část

3.1 Příprava článku

Cílem praktické části bakalářské práce je experimentální výroba perovskitových solárních článků a zkoumání vlivu transparentních elektrod v porovnání se standardem se stříbrnými kontakty. Připravili jsme čtyři druhy roztoků: PTAA (pro přípravu HTL vrstvy), perovskit (pro přípravu absorpční vrstvy), PCBM a BPC (pro přípravu ETL vrstvy).

Pokud není uvedeno jinak, všechna rozpouštědla použitá v práci byla zakoupena od společnosti Sigma Aldrich. Všechny materiály byly použity tak, jak byly obdrženy, bez dalšího čištění. V této práci byly perovskitové tenké vrstvy zpracovány na FEL ČVUT v laboratoři technologie solárních článků (SOLMAT).

Postup přípravy je následující. První den byl připraven roztok poly(triaryl)aminu (PTAA). Roztok byl míchán přes noc při laboratorní teplotě, dále byl připraven roztok perovskitu $\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.6}\text{Br}_{0.4})_3$, roztok byl míchán při 60 °C po dobu 1 hodiny, a následně přes noc při laboratorní teplotě. Mimo jiné byly zhotoveny roztoky methylesteru kyseliny [6,6]-fenyl-C71-butanové (PCBM) a bathocuproinu (BCP). Roztok BCP byl protřepán a ponechán stát při laboratorní teplotě. Posledním krokem bylo čištění komerčně naneseného ITO na skle. Substráty byly čištěny v ultrazvuku v acetonu po dobu 15 min, jednou opláchnuty v 2-propanolu. Poté byly ultrazvukově čištěny v 2-propanolu po dobu 15 min, opláchnuty třikrát v demivodě a čištěny v ultrazvuku v demivodě po dobu 15 min. Naposledy opláchnuty třikrát v demivodě a nakonec sušeny proudem dusíku.

Druhý den se filtroval roztok perovskitu. Roztok perovskitu byl zfiltrován přes PTFE stříkačkový filtr s velikostí pórů 0,2 μm. Následovala sonifikace roztoku BCP. BCP v roztoku bylo nutné rozpustit sonifikací v ultrazvuku po dobu 60 min. Povrch substrátu byl těsně před experimentem ošetřen expozicí v UV-ozonu po dobu 15 min. Následovala depozice PTAA. 75 μl roztoku bylo nanášeno na substrát rotačním nanášením rychlostí 5000 rpm po dobu 30 s. Následně byl vzorek žihán při 100 °C po dobu 10 min. Následuje depozice DMF kvůli úpravě hydrofility povrchu vzorku. Hydrofilita povrchu vzorku byla upravena nanášením 50 μl DMF rychlostí 5000 rpm po dobu 30 s. Ihned po úpravě hydrofility povrchu vzorku bylo nanášeno 100 μl roztoku perovskitu rychlostí 1000 rpm po dobu 10 s s plynulým přechodem na rychlost 5000 rpm po dobu 30 s. Po 25 min rotace bylo do středu vzorku aplikováno 150 μl chlorbenzenu. Po ukončení rotace byl vzorek žihán při 100 °C po dobu 10 či 30 min. Poté proběhla depozice PCBM, kdy bylo nanášeno 100 μl roztoku na vzorek rotačním

nanášením rychlostí 2000 rpm po dobu 30 s. Ihned po nanesení vrstvy PCBM bylo na vzorek aplikováno 100 μ l roztoku BCP rotačním nanášením při rychlosti 4000 rpm po dobu 30 s, rotací byl odstraněn přebytečný roztok a byla vytvořena vrstva BCP.

Všechny depozice na sklíčko probíhaly v dusíkovém gloveboxu. Tedy v dusíkové ochranné atmosféře, kde je minimální množství kyslíku a vlhkosti ve vzduchu. To právě z toho důvodu, že perovskity jsou na obojí velmi citlivé. Pro představu, jak takový glovebox vypadá se můžeme podívat na obrázek 14.



Obrázek 14 - dusíkový glovebox

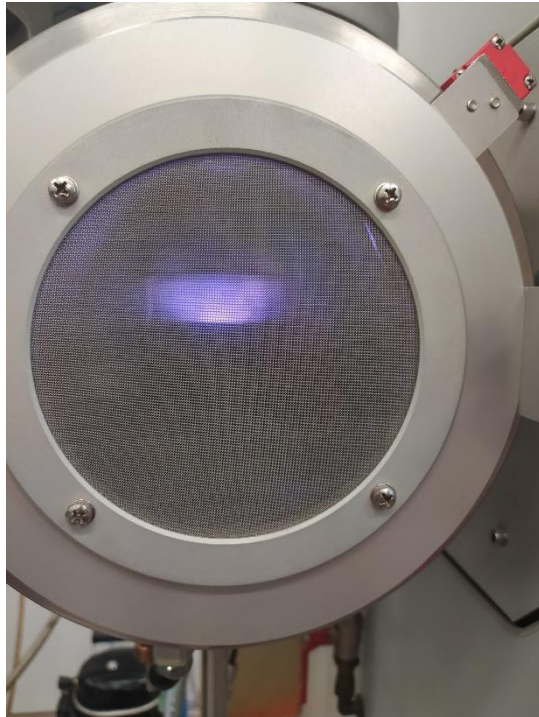


Obrázek 15 – přístroj na rotační nanášení substrátů (vlevo), přístroj na žíhání (vpravo)

Po nanesení vrstev TCO, HTL, perovskitu a ETL zbývá už jen vytvoření kontaktů. Kontakty byly vytvořeny z ITO magnetronovým napařováním nebo ze stříbra vakuovým napařováním. Depozice proběhla při různých nastavení elektrického výkonu a po různě dlouhou nastavenou dobu. Výkony se pohybovaly mezi 40–60 W a nastavené časy mezi 2,5 – 5 min.



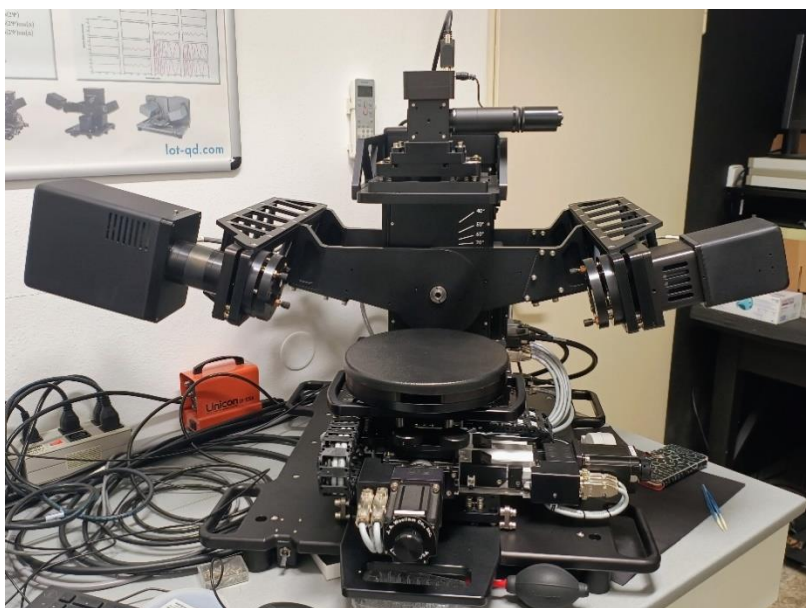
Obrázek 16 - použitá naprašovačka



Obrázek 17 - proces magnetronového naprašování

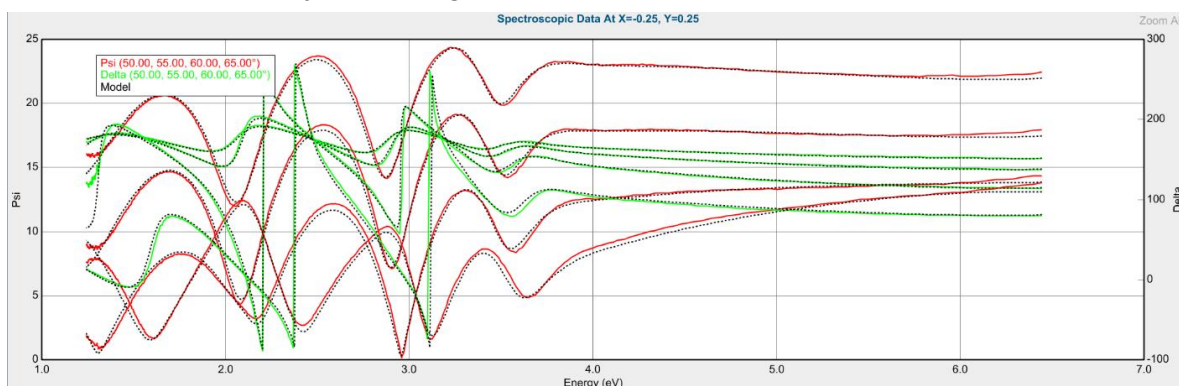
3.2 Měření tloušťky svrchní vrstvy ITO pomocí elipsometrie

Pro vybrané vzorky s kontakty z ITO byla určena tloušťka naprašované vrstvy pomocí elipsometrického měření. Kvůli přehlednosti tohoto měření byly vyrobeny 3 vzorky, kterým se kontakty z ITO naprašily za dvou rozdílných nastaveních elektrického výkonu a pro dvě odlišné doby naprašování. Cílem bylo zjistit, jaký vliv má doba naprašování a nastavený elektrický výkon vliv na tloušťku naprašované vrstvy. Měření proběhlo na elipsometru J.A. Woolan, který můžeme vidět na obrázku 18.

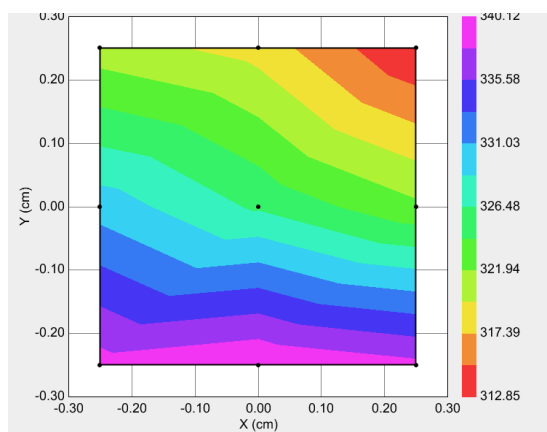


Obrázek 18 - použitý elipsometr

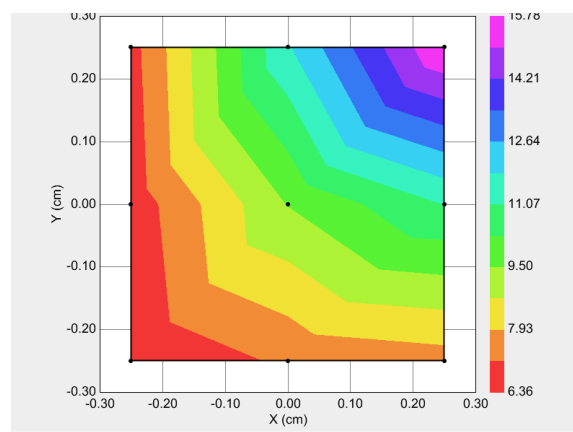
Měření na elipsometru probíhá následovně. Vzorek se položí zhruba na střed terčíku a po zapnutí se analyzátor a detektor posunou do takové pozice, ze které jsou schopni vzorek naměřit. Po nalezení vzorku senzory, může měření začít. Měření se ovládá v přiloženém programu. Elipsometr měří Ψ a Δ v zadaném rozsahu a následně se pomocí matematického modelu dopočítá šířka vrstvy. Po doměření dostaneme spektroskopická data, která vidíme na obrázku 19. Program naměřenou tloušťku a hrubost ukazuje ve formě grafů, které vidíme na obrázcích 20 a 21.



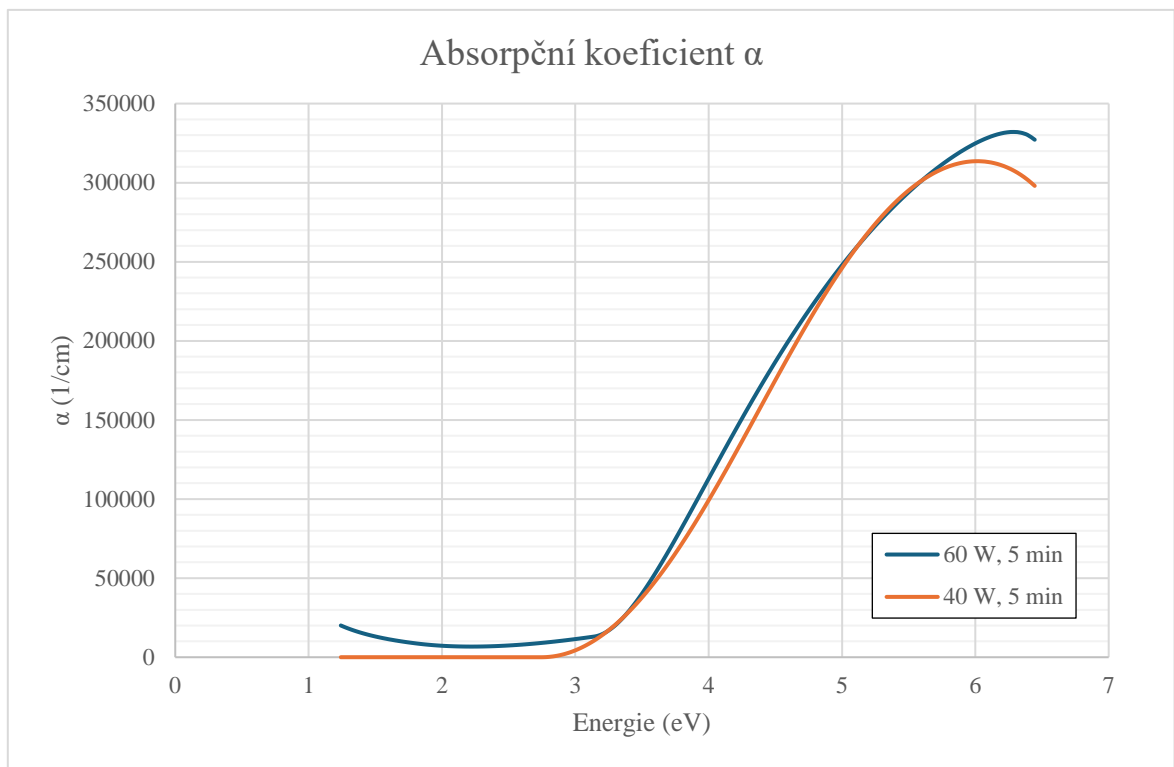
Obrázek 19 - spektroskopická data ITO z depozice 1, 60 W, 5 min



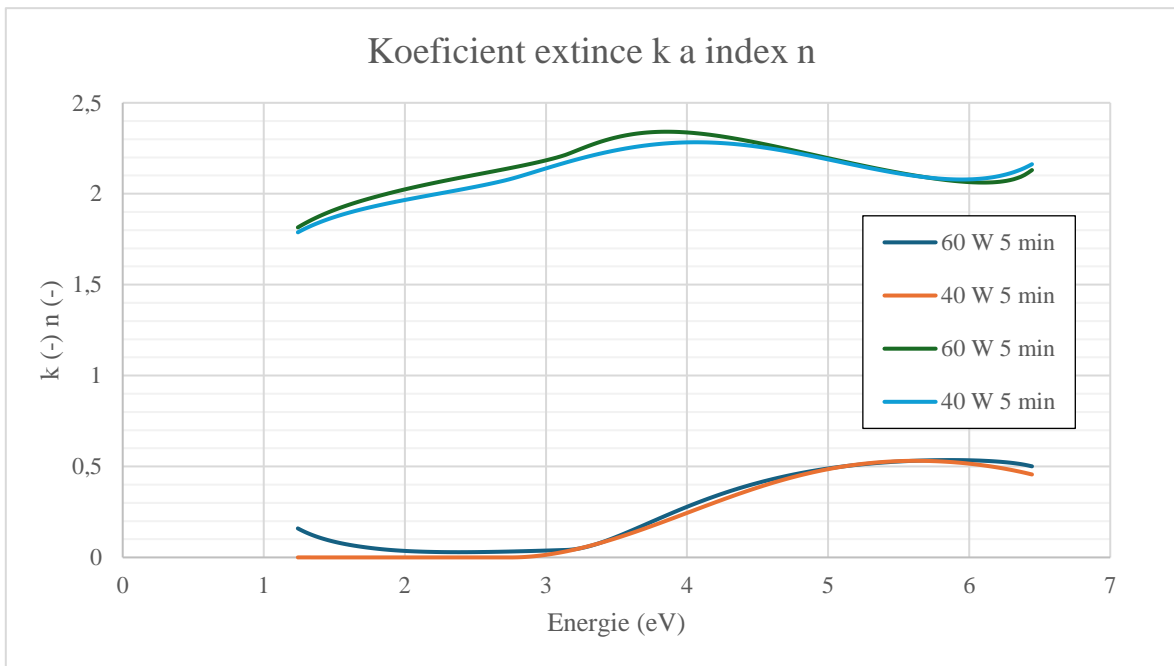
Obrázek 20 - naměřená tloušťka ITO z depozice 1, 60 W, 5 min



Obrázek 21 - naměřená hrubost ITO z depozice 1, 60 W, 5 min



Graf 1 - absorpční koeficient pro vybrané vzorky



Graf 2- koeficient extinkce k a index n pro vybrané vzorky

Vzorek	Naměřená tloušťka [nm]	Naměřená drsnost [nm]
1. 60 W; 5 min	$338,46 \pm 0,04$	$7,58 \pm 0,07$
2. 40 W; 5 min	$210,01 \pm 0,46$	$7,06 \pm 0,11$
3. 40 W; 2,5 min	$105,32 \pm 0,08$	$9,24 \pm 0,04$

Tabulka 1 - naměřené tloušťky vybraných vzorků a jejich drsnost

Z tabulky 1 plyne, že tloušťka naprášené vrstvy je přímo úměrná nastavenému výkonu a době naprašování. Nejtenčí vrstva byla naprášena při nejnižším nastaveném výkonu 40 W, po nejkratší nastavenou dobu 2,5 minut. Měla $105,32 \pm 0,083$ nm. Nejtlustší vrstva byla vyrobena při největším nastaveném výkonu 60 W, po nejdelší nastavenou dobu 5 min. Její tloušťka byla o 233,14 nm větší, a to $338,46 \pm 0,042$ nm.

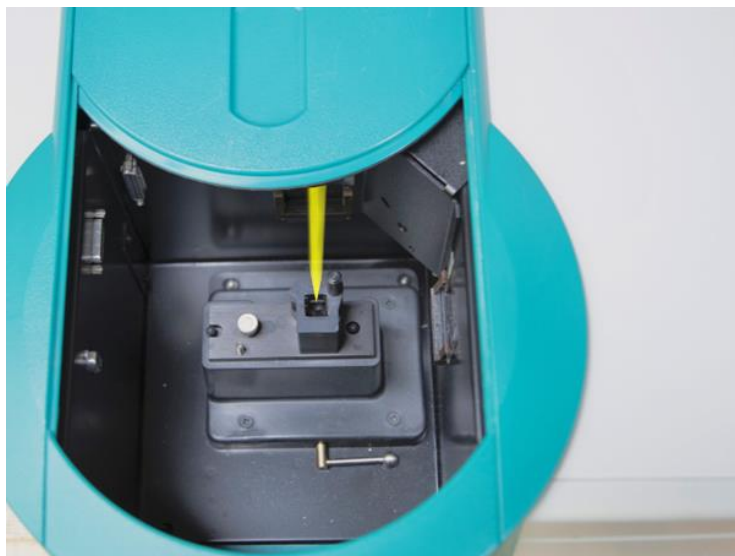
3.3 Měření fotoluminiscence perovskitové vrstvy

Pro měření fotoluminiscenčních vlastností byly vyrobeny vzorky pouze s vrstvou perovskitu nanesenou na sklíčko. Pro porovnání byly vyrobeny vzorky, kdy v jednom případě byl perovskit při depozici žhán 10 minut a v druhém případě 30 minut. Fotoluminiscence se měřila pro oba vzorky v den vyrobení, a poté ještě následující den.

Měření proběhlo na spektroskopu Cary Eclipse, který můžeme vidět na obrázku 22. Vybraný vzorek se uchytí pomocí malých kovových nožiček k nástrojové destičce a následně se uloží do zařízení.



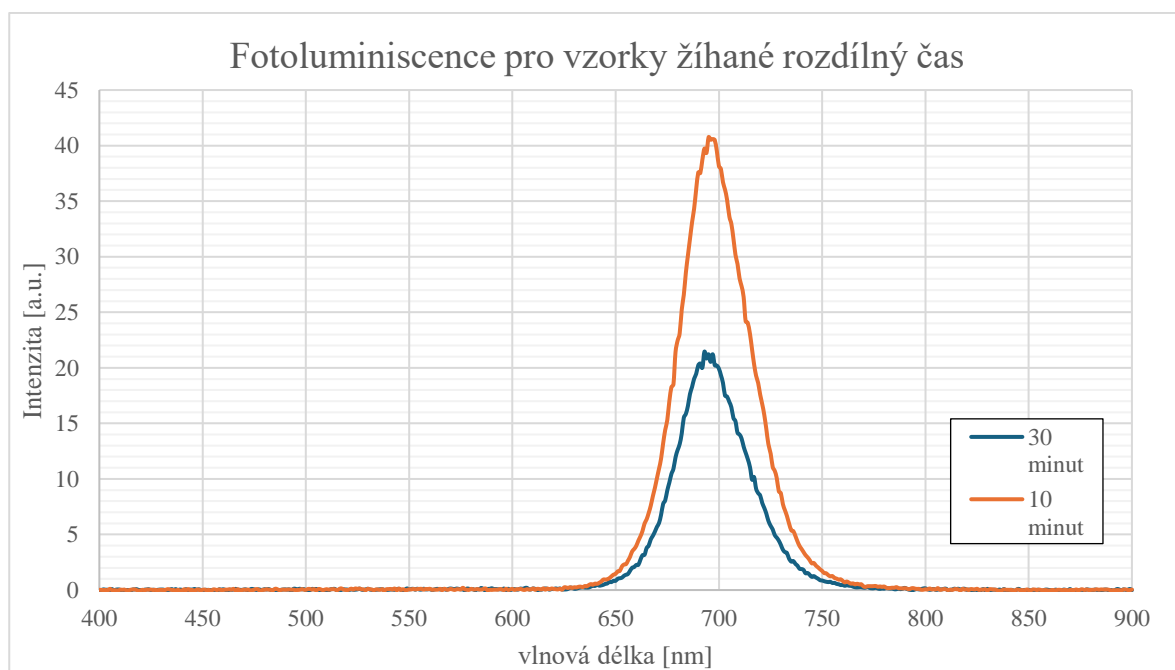
Obrázek 22 - Fluorescenční spektrometr Cary Eclipse



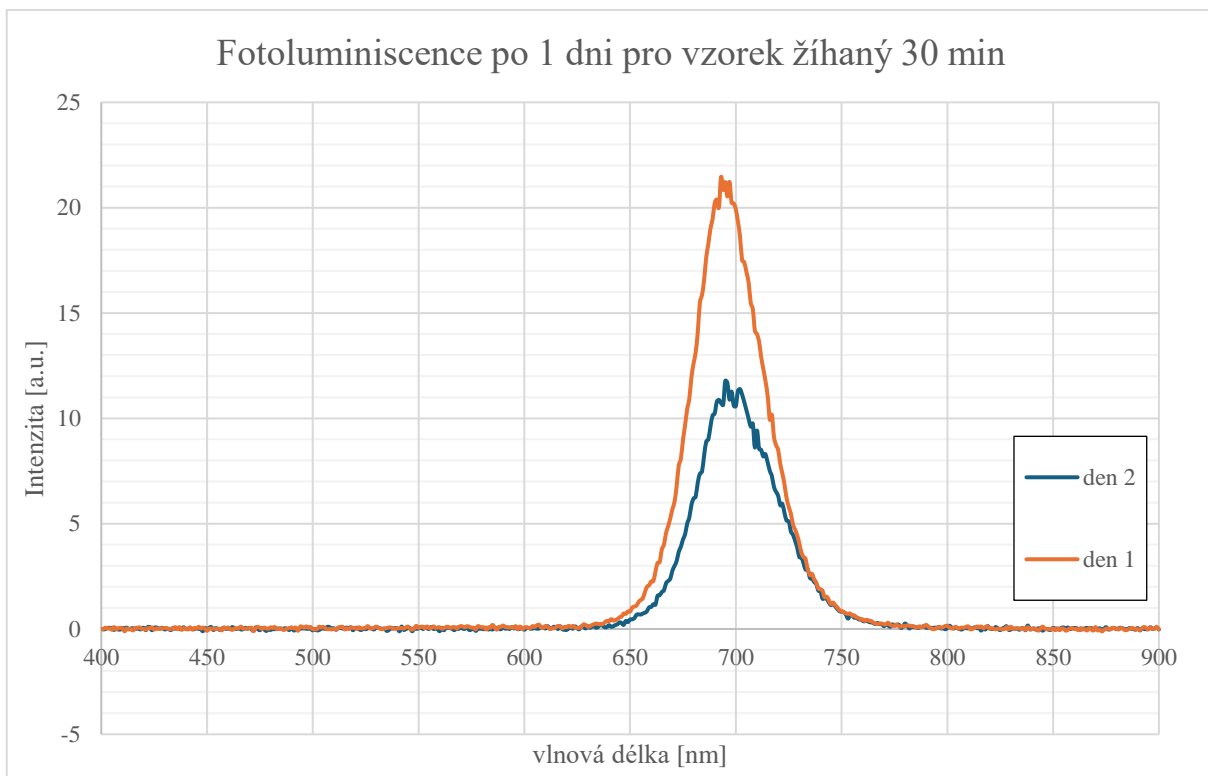
Obrázek 23 - uvnitř fotoluminiscenčního spektroskopu

Měření se opět spouští v příslušném počítačovém programu. Měření se začíná na kontrolním vzorku a až poté se začne s vybranými vzorky.

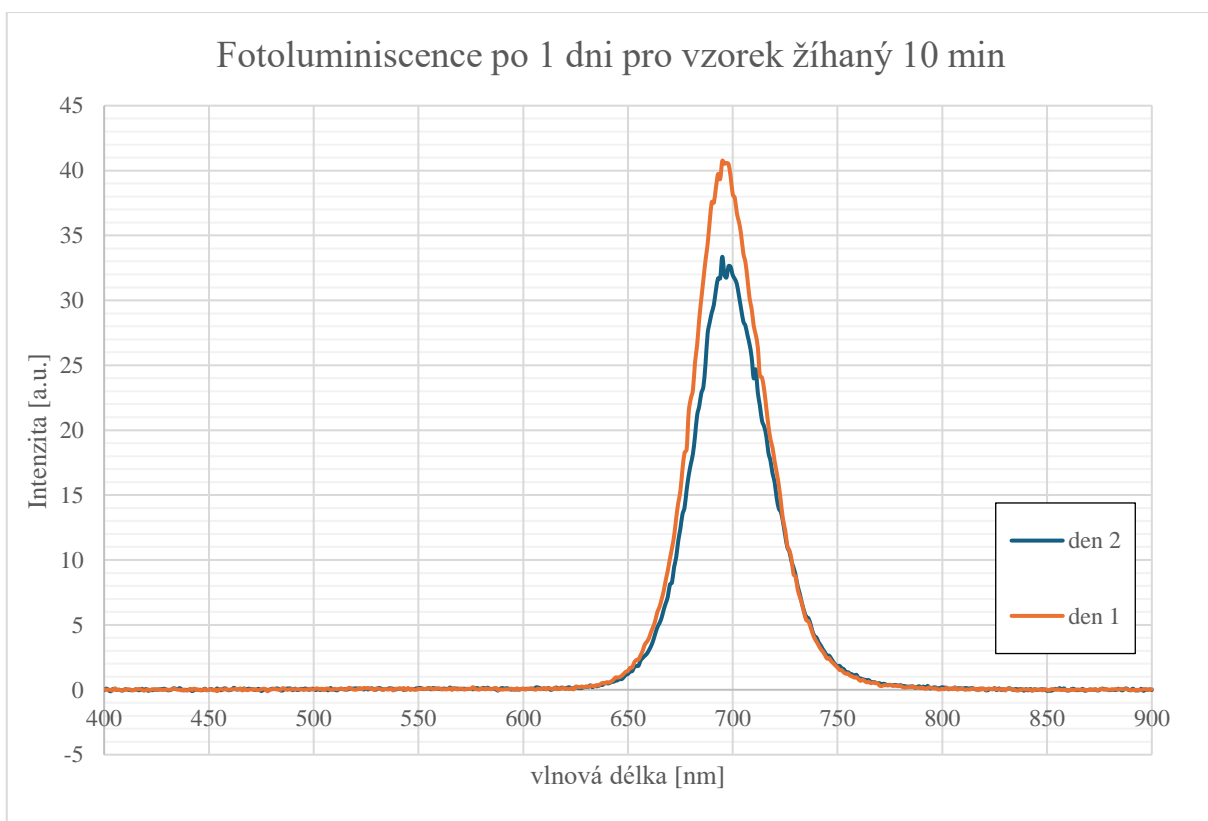
Naměřené výsledky vidíme na grafech 3-5. Pro porovnání vzorků žíhaných rozdílné časy se podíváme na graf 3. Oba vzorky mají peak intenzity na stejné vlnové délce, a to přibližně na 700 nm. Amplituda intenzity se už však liší. Vzorek žíhaný kratší dobu dosahuje vyšší intenzity, a sice skoro až 2x vyšší. Jak se fotoluminiscence u obou vzorků lišila po jednom dni, vidíme na grafech 4 a 5. Vzorek žíhaný 10 minut opět dosahuje lepších výsledku. Nedegraduje tolik, jako vzorek žíhaný 30 minut. Intenzita se pro něj změnila o 18 %. Pro druhý vzorek až o 45 %.



Graf 3 - naměřená fotoluminiscence pro vzorky žíhané rozdílnou dobu



Graf 4 - změna fotoluminiscence vzorku žíhaného 30 minut po 1 dni



Graf 5 - změna fotoluminiscence vzorku žíhaného 10 minut po 1 dni

3.4 Zkoumání perovskitové vrstvy pomocí elektronového mikroskopu

Krystalografická struktura jak perovskitu žíhaného 10 minut, tak perovskitu žíhaného 30 minut, byla zkoumána pomocí elektronového mikroskopu MAIA3 Tescan. Tento elektronový mikroskop můžeme vidět na obrázku 24.

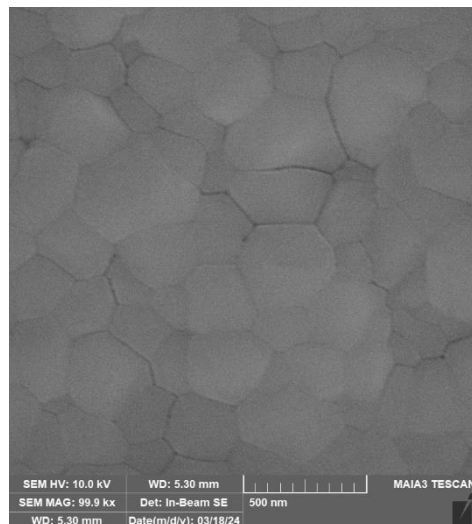
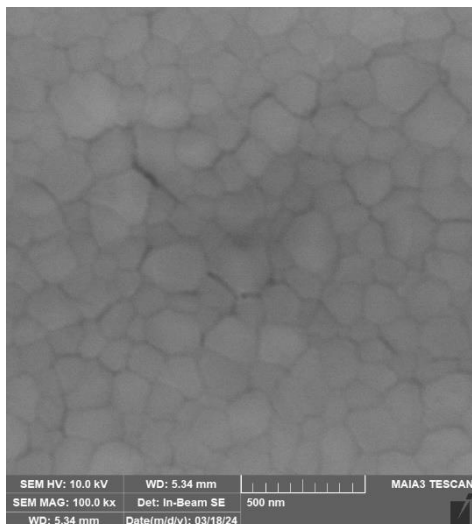


Obrázek 24 - elektronový mikroskop



Obrázek 25 - detail, jak se vzorek do mikroskopu ukládá

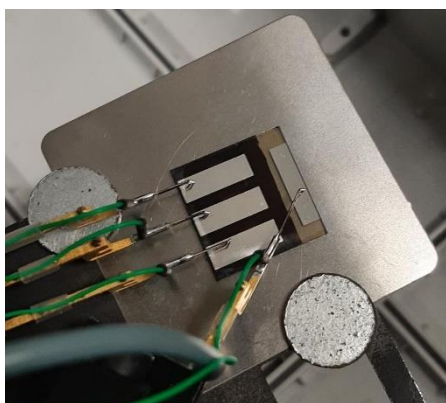
Po vložení vzorku do mikroskopu a zasunutí výsuvné části se s mikroskopem manipuluje v ovládacím programu. V programu lze nastavit posun terčiku či potřebné zvětšení. Pro zkoumání vzorků bylo zvoleno zvětšení v rozmezí od dvaceti tisíc do sto tisíc. Při zvětšení sto tisíckrát je struktura nejlépe viditelná a můžeme si ji prohlédnout na obrázcích 26 a 27. Na obrázcích je zobrazeno měřítko, které v tomto případě odpovídá 500 nm. Z obrázků můžeme pozorovat, že krystalické struktury vzorků odpovídají krystalické struktuře v teoretické části. Vzájemně mezi vzorky však vidíme odlišnosti. Vzorek žíhaný 10 minut má poměrně výrazně menší krystalická zrna oproti vzorku žíhanému 30 minut. Na měřítku se například pro vzorek žíhaný 10 minut vejde odhadem 5 zrn, zatímco pro vzorek žíhaný 30 minut necelá 2 zrna.



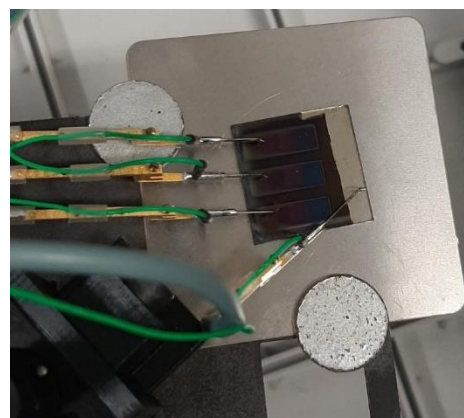
Obrázek 26 - vzorek žíhaný 10 minut, zvětšení 100kx Obrázek 27 - vzorek žíhaný 30 minut, zvětšení 100kx

3.5 Měření voltampérové charakteristiky

Měření voltampérové charakteristiky probíhalo tzv. čtyřkvadrantovou metodou. Při této metodě se nastavuje napětí a současně se měří proud. Jak byly vzorky nakontaktovány vidíme na obrázcích 28 a 29.



Obrázek 2148 - nakontaktovaný článek se stříbrnými kontakty



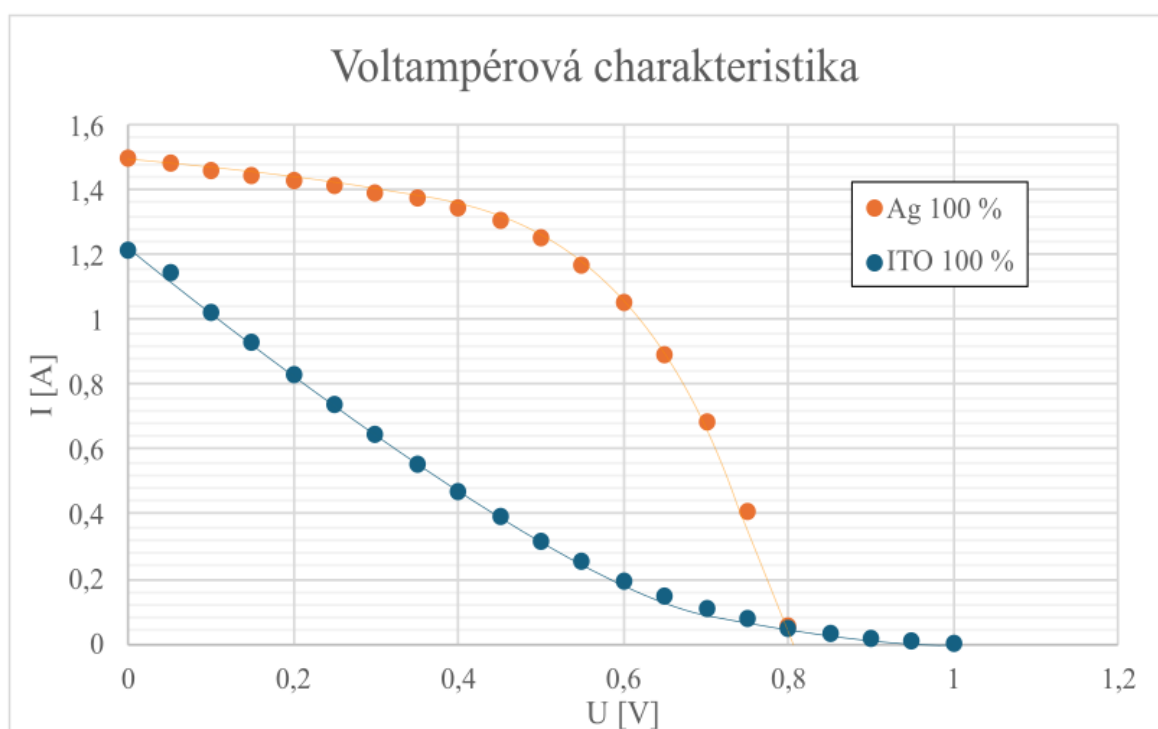
Obrázek 29 - nakontaktovaný článek s kontakty z ITO

Než proběhne čtyřkvadrantové měření je nutno článek osvětlit. Proto je nastaven světelný zdroj na zvolenou intenzitu světla. Aby světlo dopadalo na správnou stranu článku, je vzorek připevněn do aparátu, se kterým se dá otáčet. Jak se vzorek ukládá pod zdroj světla vidíme na obrázku 30, je to nakontaktovaný vzorek, jak můžeme vidět u obrázků 28 a 29, jen otočen vzhůru nohama. Na obrázku 30 vidíme prst, který ukazuje na tři čtverečky. V každém ze všech tří okýnek je jedna elektroda, na kterou následně dopadá světlo. Jedno okénko má velikost 3 mm x 3 mm. Vzorek je osvětlen světelným zdrojem o výkonu 1000 W/m².

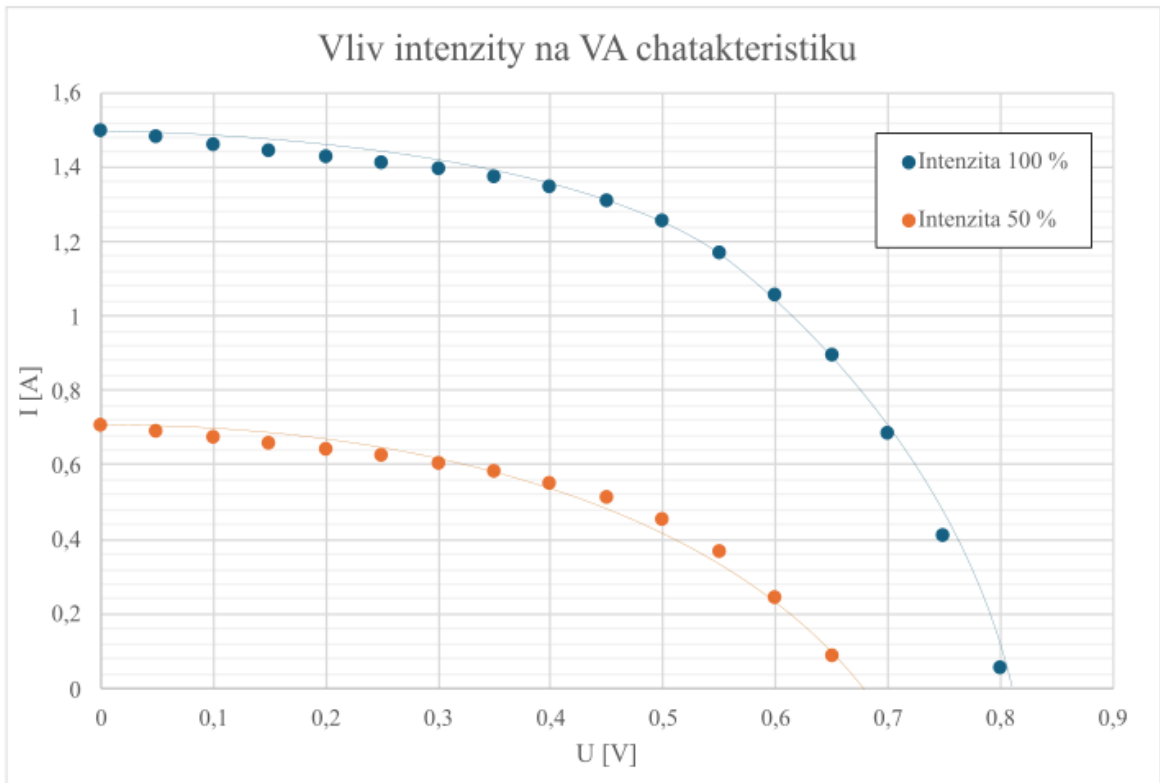


Obrázek 30 - ukázka, jak se vzorek ukládá pod světelný zdroj

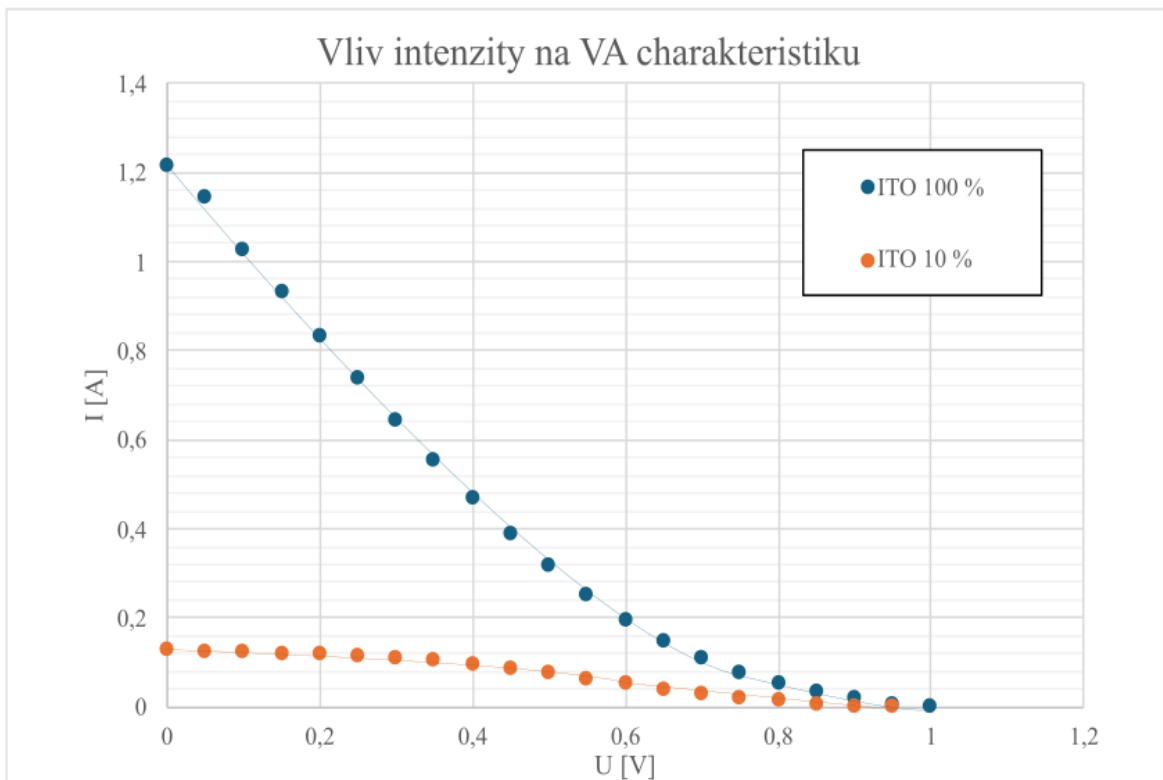
Voltampérová charakteristika byla měřena na všech vyrobených člancích, které byly úspěšně dokončeny. Těch bylo ve výsledku 13, 7 s horními kontakty z ITO a 6 s horními kontakty ze stříbra.



Graf 6 - voltampérová charakteristika pro vzorek se stříbrnými kontakty a pro vzorek s kontakty z ITO



Graf 7 - vliv intenzity záření na VA charakteristiku vzorku se stříbrnými kontakty



Graf 8 - vliv intenzity záření na vzorek s kontakty z ITO

Na grafu 6 můžeme vidět rozdílné výsledky pro články se stříbrnými kontakty a pro články s kontakty z ITO. Článek se stříbrnými kontakty vykazuje lepší výsledky než článek s kontakty z ITO. Na dalších dvou grafech vidíme vliv intenzity záření na voltampérovou charakteristiku. Kdy z teoretické části odpovídá změna předpokladu, že s nižší intenzitou se lineárně sníží proud nakrátko a lehce se sníží napětí naprázdno. To je pěkně vidět na vzorku se stříbrnými kontakty. Pro vzorek s kontakty z ITO tohoto výsledku už docíleno není.

Počítačový program, ve kterém se ovládá toto měření, mimo naměřená data vypíše i odpovídající hodnoty napětí naprázdno, proudu nakrátko a fill factoru. To výrazně ulehčuje výpočet účinnosti článku.

$$\eta = \frac{U_{OC} I_{SC} FF}{P_{in}} \quad (2.16)$$

Kde U_{OC} je napětí naprázdno, I_{SC} napětí nakrátko a FF je fill factor.

Články, jejichž voltampérové charakteristiky jsou zobrazeny výše, dosáhly účinností 7,16 % pro verzi se stříbrnými kontakty a 2,17 % pro verzi s kontakty z ITO. Článek s kontakty z ITO však při nižší světelné intenzitě, nastavené na 10 % z původního výkonu, vykazuje účinnosti vyšší, a to 4,43 %. Tento efekt pravděpodobně nastal z toho důvodu, že vyrobený článek má vysoký sériový odpor. Při nižší intenzitě, a tedy i menšímu průchodu proudu se sériový odpor projevuje méně a činitel plnění se zvětší. S vyšším činitelem plnění se zvětší i účinnost článku. Článek se stříbrnými kontakty se účinnost s nižší světelnou intenzitou, nastavenou na 50 %, snížila na 5,16 %. Účinnosti pro zbylé vyrobené články se až na výjimky zpravidla pohybují mezi 0 a 1 % (viz. příloha Mereni_VA_charakteristik) a to z toho důvodu, že měly vyrobené články zřejmě také velmi vysoký sériový odpor.

Kapitola 4

Ekonomická část

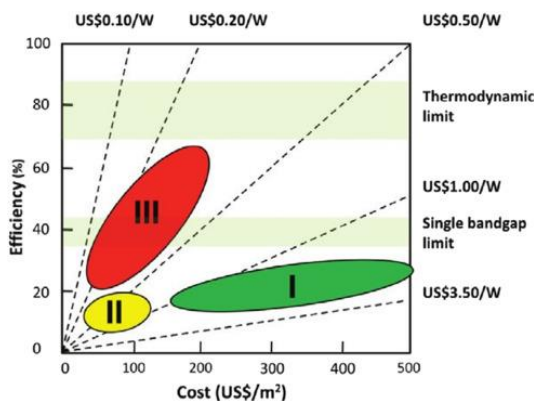
Účelem této kapitoly je ekonomické porovnání tandemové technologie křemík-perovskit s konvenční křemíkovou. K zhodnocení byla nasbírána data o ceně běžně dostupných křemíkových panelů, tj. data z internetových obchodů, ke kterým byly následně přičteny náklady na pořízení celého systému (tzv. Balance of system – BOS). Ceny tandemových modulů byly odhadnuty, jelikož se tandemové moduly stále ještě komerčně neprodávají. Cena byla odhadnuta přičtením stanovené ceny perovskitové technologie, k již nasbíraným datům křemíkových panelů. Tak jsme získali dvě množiny cen systémů (křemík + BOS, tandem + BOS).

Hlavním cílem je posoudit, zda-li je modul ve formě tandemu výhodnější než aktuálně nabízené fotovoltaické moduly. Zhodnocení bude provedeno grafickou metodou (viz. kapitola 4.5). Předpokládá se, že výše BOS může mít zásadní vliv na výběr technologie. Proto ještě na závěr proběhne citlivostní analýza ohledně toho, co se stane s výsledkem, pokud se budou měnit náklady BOS.

4.1 Použitá data křemíkových modulů

Pro porovnání byly použity prodávané křemíkové fotovoltaické panely monokrystalické i multikrystalické dohledané na internetových obchodech zahraničních i domácích. Panely jsou na různé výkonové škále od 40 Wp do 650 Wp. Monokrystalických panelů bylo dohledáno 78 a multikrystalických 21 (viz. příloha Ekonomicka_cast).

Použitá data spadají do fotovoltaické technologie 1. generace a tandemy spadají do 3. generace. Na obrázku 31 vidíme odhady účinností a cen pro tyto dvě technologie. Právě na obrázek 33 navazuje aplikovaná grafická metoda, která tuto metodu rozvíjí použitím nákladů BOS jako další proměnné vstupující do porovnání.



Obrázek 31 - Odhady účinností a ceny pro fotovoltaické technologie první (I), druhé (II) a třetí (III) generace, převzato z [61]

Ke grafickému zhodnocení jsou nasbírána data ohledně solárních článků první generace z dostupných e-shopů. Do shromážděvaných dat byly nasbírány informace ohledně rozměrů panelů, jejich maximální výkon, účinnost a jejich cena.

Rozměr panelu bývá zpravidla v datových listech uváděn v mm jako výška h , šířka w a tloušťka d . Pro výpočet plochy panelu je použita jeho výška a šířka.

$$S = h \cdot w \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.1)$$

Pro následný přepočet ceny na m^2 je použit vzorec:

$$M_{Sim} = \frac{M_{Si}}{S} \text{ [Kč/m}^2\text{]} \quad (4.2)$$

Kde M_{Sim} je cena modulu na m^2 [Kč/ m^2], M_{Si} cena modulu [Kč] a S plocha modulu [m^2].

Maximální výkon P_m je parametr, který se uvádí v jednotkách Wp (Watt peak). Je to výkon, jenž je panel schopen dodávat, ale jen za ideálních podmínek. Tento výkon je naměřený výrobcem při definované ozáření, definované teplotě článku a specifickém spektrálním složení světla [62]. Standardní zkušební podmínky (STC) jsou při ozáření 1000 W/m^2 , teplotě článku $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a při spektru záření 1,5 (AM1,5). To odpovídá v realitě slunečnímu záření dopadajícího za jasného dne na plochu se sklonem 37° a Slunci vůči horizontu pod úhlem $41,81^\circ$ [63]. Takže ve skutečnosti se tato situace vyskytuje jen zřídka.

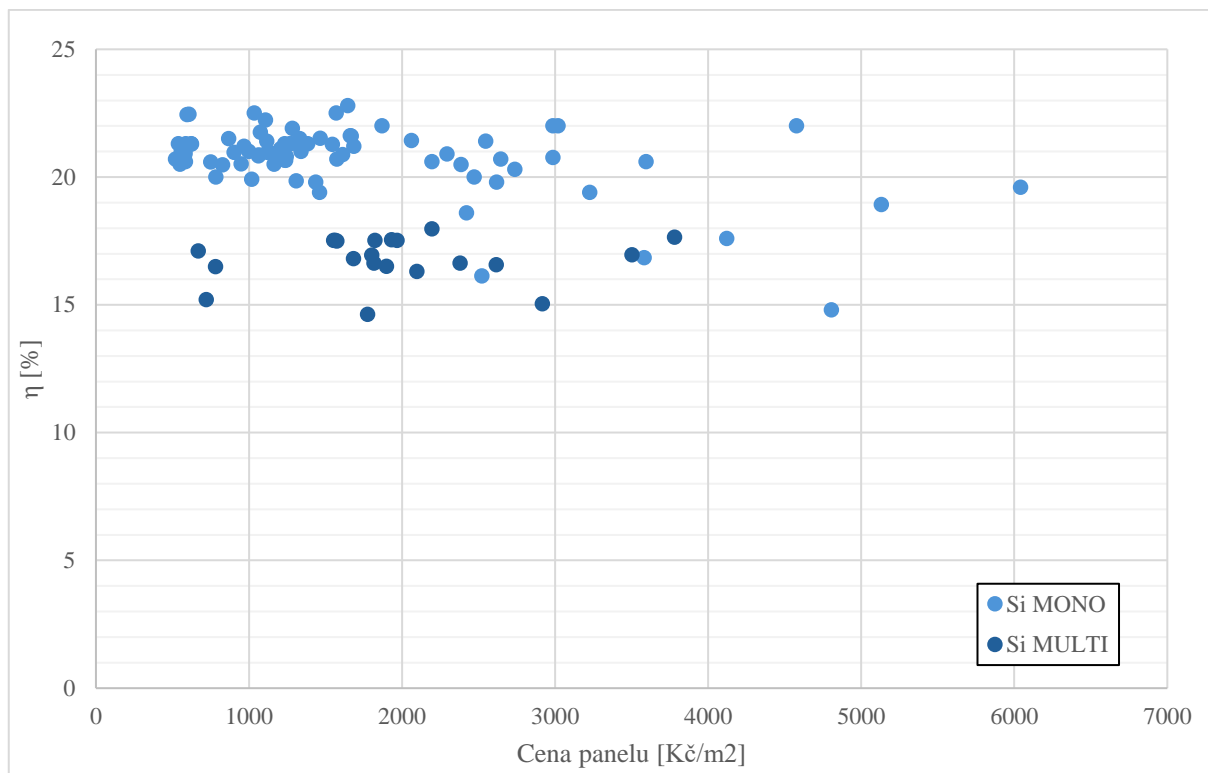
Účinnost panelu je parametr udávající, kolik procent z dopadajícího slunečního záření je panel schopen přeměnit na elektrickou energii. Tento parametr výrobce v datovém listu ve většině případů sám udává. V případě že účinnost nebyla uvedena, byla dopočítána dle vztahu:

$$\eta = \frac{P_m}{S \cdot 1000} \cdot 100 = \frac{P_m}{S \cdot 10} \text{ [%]} \quad (4.3)$$

Kde P_m je maximální výkon [Wp] a S je obsah panelu [m^2], při ozáření 1000 W/m^2 .

4.2 Nasbíraná data

Nasbíraná data byla vykreslena ve formě závislosti účinnosti panelu η na ceně panelu za m^2 (graf 9). Průměrná cena monokrystalických panelů je 1694 Kč a průměrná účinnost 20,7 %. Naproti tomu průměrná cena multikrystalických modulů dosahuje 1954 Kč a účinnost 16,8 %. Multikrystalické moduly jsou tedy zároveň dražší, a i méně účinné. Odpovídá tomu i nabídka na internetu, valná většina je složena z modulů monokrystalických.



Graf 9 - Dostupné solární křemíkové moduly z e-shopů zahraničních i domácích, v závislosti účinnosti na ceně panelu

Do další analýzy byla tedy rovnou použita pouze data z monokrystalických modulů, neboť použití multikrystalických modulů nedává z ekonomického hlediska smysl. Ze stejného důvodu byly vyřazeny moduly o výkonu menší než 200 W.

4.3 Ostatní náklady spojené s pořízením FV modulů – BOS

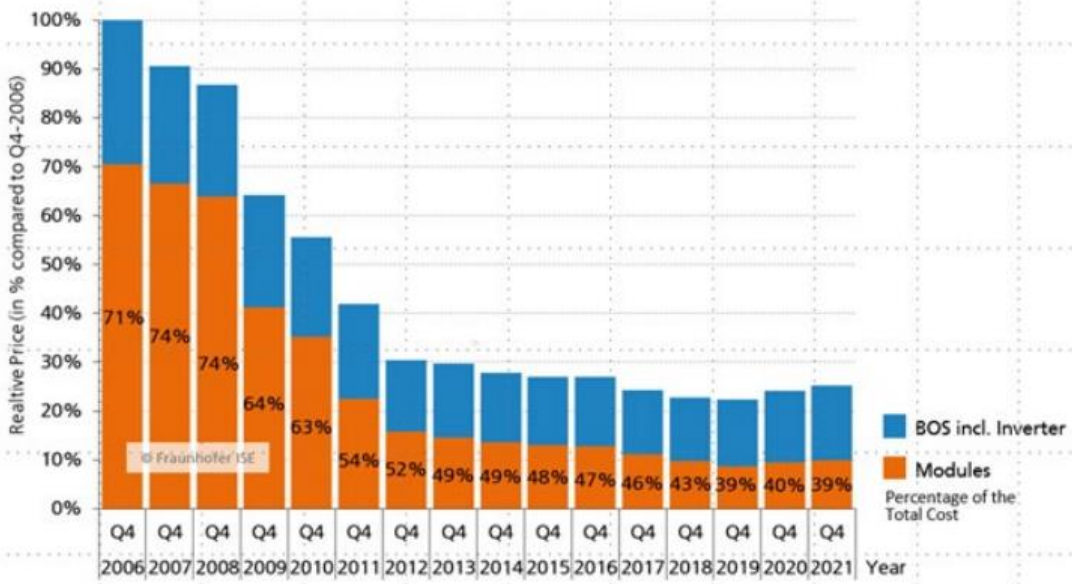
Solární panel je hlavní komponentou fotovoltaického systému. Ostatní části podílející se na jeho fungování jsou však také důležité a jsou nedílnou součástí celého systému. Tyto části označuje zkratka BOS (balance of system). Patří mezi ně například kabely, vypínače, montážní systém, montážní práce, solární střídače aj. Náklady BOS mohou tvořit přibližně dvě třetiny celkových nákladů při pořízení fotovoltaického systému [64].

Jako základ pro stanovení nákladů BOS v naší analýze byl použit obrázek 32, na kterém vidíme vývoj podílu nákladů BOS a nákladů modulů na pořízení elektráren, které jsou ve výkonovém rozmezí 10-110 kWp. Předpokládám, že jakožto zákazník nakupující moduly na e-shopu, nejsem velkoodběratel a stavím si malou elektrárnu pro vlastní objekt. Tedy výkonové rozmezí sedí. Podíl nákladů BOS tak byl stanoven na 61 % z celkových pořizovacích nákladů celého systému. Pro výpočet byla použita průměrná cena na m² všech nalezených FV modulů: 1750 Kč. Průměrná cena BOS na m² vyšla 2736 Kč/m². Pro tandemové technologie se budou uvažovat identické náklady BOS.

BOS [Kč/m ²]	2736,5
--------------------------	--------

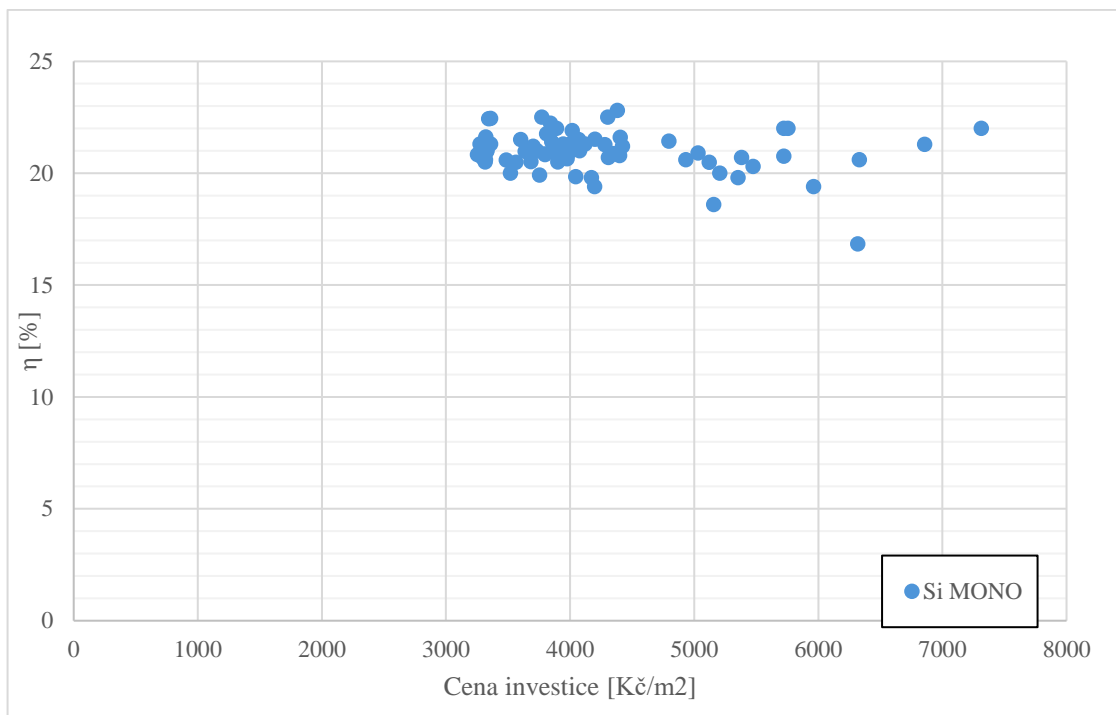
Tabulka 2 – stanovená průměrná cena nákladů BOS na m² pro technologie křemíkové i tandemové

Nejnovější údaj z použité studie je pro rok 2021 a ne rok 2023. Od roku 2018 se však podíl výrazně nemění. Případný rozdílný vývoj v podílu cen za poslední dva roky je tedy zanedbán.



Obrázek 32 - Vývoj průměrné ceny pro koncového zákazníka pro instalované střešní systémy se jmenovitým výkonem 10-110 kWp, převzato z [65]

Po přičtení určené ceny dalších nákladů k pořizovací ceně panelu se body posunou po ose x. To vidíme na grafu 10. Graf 10 tedy udává celkové náklady v závislosti na účinnosti panelu. Každý bod označuje jednotlivé nabídky dohledané na internetu, ke kterým je přičtena právě stanovená průměrná cena BOS. Pro nás jsou nejatraktivnější body s vysokou účinností a malou cenou, protože jsou ekonomicky nejvýhodnější.



Graf 10 – Křemíkové systémy v závislosti účinnosti na celkové vstupní investici

4.4 Určení hodnot pro tandemovou technologii

Vzhledem k nedostatku reálných dat ohledně systémů s tandemovou technologií budou odhadnuty ceny i účinnosti následovně:

Přepoččet již nasbíraných bodů proběhne jak na ose x, tak na ose y. Tedy je nutno přepočítat účinnost tandemových modulů a také jejich cenu.

Na přepoččet účinnosti byly použita data dosažených rekordních světových účinností. Maximální světová účinnost pro křemíkový článek je $\eta_{SiM} = 27,1\%$. Pro tandem je rekord $\eta_{TM} = 33,9\%$. Podílem těchto účinností byl stanoven koeficient $k_{\eta} = 1,25$, kterým se vynásobila nalezená data pro jejich posun po ose y. Tímto koeficientem je tedy odhadnuto, kolikrát by tandemové panely byly účinnější oproti křemíkovým modulům. Posun po ose y je dán následujícím vztahem:

$$\eta_T = \eta_{Si} \cdot k_{\eta} [\%] \quad (4.4)$$

Kde η_T je účinnost tandemových modulů, η_{Si} účinnost křemíkových modulů a k_{η} stanovený koeficient posunu.

Pro přepoččet ceny tandemu byla určena cena z experimentální výroby perovskitových článků z nalezené publikace [66]. Publikací na téma cen perovskitových článků bylo přečteno více. Cena se pohybovala v poměrně velkém rozmezí od 134 Kč/m² do 13 143 Kč/m². Vybraná cena se nejvíce blížila průměru ze všech dohledaných cen. Maxima i minima byla z průměru vyřazena. Na

obrázku 33 vidíme výsledky z vybrané studie pro 5 lehce odlišných typů výroby perovskitových článků společně s nejnižšími a nejvyššími náklady na výrobu modulu. Cena byla vybrána, jako ta nejdražší z níže uvedených mediánů, tedy pro sekvenci C. Dále byla cena přenásobena inflací 27,9 %, jelikož se jedná o studii z roku 2017.

Technology	10 th Percentile	Median	90 th Percentile
Seq A	52	65	82
Seq B	47	60	81
Seq C	57	74	102
Seq D	43	53	67
Seq E	30	37	48

Obrázek 33 - Medián, vysoké a nízké hodnoty celkových nákladů na modul v USD/m² pro každou sekvenci, převzato z [66]

Výsledná cena perovskitového článku M_P byla stanovena na 2234,6 Kč/m².

M_P [Kč/m ²]	2234,6
----------------------------	--------

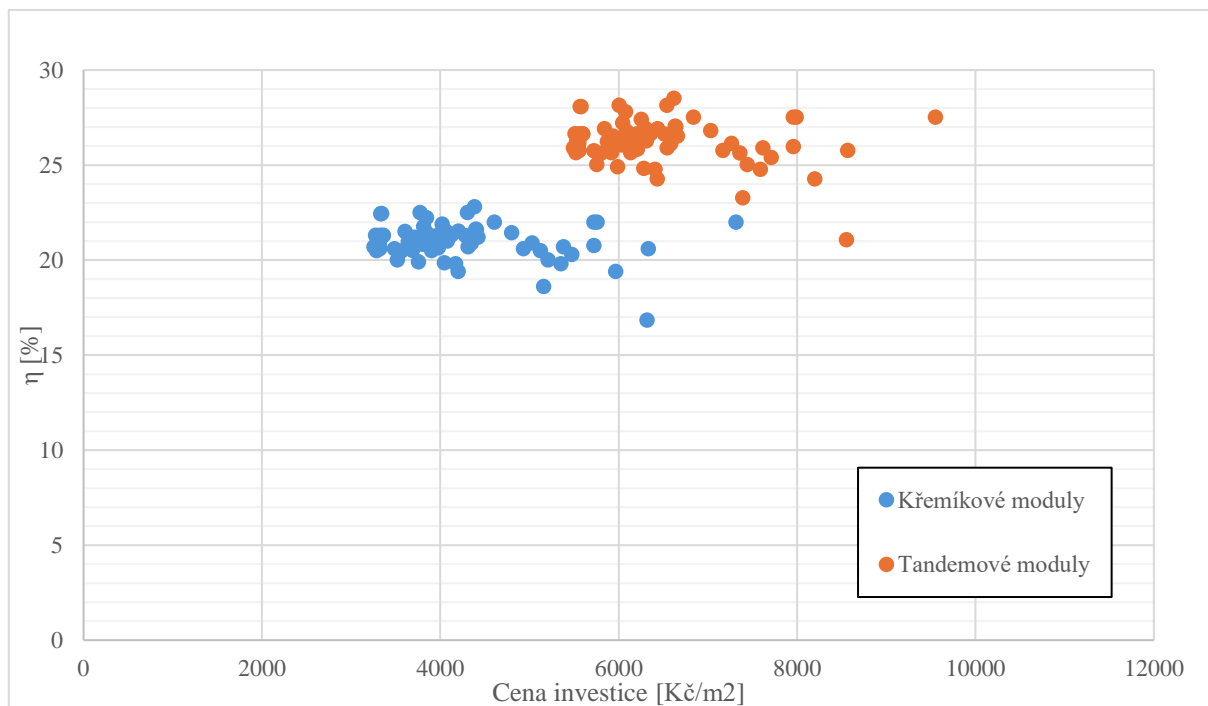
Tabulka 3 - stanovená cena perovskitového článku na m²

Pro přepočítání cen tandemů byla tato určená cena přičtena k cenám křemíkových modulů. Cena experimentálních perovskitových článků se bere jako fixní náklad spojený se složitější výrobou tandemových modulů oproti modulům křemíkovým. Posun po ose x je proto dán vzorcem:

$$M_T = M_{Sim} + M_P \text{ [Kč/m}^2\text{]} \quad (4.5)$$

Kde M_T je cena tandemu [Kč/m²], M_{Sim} cena křemíkových modulů [Kč/m²] a M_P stanovená cena perovskitové vrstvy [Kč/m²].

Výsledné body tandemové technologie v porovnání s daty pro křemíkovou technologii vidíme na grafu 11.

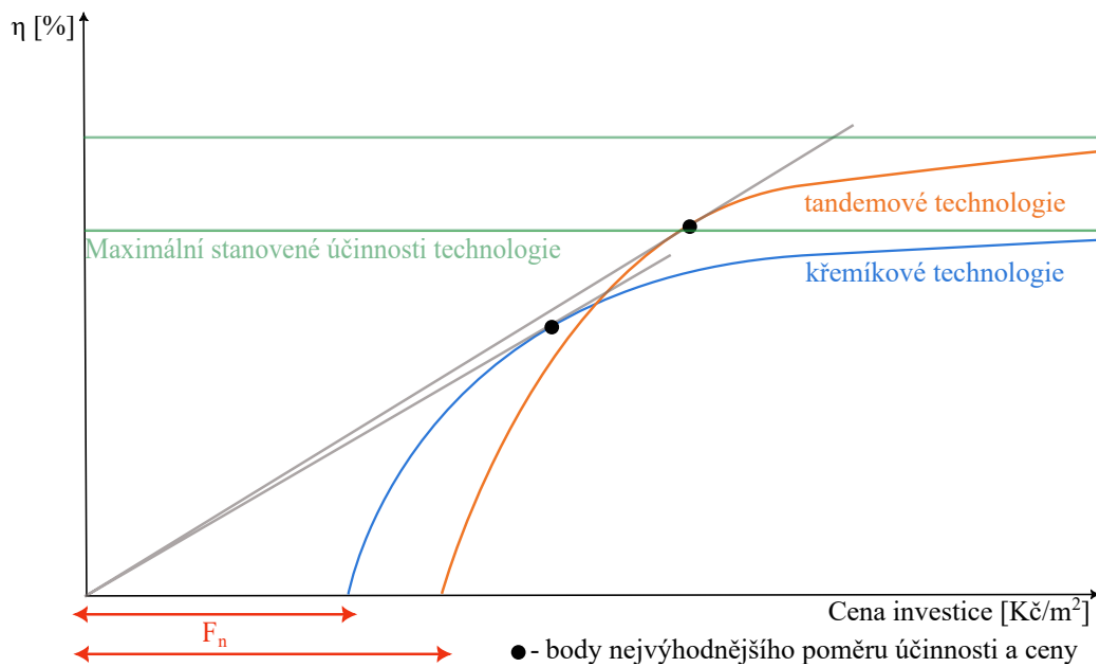


Graf 11 - systémy křemíkové i tandemové v závislosti účinnosti na ceně investice

Odhadnuté uvažované body pro tandemové moduly se pohybují i s přičtenou cenou BOS v cenovém rozmezí od 5 490 Kč/m² do 9 549 Kč/m² s průměrnou cenou za systém 6 457 Kč/m². Průměrná cena za tandemový modul bez nákladů BOS vyšla 3721 Kč/m². Tyto odhadnuté ceny prozatím nelze porovnat s realitou, jelikož se zatím žádné tandemové moduly neprodávají. Účinnost těchto bodů se průměrně pohybuje na 26,2 %. Maximum z odhadnutých účinností dosáhlo 28,5 %. Právě tato odhadnutá maximální účinnost je velmi blízko účinnosti 28,6 %, které se podařilo dosáhnout v květnu loňského roku společnosti Oxford PV na tandemovém článku komerční velikosti [5].

4.5 Grafická metoda

V rámci grafické metody se porovnávají křivky jednotlivých technologií (resp. cen systémů) v závislosti účinnosti na ceně systému na m². Křivky by měly odpovídat skutečnému rozložení prodávaných modulů. Křivka vychází z předpokladu, že s rostoucí účinností panelu se zvyšuje i jeho cena.



Obrázek 34 - ukázka grafického porovnání daných technologií v závislosti účinnosti na ceně investice

Pro bod nulové účinnosti technologií se nepředpokládá nulová cena, nýbrž fixní náklady spojené s pořízením dané technologie, která je pro křemíkové technologie určena jako stanovené náklady BOS a pro technologie tandemové jako náklady BOS a cena za experimentálně vyrobené perovskitové články na m². Horní hranice, ke kterým se křivky asymptoticky blíží, jsou hodnoty předpokládané jako maximální účinnost, které jsou panely dané technologie aktuálně schopny dosáhnout. Pro obě technologie byl horní limit stanoven jako maximum účinnosti, které bylo ve světě dosaženo.

Pro křivky jednotlivých technologií je použita funkce:

$$y = \frac{-c}{(x - a)^g} + b \quad (4.6)$$

Kde koeficient a určuje posun křivky, koeficient b je určená maximální účinnost technologie, koeficient c mění polohu křivky a koeficient g mění strmost křivky.

Koeficient a je dopočítán jako:

$$a = x_0 - \left(\frac{b}{c}\right)^{-\frac{1}{g}} \quad (4.7)$$

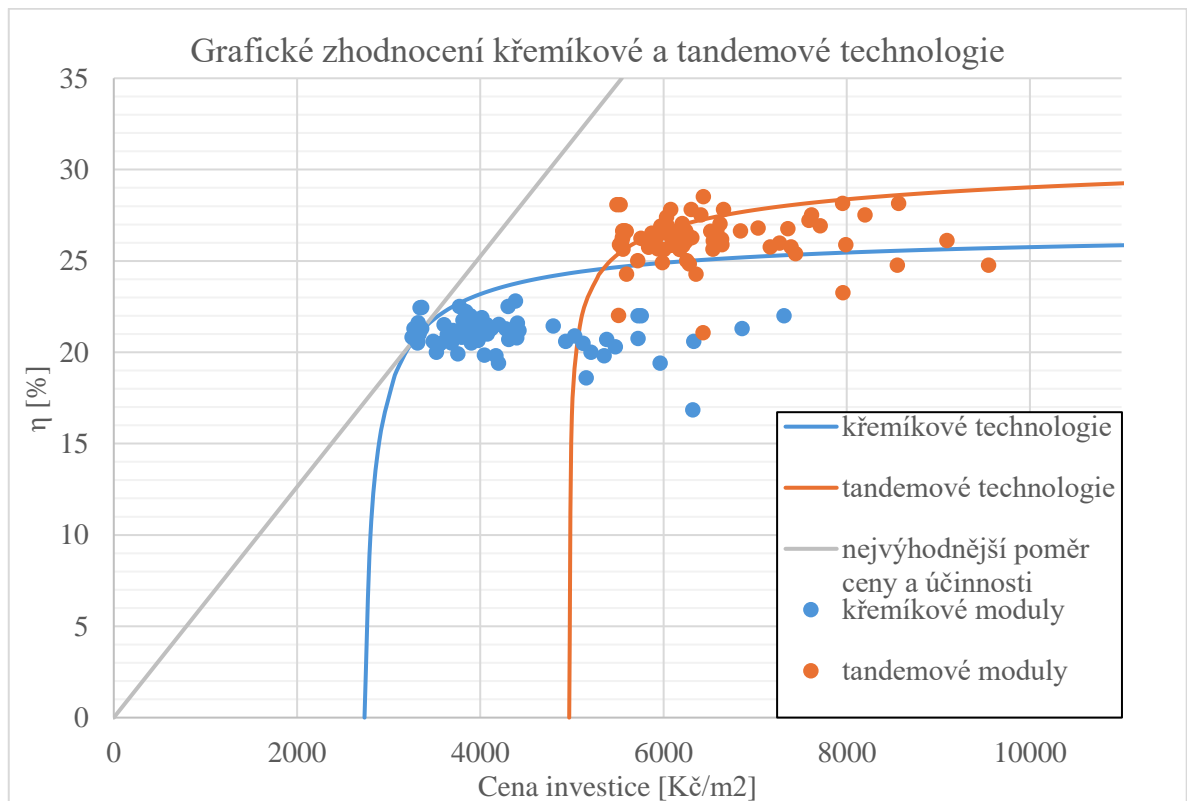
Kde x_0 jsou stanovené fixní náklady technologie.

Výběr optima

Tečna křivek technologií, vycházející z počátku a je tvořena body o stejném poměru ceny a účinnosti, je rozhodujícím faktorem pro to, která z technologií je výhodnější. Tato tečna je v podstatě přímka udávající nejvýhodnější poměr mezi účinností a cenou. Jako nejvýhodnější samozřejmě považujeme přímku, která obsahuje body vysoké účinnosti a nízké ceny. V ideálním případě tedy osu y . Technologie, které jsou vysoce účinné a zdarma. V reálném případě tento stav ale nikdy nenastane. Přímka se tedy postupně sklání a hledá se první tečný bod s udávanými technologiemi, který stanoví optimum a zároveň určí, která technologie je výhodnější. Na obrázku 34 vidíme případ, kdy jsou tandemové technologie ty výhodnější.

4.5 Výsledky grafického zhodnocení

Pro zhodnocení byly vykresleny křivky se stanoveným počátkem v bodě fixních nákladů pro každou z technologií a se stanoveným horním limitem jejich účinností. 27,1 % pro křemík a 33,9 % pro tandem [67].



Graf 12 - Grafické porovnání tandemové a křemíkové technologie

V porovnání jsou vidět křivky technologií, body nalezených křemíkových modulů, přepočítané body tandemových technologií a přímka nejvýhodnějšího poměru ceny a účinnosti.

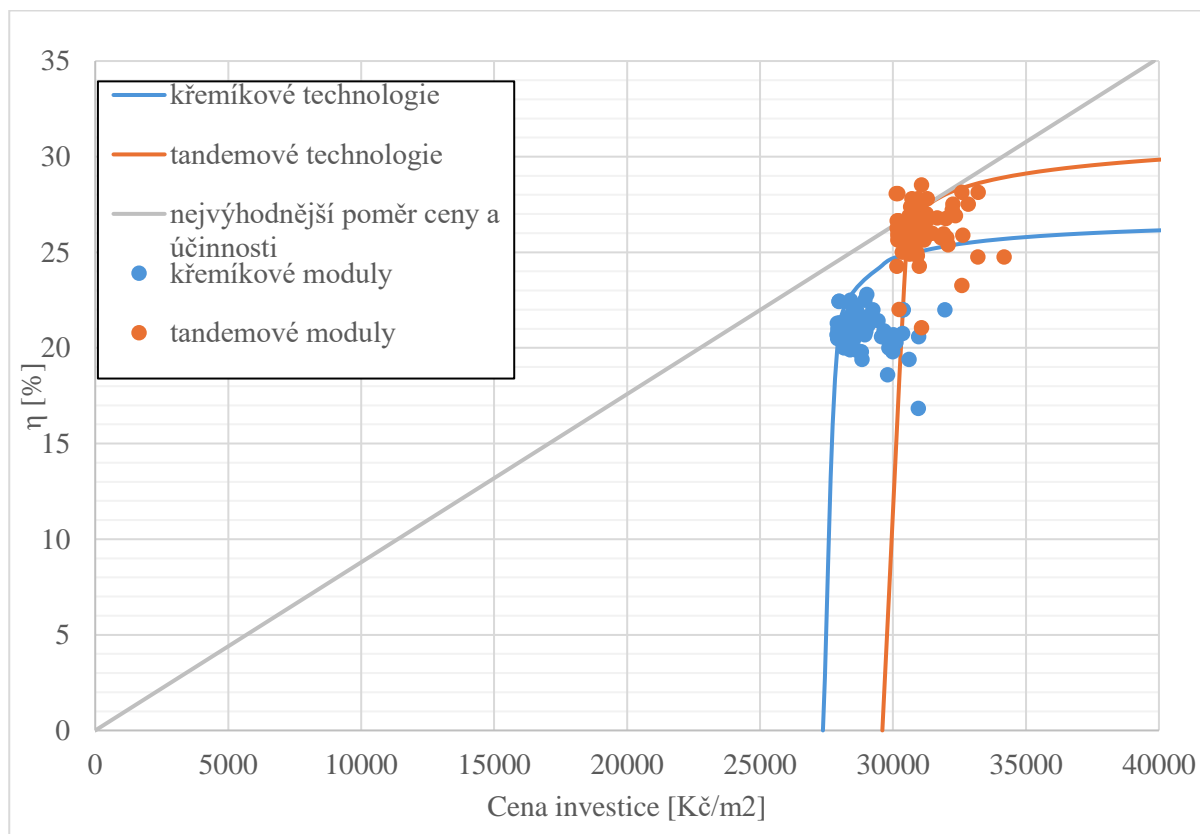
Ze zhodnocení vidíme, že přímka nejvýhodnějšího poměru ceny a účinnosti je tečnou technologie křemíkové. Tedy křemíkové technologie se ukazují jako stále ty výhodnější. Stejně tomu tak bylo i ve studii Anny Pražanové před 5 lety [68].

4.6 Vliv změny nákladů BOS na grafické zhodnocení

V této podkapitole se zkoumá vliv změny nákladů BOS na celkový výsledek v grafické metodě. S rozdílnými náklady BOS se posouvají obě křivky po ose x doprava či doleva v závislosti na tom, jestli se BOS snižují nebo zvyšují. Se změnou polohy křivek se ale změní i sklon přímky nejvýhodnějšího poměru ceny a účinnosti. Z minulých kapitol víme, že pro stanovené náklady BOS 2736,5 Kč jsou výhodnějšími křemíkové technologie. Zákonitě se tedy pro nižší BOS výsledek porovnání nezmění. Z toho důvodu jsou zvoleny náklady BOS výrazně vyšší, a to 10x. Nově stanovené BOS tedy odpovídají ceně 27 365 Kč/m².

Nově stanovené BOS	
BOS [Kč/m ²]	27 365

Tabulka 4 - nově stanovená cena nákladů BOS na m², stanovená jako výrazně vyšší



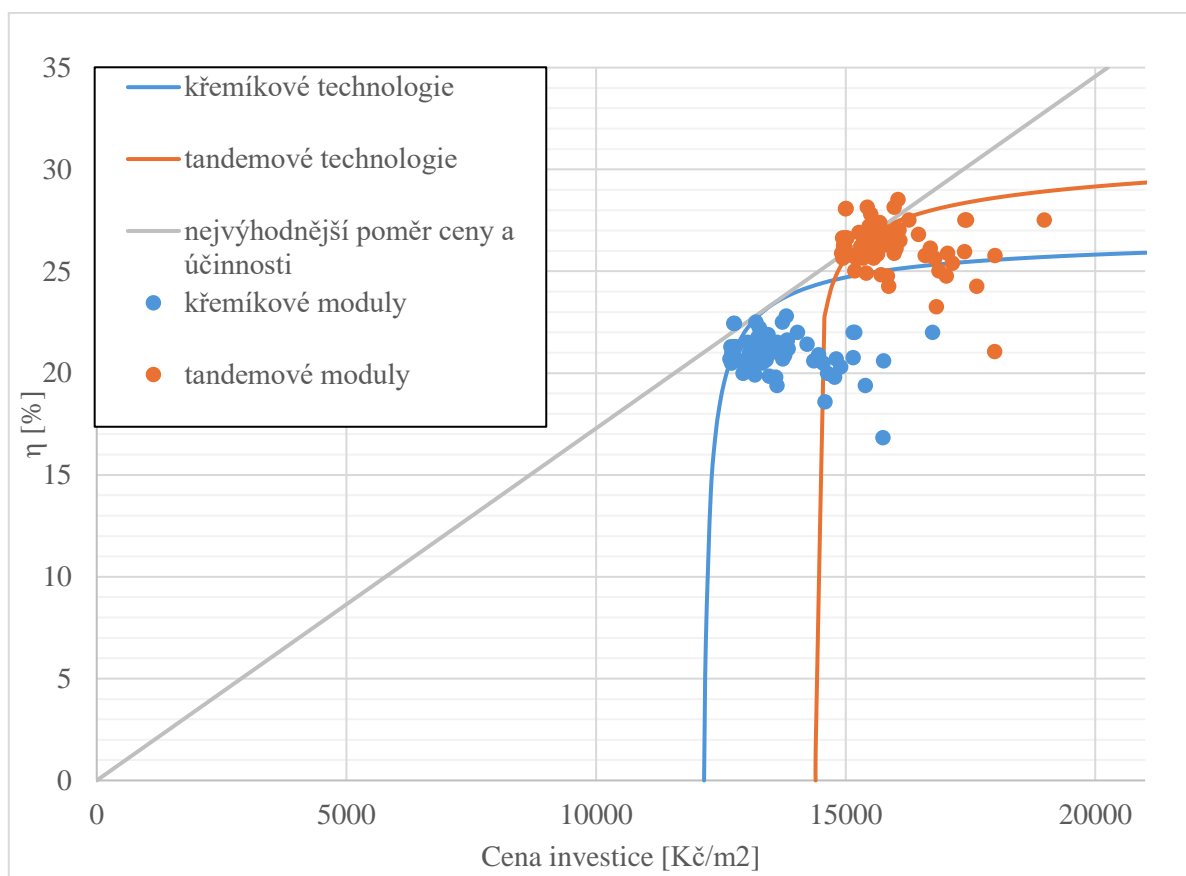
Graf 13 - grafické porovnání tandemové a křemíkové technologie při výrazně vyšších nákladech BOS

S touto změnou opravdu nastává rozdílný výsledek. Výhodnějšími se za těchto podmínek stávají tandemové technologie. Náklady na pořízení už jsou tak vysoké, že se vyplatí účinnější modul.

Bod rovnosti, tedy BOS, při kterých jsou stejně výhodně jak křemíkové, tak tandemové technologie, byl odhadnut na 4,45násobek původně stanovených BOS. To jsou náklady BOS odpovídající zhruba 12 165 Kč.

Odhadnuté BOS, při kterých nastává stejná výhodnost obou technologií	
BOS [Kč/m ²]	12 165

Tabulka 5 - odhadnutá cena nákladů BOS na m², při kterých nastává stejná výhodnost obou technologií



Graf 14 – stejná výhodnost tandemové i křemíkové technologie znázorněna grafickou metodou

Kapitola 5

Závěr

V rámci této bakalářské práce proběhl výzkum solárních článků na bázi perovskitu. V laboratoři bylo vyrobeno celkem 13 článků, které se vzájemně lehce lišily, ať už horními kontakty či délkou žíhání perovskitu.

Na horní kontakty u 6 vyrobených článků bylo napařeno běžně užívané stříbro. U zbylých 7 článků bylo naprášeno ITO. Průběh naprašování ITO byl pro jednotlivé články opět různý. Zkoumal se vliv délky procesu naprašování a nastavený elektrický výkon magnetronového zdroje na tloušťku naprášené vrstvy.

Tloušťka naprášené vrstvy se následně určila elipsometrickým měřením. Bylo zjištěno, že délka procesu i nastavený elektrický výkon jsou přímo úměrné výsledné tloušťce vrstvy. Nejtlustší vrstvy bylo docíleno při nejvyšším nastaveném výkonu 60 W po nejdelší nastavený časový úsek 5 min. Naprášená vrstva měla $338,46 \pm 0,04$ nm. Naopak nejtenčí vrstva byla naprášena při výkonu 40 W po dobu 2,5 min, a to $105,32 \pm 0,08$ nm.

Jako další rozlišující faktor pro vybrané vzorky byla rozdílná doba žíhání perovskitového roztoku při jeho depozici na článek. Doba žíhání byla nastavena na 10 a 30 min. Tyto rozdílně žíhané vrstvy byly následně zkoumány pomocí elektronového mikroskopu. Prostřednictvím mikroskopu bylo zjištěno, že krystalická struktura perovskitu žíhaného 10 min a perovskitu žíhaného 30 min se liší. Krystalická struktura vzorku žíhaného kratší dobu se skládá z výrazně menších krystalických zrn, a to až 2,5x.

Dále byly rozdílně připravené perovskity zkoumané měřením jejich fotoluminiscence. Lepší výsledky vykazoval perovskit žíhaný 10 min. Měl vyšší intenzitu než vzorek žíhaný 30 minut, a to až 2x. Také po dni degradoval méně než vzorek žíhaný delší dobu.

Pro všechny vyrobené články byla v poslední řadě změřena voltampérová charakteristika. Z které byla následně dopočítána účinnost článků. Nejvyšší účinnosti 7,16 % dosáhla prostřední elektroda u vzorku se stříbrnými kontakty a perovskitem žíhaným 30 min. Nejvyšší účinnosti pro vzorek s ITO bylo dosaženo na levé elektrodě u článku, kde byla vrstva ITO tlustá 210 nm a kde byl perovskit žíhaný 10 min, a to 2,17 %. Pro zbylé vzorky se účinnost bohužel pohybovala až na výjimky mezi 0 a 1 %. Vyrobené články pravděpodobně mají velmi vysoký sériový odpor. Z tohoto důvodu dále nelze určit vliv žíhání perovskitu či tloušťka vrstvy ITO na výslednou účinnost článku. U těchto nejpovedenějších článků byl taktéž sledován vliv intenzity záření na VA charakteristiku. Bylo zjištěno, že se zvyšující se intenzitou roste lineárně i proud nakrátko, napětí na prázdno se lehce zmenší. U článku s kontakty z ITO bylo zpozorováno, že při nižší světelné intenzitě se článku zvýšila

účinnost na 4,43 %. Tento efekt byl odůvodněn vysokým sériovým odporem vyrobeného článku. Při nižší intenzitě totiž článkem protéká menší proud, a tím se negativní efekt sériového odporu projeví méně. S menším sériovým odporem se zvýšil činitel plnění, a tudíž i účinnost článku.

Další částí této práce bylo ekonomické zhodnocení výhodnosti perovskitových článků s konvenčními křemíkovými články. Toto zhodnocení proběhlo pomocí grafické metody. Pro zhodnocení byla nasbírána data ohledně dostupných křemíkových panelů na internetových obchodech zahraničních i domácích. Dohledáno bylo 78 monokrystalických a 21 multikrystalických panelů na různé výkonové škále od 40 Wp do 650 Wp. Průměrná cena monokrystalických panelů byla 1694 Kč a průměrná účinnost 20,7 %. Průměrná cena multikrystalických panelů dosáhla 1954 Kč a účinnost 16,8 %. Multikrystalické moduly jsou tedy zároveň dražší, a i méně účinné. Z tohoto důvodu byly multikrystalické moduly z další analýzy vyřazeny, neboť jejich použití nedává z ekonomického hlediska smysl. Ze stejného důvodu se vyřadily i moduly menšího výkonu než 200 Wp.

V grafickém porovnání se počítá s celkovými pořizovacími náklady modulů, tedy i s náklady BOS. Náklady BOS byly stanovené na 2736,5 Kč/m². Do porovnání bylo nutné odhadnout ceny i účinnosti tandemových modulů, jelikož tato technologie prozatím není komerčně dostupná. Cena tandemů byla určena přičtením stanovené ceny za perovskitový článek k nalezeným cenám křemíkových modulů. Tato cena za perovskitový článek byla určena z dohledané publikace, a to ve výši 2234,6 Kč/m². Pro přepočítání účinností byl stanoven koeficient přepočtu k_{η} , jenž vyjadřuje kolikrát jsou tandemové moduly účinnější než moduly křemíkové. Tento koeficient byl stanoven poměrem světově dosažených maximálních účinností pro obě technologie. Koeficient k_{η} byl určen na 1,25. Průměrná cena stanovených tandemových modulů vyšla 6 457 Kč/m² a průměrná účinnost dosáhla na 26,2 %.

Následné grafické porovnání pracovalo s porovnáním křivek obou technologií. Kde jednotlivé křivky popisují rozložení modulů obou technologií v závislosti účinnosti η na ceně za m². Pro bod nulové účinnosti těchto křivek byl zvolen bod fixních nákladů namísto nulové ceny. Pro křemíkové technologie jsou fixní náklady tvořeny náklady BOS, u tandemových technologií jsou fixní náklady navíc tvořeny cenou za perovskitovou vrstvu. Horní hranice těchto křivek jsou omezeny maximální účinností, které jsou obě technologie schopny dosáhnout. Tyto hodnoty byly opět stanoveny jako maximální světově dosažené účinnosti. Následné rozhodnutí o největší výhodnosti bylo rozhodnuto pomocí přímky nejvýhodnějšího poměru ceny a účinnosti. Tato přímka označila jako výhodnější tu technologii, které se stala tečnou. Výsledkem tohoto porovnání bylo, že křemíkové technologie jsou výhodnější.

Na závěr této kapitoly proběhla citlivostní analýza na vliv výše nákladů BOS na grafické porovnání. Jelikož předešlé porovnání vyšlo ve prospěch křemíkové technologie, byly náklady BOS jen zvyšovány. A to z toho důvodu, že jejich snížením bychom rozdílného výsledku nedosáhli. Proto byly BOS zvoleny výrazně vyšší, a to na 27 365 Kč. Kvůli této změně bylo dosaženo rozdílného výsledku, tedy že technologie tandemové jsou v tomto scénáři výhodnější. Následovalo odhadnutí zlomového bodu, tudíž odhadnutí výše BOS, kdy jsou obě technologie stejně výhodné. Tyto BOS byly odhadnuty na 12 165 Kč/m².

Citace

- [1] - Energy Statistics Data Browser. (n.d.). IEA. Retrieved May 17, 2024, from <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=DomesticProduction>
- [2] - Harrington, R. (2015, September 29). This incredible fact should get you psyched about solar power. *Business Insider*. <https://www.businessinsider.com/this-is-the-potential-of-solar-power-2015-9>
- [3] - *Přeměna sluneční energie v energii elektrickou*. (n.d.). FZU. Retrieved January 9, 2024, from <https://www.fzu.cz/aktuality/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou>
- [4] - Účinnost fotovoltaických panelů – Perovskit fotovoltaické články. (2023, May 29). *oze-info.cz - Zprávy a články o obnovitelných zdrojích energie*. <https://oze-info.cz/ucinnost-fotovoltaickych-panelu-perovskit-fotovoltaicke-clanky/>
- [5] - Merchant, E. F. (2024, January 8). Super-efficient solar cells: 10 Breakthrough Technologies 2024. *Technology Review*. <https://www.technologyreview.com/2024/01/08/1085124/super-efficient-solar-cells-breakthrough-technologies/>
- [6] - (N.d.). Eepower.com. Retrieved January 9, 2024, from <https://eepower.com/market-insights/tandem-solar-cells-are-breaking-records/#>
- [7] - LONGi sets a new world record of 33.9% for the efficiency of crystalline silicon-perovskite tandem solar cells. (n.d.). Longi. Retrieved May 21, 2024, from <https://www.longi.com/en/news/new-world-record-for-the-efficiency-of-crystalline-silicon-perovskite-tandem-solar-cells/>
- [8] - Korec, M. (2023, September 6). Další průlom ve fotovoltaice na spadnutí! Perovskitové články v tandemu s klasickými překvapují odolností i efektivitou. *eFotovoltaika.cz*. <https://www.efotovoltaika.cz/dalsi-prulom-ve-fotovoltaice-na-spadnuti-perovskitove-clanky-v-tandemu-s-klasickymi-prekvapuji-odolnosti-i-efektivitou/>
- [9] - Perovskite solar cells. (n.d.). Energy.gov. Retrieved April 3, 2024, from <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>
- [10] - Perovskite solar cells charge ahead to record-breaking efficiencies. (2023, July 21). The American Ceramic Society. <https://ceramics.org/ceramic-tech-today/energy-1/perovskite-solar-cells-charge-ahead-to-record-breaking-efficiencies/>

- [11] - Perovskite solar cells charge ahead to record-breaking efficiencies. (2023, July 21). The American Ceramic Society. <https://ceramics.org/ceramic-tech-today/energy-1/perovskite-solar-cells-charge-ahead-to-record-breaking-efficiencies/>
- [12] - Warby, J., Zu, F., Zeiske, S., Gutierrez-Partida, E., Frohloff, L., Kahmann, S., Frohna, K., Mosconi, E., Radicchi, E., Lang, F., Shah, S., Peña-Camargo, F., Hempel, H., Unold, T., Koch, N., Armin, A., De Angelis, F., Stranks, S. D., Neher, D., & Stolterfoht, M. (2022). Understanding performance limiting interfacial recombination in pin perovskite solar cells. *Advanced Energy Materials*, 12(12). <https://doi.org/10.1002/aenm.202103567>
- [13] - Grünwald, M., & Michaud, S. (2024, January 15). How tandem solar cells can speed up the energy transition. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2024/01/tandem-solar-cells-energy-transition/>
- [14] - Lin, R., Wang, Y., Lu, Q., Tang, B., Li, J., Gao, H., Gao, Y., Li, H., Ding, C., Wen, J., Wu, P., Liu, C., Zhao, S., Xiao, K., Liu, Z., Ma, C., Deng, Y., Li, L., Fan, F., & Tan, H. (2023). All-perovskite tandem solar cells with 3D/3D bilayer perovskite heterojunction. *Nature*, 620(7976), 994–1000. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06278-z>
- [15] - Moulin, E., Müller, T. C. M., Warzecha, M., Hoffmann, A., Paetzold, U. W., & Aeberhard, U. (2015). Highly transparent front electrodes with metal fingers for p-i-n thin-film silicon solar cells. *EPJ Photovoltaics*, 6, 60501. <https://doi.org/10.1051/epjpv/2015001>
- [16] - *How Perovskite Cells Work*. (2022, November 23). Ultrasonic Coating Solutions. <https://cheersonic-liquid.com/en/how-perovskite-cells-work/>
- [17] - *How a solar cell works*. (n.d.). American Chemical Society. Retrieved January 9, 2024, from <https://www.acs.org/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2013-2014/how-a-solar-cell-works.html>
- [18] - *How a PV cell works - knowledge bank - solar schools*. (n.d.). Solarschools.net. Retrieved January 9, 2024, from <https://www.solarschools.net/knowledge-bank/renewable-energy/solar/how-a-pv-cell-works>
- [19] - Modelu, •. Mluvime Take o. (n.d.). Pásová teorie pevných látek. Cvut.Cz. Retrieved April 4, 2024, from <http://aldebaran.feld.cvut.cz/vyuka/konicek/F2-B1Bo2FY2/materialy/pasovy-model.pdf>

- [20] - *Transparentní vodivý oxid*. (2023, February 17). Funkcnidomy.Cz. <https://www.funkcnidomy.cz/slovník/transparentni-vodivy-oxid>
- [21] - Ren, Y., Liu, P., Liu, R., Wang, Y., Wei, Y., Jin, L., & Zhao, G. (2022). The key of ITO films with high transparency and conductivity: Grain size and surface chemical composition. *Journal of Alloys and Compounds*, 893(162304), 162304. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162304>
- [22] – Stadler, A. (2012). Transparent conducting oxides—an up-to-date overview. *Materials*, 5(12), 661–683. <https://doi.org/10.3390/ma5040661>
- [23] - Benamar, E., Rami, M., Messaoudi, C., Sayah, D., & Ennaoui, A. (1999). Structural, optical and electrical properties of indium tin oxide thin films prepared by spray pyrolysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and Photochemical Solar Energy Conversion*, 56(2), 125–139. [https://doi.org/10.1016/s0927-0248\(98\)00151-2](https://doi.org/10.1016/s0927-0248(98)00151-2)
- [24] - (N.d.). Sciencedirect.com. Retrieved March 8, 2024, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2187076415300452>
- [25] - Huang, D., Xiang, H., Ran, R., Wang, W., Zhou, W., & Shao, Z. (2022, August 8). *Share an online entry "hole-transporting layer in perovskite S*. Encyclopedia.Pub; Wei Wang. <https://encyclopedia.pub/entry/25954>
- [26] - Li, S., Cao, Y.-L., Li, W.-H., & Bo, Z.-S. (2021). A brief review of hole transporting materials commonly used in perovskite solar cells. *Rare Metals*, 40(10), 2712–2729. <https://doi.org/10.1007/s12598-020-01691-z>
- [27] - Wang, Y., Duan, L., Zhang, M., Hameiri, Z., Liu, X., Bai, Y., & Hao, X. (2022). PTAA as efficient hole transport materials in perovskite solar cells: A review. *Solar RRL*, 6(8). <https://doi.org/10.1002/solr.202200234>
- [28] - (N.d.-c). Sigmaaldrich.com. Retrieved January 10, 2024, from <https://www.sigmaaldrich.com/deepweb/assets/sigmaaldrich/product/structures/122/933/c34a34ab-284f-4890-adb8-126247a91d9b/800/c34a34ab-284f-4890-adb8-126247a91d9b.png>
- [29] - An introduction to perovskites. (n.d.). Perovskite-info.com. Retrieved January 9, 2024, from <https://www.perovskite-info.com/introduction>
- [30] - Assirey, E. A. R. (2019). Perovskite synthesis, properties and their related biochemical and industrial application. *Saudi Pharmaceutical Journal: SPJ: The Official Publication of the Saudi Pharmaceutical Society*, 27(6), 817–829. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2019.05.003>
- [31] - A. Shahzada: Perovskite Solar Cells, Wiley-VCH Verlag GmbH 2021

- [32] - (N.d.-d). Perovskite-info.com. Retrieved January 10, 2024, from <https://www.perovskite-info.com/sites/perovskite/files/2023-10/Perovskite-structure-example.jpg>
- [33] - (N.d.-b). Sciencedirect.com. Retrieved April 6, 2024, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128129159000071>
- [34] - HÁJKOVÁ, Z., ABELOVÁ, L., SCHÖNFELDOVÁ, T., NEYKOVA, N., HOLOVSKÝ, J., LEDINSKÝ, M. Perovskity – nový fenomén ve fotovoltaice. *Československý časopis pro fyziku*. 2018, 68(3), 149-151. ISSN 0009-0700. Available: https://cscf.fzu.cz/pdf/Hajkova%20a%20kol_Perovskity%20-%20novy%20fenomen.pdf
- [35] - (N.d.-b). Sciencedirect.com. Retrieved May 15, 2024, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128114797000117>
- [36] - Lin, L., Jones, T. W., Yang, T. C.-J., Duffy, N. W., Li, J., Zhao, L., Chi, B., Wang, X., & Wilson, G. J. (2021). Inorganic electron transport materials in perovskite solar cells. *Advanced Functional Materials*, 31(5). <https://doi.org/10.1002/adfm.202008300>
- [37] - (N.d.-e). Sigmaaldrich.com. Retrieved January 10, 2024, from <https://www.sigmaaldrich.com/deepweb/assets/sigmaaldrich/product/structures/716/624/9fb9f2fo-ae99-429f-8d3a-b12267976a4d/800/9fb9f2fo-ae99-429f-8d3a-b12267976a4d.png>
- [38] - Depla, D., Mahieu, S., & Greene, J. E. (2010). Sputter deposition processes. In P. M. Martin (Ed.), *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings* (pp. 253–296). Elsevier.
- [39] - Seshan, K.: *Handbook of thin-film deposition processes and techniques: principles, methods, equipment and applications*, Norwich 2002
- [40] - Abbas, N. (n.d.). *Magnetron Sputtering: A versatile thin Film deposition technique*. Wevolver.com. Retrieved January 9, 2024, from <https://www.wevolver.com/article/magnetron-sputtering-a-versatile-thin-film-deposition-technique>
- [41] - (N.d.). Sciencedirect.com. Retrieved March 30, 2024, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780815520375000010>
- [42] - (N.d.). Cvut.Cz. Retrieved April 24, 2024, from <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68475/F3-DP-2017-Horynova-Eva->

- Nevodive%20tenke%20vrstvy%20vytvorene%20naprasovanim.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [43] - *What is ellipsometry?* (2016, January 6). J.A. Woollam.
<https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/what-is-ellipsometry>
- [44] - *Polarized light.* (2016, January 6). J.A. Woollam.
<https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/polarized-light>
- [45] - *Light and materials.* (2016, March 11). J.A. Woollam.
<https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/light-and-materials>
- [46] - Interaction of light and materials. (2016, January 6). J.A. Woollam.
<https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/interaction-of-light-and-materials>
- [47] - *Ellipsometry measurements.* (2016, February 26). J.A. Woollam.
<https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/ellipsometry-measurements>
- [48] - Angstrom Technologies, Inc. (2022, December 14). *Understanding photoluminescence, fluorescence, and phosphorescence.* LinkedIn.com.
<https://www.linkedin.com/pulse/understanding-photoluminescence-fluorescence->
- [49] - The Editors of Encyclopedia Britannica. (2018). photoluminescence. In *Encyclopedia Britannica.*
- [50] - *What is Photoluminescence spectroscopy?* (n.d.). Horiba.com. Retrieved March 25, 2024, from
<https://www.horiba.com/ind/scientific/technologies/photoluminescence-pl/photoluminescence-pl-electroluminescence-el/>
- [51] - McGhee, K., & O’Kane, M. (n.d.). *Photoluminescence spectroscopy.* Ossila. Retrieved March 27, 2024, from
<https://www.ossila.com/pages/photoluminescence>
- [52] - Li, Q., Anpo, M., You, J., Yan, T., & Wang, X. (2023). Photoluminescence (PL) Spectroscopy. In Springer Handbook of Advanced Catalyst Characterization (pp. 295–321). Springer International Publishing.
- [53] - TESCAN ORSAY HOLDING, Scanning Electron Microscope MAIA3, TESCAN, (2015). <http://www.tescan.com/en/products/maia>.
- [54] - Hájková, Z., Bauerová, P., Fejfar, A., & Šlouf, M. (2018). Elektronový mikroskop – klíč k odhalení tajemství mikro- a nanosvěta. *Chemicke Listy*, 112(2), 128–134.
<http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/2995>

- [55] - IV curve. (n.d.). Pveducation.org. Retrieved April 6, 2024, from <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>
- [56] - What is the PV Fill Factor? (n.d.). Seaward. Retrieved April 6, 2024, from <https://www.seaward.com/gb/support/solar/faqs/31170-what-is-the-pv-fill-factor/>
- [57] - Solar cell efficiency. (n.d.). Pveducation.org. Retrieved April 6, 2024, from <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-efficiency>
- [58] - Effect of light intensity. (n.d.). Pveducation.org. Retrieved April 13, 2024, from <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-light-intensity>
- [59] - Series resistance. (n.d.). Pveducation.org. Retrieved May 15, 2024, from <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/series-resistance>
- [60] - Shunt resistance. (n.d.). Pveducation.org. Retrieved May 15, 2024, from <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance>
- [61] - Conibeer, G. (2007). Third-generation photovoltaics. *Materials Today* (Kidlington, England), 10(11), 42–50. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(07\)70278-x](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(07)70278-x)
- [62] - Diehl, M. (2009, August 14). Die Verwirrung um das Watt-Peak. *pvBuero; photovoltaikBuero*. <https://photovoltaikbuero.de/pv-know-how-blog/die-verwirrung-um-das-watt-peak/>
- [63] - Standard Test Conditions (STC): definition and problems. (2011, November 4). *Sinovoltaics.com; Sinovoltaics (Hong Kong Office)*. <https://sinovoltaics.com/learning-center/quality/standard-test-conditions-stc-definition-and-problems/>
- [64] - De Rooij, D. (2017, December 27). *Balance of System (BOS): what is it?* *Sinovoltaics.com; Sinovoltaics (Hong Kong Office)*. <https://sinovoltaics.com/learning-center/basics/balance-of-system-bos/>
- [65] - Recent facts about photovoltaics in Germany. (2024, February 14). Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/recent-facts-about-pv-in-germany.html>
- [66] - Chang, N. L., Ho-Baillie, A. W. Y., Vak, D., Gao, M., Green, M. A., & Egan, R. J. (2018). Manufacturing cost and market potential analysis of demonstrated roll-to-roll perovskite photovoltaic cell processes. *Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and*

Photochemical Solar Energy Conversion, 174, 314–324.

<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.08.038>

- [67] - (N.d.). Nrel.gov. Retrieved May 14, 2024, from
<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/best-research-cell-efficiencies.jpg>
- [68] - Pražanová, A. (2019). *Studium reverzibilních změn v solárním článku na bázi hybridního metalhalidového perovskitu*. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.

Seznam elektronických příloh

- Mereni_VA_charakteristik – obsahuje VA charakteristiky všech dokončených článků v programu excel
- Ekonomicka_cast – obsahuje všechny dohledané panely a výpočty použité v ekonomické části