



**FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ  
ČVUT V PRAZE**

Bakalářská práce

## **Studium reverzibilních změn v solárním článku na bázi hybridního metalhalidového perovskitu**

Study of reversible changes in solar cell based on hybrid  
metalhalide perovskite

*Anna Pražanová*

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd  
Elektrotechnika, energetika a management – Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: doc. Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.

květen 2019



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pražanová** Jméno: **Anna** Osobní číslo: **459201**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Studium reverzibilních změn v solárním článku na bázi hybridního metalhalidového perovskitu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Study of reversible changes in solar cell based on hybrid metalhalide perovskite**

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše: základní vlastnosti a příprava hybridního perovskitu CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>, tandemový solární článek perovskit-krytalický křemík, Levelized Cost of Energy
2. Vliv přidání vrstvy CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> do tandemu ke konvenčnímu článku na cenu vyrobené energie
3. Příprava solárního článku na bázi hybridního perovskitu CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>
4. Měření voltampérové charakteristiky
5. Sledování reverzibilních jevů v důsledku osvětlení
6. Vyhodnocení přínosů použití perovskitu pro solární panely

Seznam doporučené literatury:

- [1] kniha: Konrad Mertens, Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice, ISBN: 978-1118634165 [2] článek: Z. Hájková, Perovskity – nový fenomén ve fotovoltaice, Československý časopis pro fyziku. 2018, 68 149-151. ISSN 0009-0700. [3] článek: H. J. Snaith, Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells, J. Phys. Chem. Lett., 2013, 4 (21), pp 3623–3630, DOI: 10.1021/jz4020162 [4] článek: J. Burschka, Sequential Deposition as a Route to High-Performance Perovskite-Sensitized Solar Cells. Nature 2013, 499 (7458), 316–319, doi:10.1038/nature12340 [5] článek: F. Sahlí, et al. Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency NATURE MATERIALS Volume: 17 Pages: 820-826 (2018), doi: 10.1038/s41563-018-0115-4 [6] článek: A. Peter Amalathas, Probing photoinduced degradation of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite films by Kelvin Probe and Photoluminescence techniques, Proceedings of EUPVSEC 2018, Brussels, Belgium, Sept. 24-28, 2018, 3DO.4.5

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Mgr. Jakub Holovský, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

\_\_\_\_\_  
doc. Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
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



# Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce doc. Mgr. Jakubu Holovskému, Ph.D., za podnětné rady, ochotu a přívětivý přístup, který provázel všechna naše setkání. Dále bych chtěla poděkovat Dr. Amalraji Peteru Amalathasovi, Ph.D. a Ing. Lucii Landové za odborné vedení a pomoc při práci v laboratořích. Mé poděkování patří také Ing. Michaele Lachmanové za konzultace věnované ekonomické části.

Ráda bych také poděkovala svým rodičům, kteří mi vždy byli oporou a poskytovali mi zázemí po celou dobu mého dosavadního studia. V neposlední řadě bych ráda poděkovala všem, kteří tuší, jak náročné pro mě toto období bylo.



# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci 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 20. května 2019

.....

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

© 2019 Anna Pražanová. Všechna práva vyhrazena.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.*

### **Odkaz na tuto práci**

Pražanová, Anna. *Studium reverzibilních změn v solárním článku na bázi hybridního metalhalidového perovskitu*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2019.

# Abstrakt

Práce byla zaměřena na experimentální přípravu solárního článku na bázi hybridního perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  a studium degradačních a reverzibilních změn vznikajících v důsledku osvětlení. Studium bylo koncipováno k porovnání jedno-krokové a dvou-krokové metody depozice perovskitu a odlišných zdrojů osvitů, s porovnáním bílého a modrého záření. Dále byla práce věnována ekonomickému zhodnocení vlivu přidání vrstvy perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  do tandemu ke konvenčnímu článku se srovnáním výhodnosti jednotlivých technologií, ceny vyrobené energie pomocí metody dlouhodobých měrných nákladů LCOE a vyhodnocením přínosů použití perovskitových materiálů pro FV panely.

**Klíčová slova** perovskit, jodid methylamonno-olovnatý  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , tandemový solární článek perovskit-krystalický křemík, perovskitový solární článek, dlouhodobé měrné náklady LCOE, FV panel

# Abstract

One part of this bachelor's thesis was devoted to preparation of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite solar cell and a study of degradation and self-healing process stimulated by illumination. This thesis compared results of single-step and two-step coating  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  and illumination of white and blue light. In the second part was made an economic study of the effect of adding a  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite layer in tandem to a conventional solar cell using LCOE. Furthermore, the advantages of using perovskite for PV modules were introduced.

**Keywords** perovskite, methylammonium lead iodide  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , tandem solar cell perovskite-crystalline silicon, perovskite solar cell, Levelized Cost of Energy LCOE, PV module

# Obsah

Úvod	1
<b>1 Cíl práce</b>	<b>3</b>
<b>2 Teoretická část</b>	<b>5</b>
2.1 Základní vlastnosti a způsoby přípravy hybridního perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	5
2.1.1 Perovskit a jeho struktura	5
2.1.2 Základní vlastnosti hybridního perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	8
2.1.3 Způsoby přípravy hybridního perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	9
2.1.3.1 Jedno-kroková metoda depozice	10
2.1.3.2 Dvou-kroková metoda depozice	11
2.1.3.3 Výsledná perovskitová vrstva	12
2.2 Tandemový solární článek perovskit-krystalický křemík	13
2.2.1 Základní struktura a princip tandemového solárního článku perovskit-krystalický křemík	13
<b>3 Experimentální část</b>	<b>15</b>
3.1 Příprava solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	15
3.1.1 Provedená příprava solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	16
3.2 Měření solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	27
3.2.1 Měření voltampérové charakteristiky	32
3.2.2 Sledování reverzibilní jevů v důsledku osvětlení	34
<b>4 Ekonomická část</b>	<b>43</b>
4.1 Východiska ekonomického zhodnocení	43
4.1.1 Teoretické podklady	44
4.1.2 Katalogové podklady	46
4.2 Ekonomické zhodnocení	52
4.2.1 Předpoklady ekonomického zhodnocení	52
4.2.2 Ekonomické zhodnocení FV modulů	54
4.2.2.1 Výsledky ekonomického zhodnocení FV modulů	59
4.3 Případová studie	61

4.3.0.1	Výsledky případové studie ekonomického zhodnocení FV modulů . . . . .	69
<b>Závěr</b>		<b>71</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>75</b>



# Seznam použitých zkratek

**BOS** (*Balance Of System*) rovnováha systému

**CAP** Centrum pokročilé fotovoltaiky

**CaTiO<sub>3</sub>** oxid vápenato-titaničitý

**CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub><sup>+</sup>** methylamonný kationt

**CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I** jodid methylamonný

**CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>** jodid methylamonno-olovnatý

**ČVUT v Praze** České vysoké učení technické v Praze

**DMF** N,N-dimethylformamid

**FF** (*Fill Factor*) činitel plnění

**FTO** (*Fluorine-doped Tin Oxide*) fluorem dopovaný oxid cíničitý

**FV** fotovoltaický

**FZÚ AV ČR** Fyzikální ústav Akademie věd České republiky

**GLB**  $\gamma$ -butyrolakton

**IPA** isopropylalkohol

**ITO** (*Indium-doped Tin Oxide*) indiem dopovaný oxid cíničitý

**LCOE** (*Levelized Cost of Energy*) dlouhodobé měrné náklady

**LiTFSI** lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imid

**MAI** jodid methylamonný CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I

**MPP** (*Maximum Power Point*) bod maximálního výkonu

**NPV** (*Net Present Value*) čistá současná hodnota

**Pb<sup>2+</sup>** kationt olova

**PbI<sub>2</sub>** jodid olovnatý

**ppm** (*parts per million*) dílů či částic na jeden milion

**PR** (*Performance Ratio*) poměr výkonů

**rpm** (*revolutions per minute*) otáčky za minutu

**S-Q limit** Shockleyův-Queisserův limit

**Si** Silicium (křemík)

**T** Tandem

**TiCl<sub>4</sub>** chlorid titaničitý

# Seznam obrázků

2.1	Vykrystalizovaný minerál perovskitu. Převzato z [Wolfried]. . . . .	6
2.2	Krystalová struktura perovskitu. Převzato z [Hajkova] a upraveno.	7
2.3	Historický vývoj nejvýše dosažených účinností solárních článků. Převzato z [Efficiency]. . . . .	8
2.4	Princip technologie <i>spin-coating</i> . Inspirováno [Kopecky]. . . . .	9
2.5	Schéma jedno-krokové přípravy perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Inspirováno [Mutalikdesai]. . . . .	10
2.6	Schéma dvou-krokové přípravy perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Inspirováno [Mutalikdesai]. . . . .	11
2.7	Detail, získaný pomocí elektronového mikroskopu, na krystalická zrna perovskitových struktur $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ připravených za stejných podmínek, kde (a) požadovaná struktura, (b) vzorek s nevhodnou morfologií. . . . .	12
2.8	Schematická struktura a princip tandemového solárního článku. Inspirováno [Eperon]. . . . .	13
2.9	Pásový diagram zobrazující vodivostní, valenční a zakázaný pás. Převzato z [Liptak] a upraveno. . . . .	14
3.1	Struktury perovskitových solárních článků (a) základní struktura, (b) struktura námi vyrobeného článku. Inspirováno [Scholtzova].	16
3.2	Dusíkový <i>glovebox</i> typu MBraun UNILab v laboratoři Centra pokročilé fotovoltaiky (CAP), Katedře elektrotechnologií FEL ČVUT v Praze. . . . .	17
3.3	Příprava roztoků pro jedno-krokovou metodu depozice perovskitové struktury $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Připravený roztok jodidu olovnatého $\text{PbI}_2$ a jodidu methyloamonného $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (MAI). . . . .	18
3.4	Proces třístupňové metody čištění s využitím ultrazvukové čističky. Košík se vzorky připravenými na čištění. Pracující ultrasonikátor. .	19
3.5	Využitá média tříkrokové metody ultrasonifikace. Zleva zásaditý koncentrát Hellmanex, aceton a isopropylalkohol IPA. Ethanol sloužící k oplachu očištěných vzorků. . . . .	19

3.6	Filtrační digestoř Captair Toxicap v laboratoři Centra pokročilé fotovoltaiky (CAP), Katedře elektrotechnologie, FEL ČVUT v Praze. Roztok pro nanesení kompaktní vrstvy oxidu titaničitého $\text{TiO}_2$ pomocí sprejové pyrolýzy. . . . .	21
3.7	Sprejová pyrolýza kompaktní vrstvy oxidu titaničitého $\text{TiO}_2$ . Rozprašovací pistole. Využití umístění vzorků na vyhřáté plotně. . . .	21
3.8	Nanesezení mezoporézní vrstvy oxidu titaničitého $\text{TiO}_2$ pomocí <i>spin-coateru</i> . . . . .	22
3.9	Nanesezení vrstvy lithia bis(trifluorometanesulfonyl)imidu LiTFSI pomocí <i>spin-coateru</i> . . . . .	22
3.10	Filtrace roztoku jodidu olovnatého $\text{PbI}_2$ a jodidu methylamonného $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}$ (MAI) přes PTFE stříkačkový filtr. . . . .	23
3.11	Nanesezení vrstvy $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ pomocí jedno-krokové depozice. Deponovaná vrstva roztoku $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Výsledná tloušťka vrstvy je tak slabá, že se jeví jako transparentní. Typicky zbarvený vzorek po sejmutí z vyhřáté plotny. . . . .	23
3.12	Nanesezení vrstvy $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ pomocí dvou-krokové depozice. Deponovaná vrstva roztoku jodidu olovnatého $\text{PbI}_2$ , s jasně žlutým zabarvením po sejmutí z plotny. Typicky zbarvený vzorek po depozici roztoku jodidu olovnatého $\text{PbI}_2$ . . . . .	24
3.13	Nanesezení transportní vrstvy Spiro-MeOTAD s využitím <i>spin-coateru</i> . Vzorek po odstranění deponovaných vrstev na pravém okraji, před nanesením zadní elektrody. . . . .	25
3.14	Stínící maska pro napařování zadní elektrody solárních článků. Vakuové zařízení pro napařování EDWARD, s umístěnou stínící maskou.	26
3.15	Zlato v odpařovacím zdroji. Napařená vrstva zlata, sloužící jako zadní elektroda na získaném vzorku solárního článku na bázi hybridního perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . . . . .	26
3.16	Měření voltampérových charakteristik připraveného perovskitového solárního článku, čtyřkvadrantovým měřícím zdrojem Keithley 2401. Zavedené značení jednotlivých solárních článků na připraveném vzorku. . . . .	27
3.17	Voltampérová charakteristika solárního článku. Inspirováno [Pvedu].	28
3.18	Schéma mechanismu procesu degradace a regenerace. Vyobrazení valenčního $E_V$ a vodivostního $E_C$ pásu během foto-degradace (akumulace náboje), procesu regenerace za tmy ( <i>self-healing</i> ) a po zregenerování. Červené přerušované čáry znázorňují stavy meta-stabilních pastí. Šipky naznačují zaplňování a uvolňování pastí fotogenerovanými nosiči. Převzato z [Nie] a upraveno. . . . .	31
3.19	Cykly degradačního procesu perovskitového solárního článku znamenaného během jednoho dne. Červená barva značí dobu osvětlení, modrá uchování ve tmě. Převzato z [Nie] a upraveno. . . . .	31

3.20	Pozorování degradačního procesu na vynesných voltampérových charakteristikách při osvitu solárním simulátorem 89 North poskytujícím nepřetržitý osvit bílého světla o intenzitě záření 1 slunce. . . . .	32
3.21	Měření připravených vzorků při osvitu bílým světlem solárního simulátoru 89 North a osvětlení sadou modrých LED diod. . . . .	34
3.22	Metodika měření sledování reverzibilních jevů v důsledku osvětlení. Červenou barvou je označeno Pozorování různých zdrojů osvitů, modrou barvou Pozorování různých metod depozice perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . . . . .	35
3.23	Sledování degradačních a reversibilních jevů v důsledku různých zdrojů osvitů. Porovnání bílého světla solárního simulátoru o intenzitě záření 1 slunce a modré LED diody. . . . .	38
3.24	Sledování degradačních a reversibilních jevů v důsledku osvětlení. Porovnání vzorků připravených pomocí jedno-krokové a dvou-krokové metody depozice při osvětlení modrou LED diodou. . . . .	41
4.1	Závislost účinnosti a ceny (nákladů) pro fotovoltaické technologie první, druhé a třetí generace. Křivky nejnižší elektrické energie. Převzato z [Green] a upraveno. . . . .	44
4.2	Schéma modulu s reálnými rozměry 1640 x 992 x 40 mm. Převzato z [Katalogovýlist] a upraveno. . . . .	47
4.3	Graf zaručeného výkonu. Inspirováno [Katalogovýlist]. . . . .	49
4.4	Ukázkové hodnoty Performance Ratio u FV modulů zapojených do sítě. [Quaschnig2010] . . . . .	50
4.5	Závislost účinnosti a ceny fotovoltaických technologií první a třetí generace. . . . .	53
4.6	Závislost účinnosti a ceny fotovoltaických technologií první a třetí generace, (a) zanedbatelná výhodnost tandemových technologií, (b) výrazná výhodnost tandemových technologií. . . . .	54
4.7	Graf znázorňující odhadované náklady jednotlivých vrstev experimentálně vyráběných perovskitových FV solárních článků. Zobrazené vrstvy: FTO (sklo s nanosenou FTO vrstvou), $\text{TiO}_2$ , perovskitová struktura, HTM (transportní vrstva), zlato. Převzato z [Binek] a upraveno. . . . .	56
4.8	Graf procentního podílu investičních a BOS nákladů z průměrné ceny celkových nákladů spjatých s instalací fotovoltaického systému pro výkonnostní řady 10–100 kWp střešních fotovoltaických systémů instalovaných v Německu v průběhu posledních 13 let. [Fraunhofer] . . . . .	58
4.9	Grafická interpretace zhodnocení srovnávaných fotovoltaických technologií. . . . .	59
4.10	Grafická interpretace predikce zhodnocení srovnávaných fotovoltaických technologií. . . . .	61
4.11	Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. Převzato z [Isofen]. . . . .	62

4.12 Poměr dopadajícího záření pro různý sklon a orientaci modulů (Praha) – model PVGIS. Přejato z [Globalsolar]. . . . .	63
--	----

# Seznam tabulek

3.1	Pozorované hodnoty degračního procesu na charakteristických parametrech perovskitového solárního článku připraveného pomocí dvou-krokové depozice nepřetržitě osvětlovaného bílým světlem solárního simulátoru o intenzitě 1 slunce. . . . .	33
4.1	Informativní hodnoty součinitele špičkového výkonu, resp. účinnosti FV modulů. Převzato a upraveno z [TZB]. . . . .	48
4.2	BOS náklady jednotlivých variant. . . . .	58
4.3	Průměrné hodnoty získané z konvenčně vyráběných polykrystalických a monokrystalických FV modulů. . . . .	63
4.4	Roční vyrobená energie 20 konvenčních FV modulů. . . . .	64
4.5	Očekávané průměrné hodnoty tandemových FV modulů vycházejících z konvenčních polykrystalických a monokrystalických FV modulů. . . . .	65
4.6	Roční vyrobené energie FV tandemových modulů. . . . .	65
4.7	Investiční náklady jednotlivých variant. . . . .	66
4.8	Náklady BOS jednotlivých variant. . . . .	66
4.9	Předpokládané náklady na údržbu fotovoltaického systému. . . . .	67
4.10	Vypočítané hodnoty LCOE srovnávaných variant 20 FV modulů na konci životnosti fotovoltaického systému. . . . .	68
4.11	Procentní vyjádření nevýhodnosti tandemových FV modulů srovnávaných variant. . . . .	69
4.12	Vypočítané hodnoty LCOE srovnávaných variant 20 FV modulů na konci životnosti FV. . . . .	70
4.13	Procentní vyjádření výhodnosti tandemových FV modulů srovnávaných variant. . . . .	70





# Úvod

Ochrana životního prostředí se v posledních letech snaží reagovat na omezené zásoby fosilních paliv a důsledky jejich spalování: vznik emisí, prašných látek a tzv. skleníkového plynu oxidu uhličitého  $\text{CO}_2$ , které znečišťují ovzduší, způsobují změny klimatu a globální oteplování. Zavádějí se limity minimálního množství energie, které z těchto zdrojů může být vyrobeno, a jsou hledány alternativy, které by tyto vyčerpatelné zdroje energie mohly v budoucích letech nahradit.

Jako jednou z možných variant se jeví obnovitelné zdroje energie, zejména pak využití sluneční energie v podobě fotovoltaických technologií. Přeměna sluneční energie pomocí solárních článků využívá principu fotovoltaického jevu. Po osvětlení článku nastane absorpce dopadajících fotonů a vznik páru volných nosičů náboje elektronů a děr, jejichž separovaným odvodem vzniká napětí.

Již několik let fotovoltaika zabírá více než 10 % z celosvětově nově naistalovaných zdrojů elektrické energie. V roce 2017 tato hodnota dosáhla již 39 % a v budoucích letech je očekáván její další výrazný nárůst. [Globalmarket] Stávající konvenčně nabízené fotovoltaické panely jsou převážně vyráběny z polovodičového krystalického křemíku, který je řazen k nejdéle zkoumaným fotovoltaickým materiálům. Experimentálně vyráběné články těchto technologií dosahují účinnosti přeměny až 22,3 % pro případ polykrystalického a 27,6 % pro případ monokrystalického křemíku. [Efficiency] V praxi se využívají i jiné polovodiče, které jsou schopny dosahovat vyšších hodnot účinnosti. To je provázáno s vyššími náklady na jejich výrobu. Současně jsou hledány a zkoumány nové materiály, které budou schopny poskytnout dostačující účinnost přeměny slunečního záření a jejich výrobní náklady budou nízké.

Mezi materiály, prokazující tyto vlastnosti, patří například fotovoltaické technologie třetí generace, mezi které jsou řazeny materiály na bázi perovskitů. Příprava těchto materiálů je velmi snadná a rychlá, náklady na výrobu jsou očekávány nízké a účinnost tandemových experimentálně připravených solárních článků na bázi perovskitu a krystalického křemíku dosahuje až 28 %. [Efficiency] Perovskity vykazují obrovský potenciál pro to, aby jimi byla nahrazena značná část konvenčních článků. Současnému uplatnění perovskitových materiálů však brání nízká stabilita, která významně snižuje jejich životnost.

Pro možné řešení tohoto problému je vhodné se zabývat studiem stability, ovlivněné degradačními a regeneračními procesy pozorovanými u těchto materiálů. Proto byla práce zaměřena na přípravu solárního článku na bázi perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  a sledování změn, které při osvětlení článku nastávají. Díky poklesu ceny fotovoltaických modulů se limitujícím faktorem stává nikoli cena, ale účinnost. Překonat účinnost křemíkových článků lze jedině tandemovou strukturou. Proto bylo v práci provedeno i ekonomické zhodnocení vlivu přidání perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  do tandemu ke konvenčnímu (křemíkovému) článku, jako nastínění nejpravděpodobnější situace, která je v průběhu následujících několika let očekávána.

# Kapitola 1

## Cíl práce

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat téma hybridního perovskitu jodidu methylamonno-olovnatého  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  a to ve třech různých, navzájem spolu souvisejících oblastech – teoretické, experimentální a ekonomické.

V teoretické části byla zpracována rešerše, představující teoretický základ pro možné zpracování ostatních částí. Rešerše byla věnována základním vlastnostem, strukturám a způsobům přípravy hybridního perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  a tandemovému solárnímu článku perovskit-krystalický křemík.

V experimentální části bylo připraveno několik sérií vzorků perovskitových solárních článků na bázi  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , připravených pomocí jedno-krokové a dvou-krokové metody depozice perovskitové struktury, se záměrem osvojení si této přípravy. Na připravených vzorcích byly naměřeny voltampérové charakteristiky a pozorovány degradační a regenerační procesy. Účelem měření bylo sledovat zmíněné procesy, srovnat využití způsoby depozice perovskitových struktur a vliv použitých záření.

V ekonomické části bylo vypracováno zhodnocení vlivu přidání vrstvy perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  do tandemu ke konvenčnímu článku. Koncept zhodnocení byl cílen k porovnání výhodnosti investic dle jednotlivých technologií, srovnání ceny vyrobené energie pomocí metody dlouhodobých měrných nákladů LCOE a vyhodnocení přínosů použití perovskitových struktur pro fotovoltaické panely.



## Kapitola 2

# Teoretická část

Teoretická část byla věnována rešerši, rozdělené do dvou částí, poskytující dostatek podkladů, využitých ve zpracované části experimentální a ekonomické. První část byla věnována základním vlastnostem a způsobům přípravy hybridní perovskitového materiálu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Druhá část byla zaměřena na tandemový solární článek vytvořený na bázi perovskitu a krystalického křemíku.

### 2.1 Základní vlastnosti a způsoby přípravy hybridního perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

V této kapitole byl vysvětlen pojem perovskit a popsány základní vlastnosti jeho struktury. Protože experimentální část byla věnována přípravě solárního článku na bázi hybridního perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  byl zbytek kapitoly zaměřen na základní charakteristické vlastnosti a způsoby přípravy tohoto materiálu. Dále byly zmíněny faktory způsobující nevratnou degradaci vytvořených perovskitů.

#### 2.1.1 Perovskit a jeho struktura

Perovskit je označení minerálu s krystalickou strukturou obsahující chemický vzorec  $\text{CaTiO}_3$  (oxid vápenato-titaničitý). [Hutchison] Tento minerál byl objeven v roce 1839 na území Uralu německým profesorem Gustavem Rosem, který jej pojmenoval perovskit na počest ruského mineraloga Lva Alexejeviče Perovského. [Hutchison, Mutalikdesai]

Typicky je minerál perovskitu tmavě hnědé až černé barvy, ortorombické (kosočtverečné) krystalické soustavy, kovového až diamantového lesku, nerovného až lasturnatého lomu, tvrdosti 5,5–6,0, hustoty 4–4,3 g/cm<sup>3</sup> a nedokonalé štěpnosti podle {100}. [Mineral]



Obrázek 2.1: Vykrytalizovaný minerál perovskitu. Převzato z [Wolfgang].

Jako perovskit lze označit i skupiny materiálů tvořené strukturou totožnou se strukturou minerálu perovskitu  $\text{CaTiO}_3$ , popsanou chemickým vzorcem  $\text{ABX}_3$ , kde A a B jsou kationty rozdílných velikostí svázané aniontem X. [Mutalikdesai, Giorgi] A tvoří tzv. velký vnitřní organický kationt, B malý vnitřní kovový kationt, nacházející se v krystalové mřížce, a X tvoří halogenidový aniont. [Hajkova] Poprvé byla perovskitová struktura popsána v roce 1926 norským mineralogem Viktorem Goldschmidtem. [Giorgi]

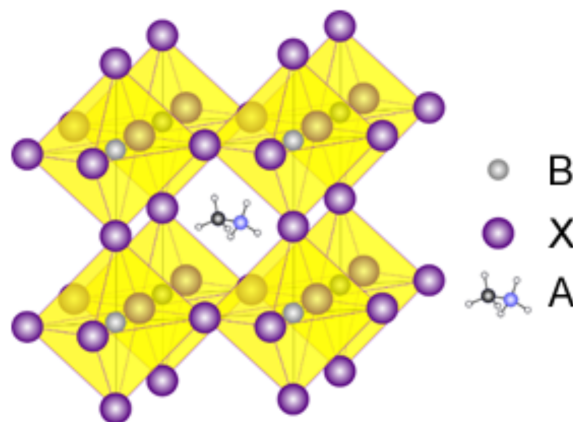
Pro zachování stability výsledného perovskitu, musí mít jednotlivé prvky struktury  $\text{ABX}_3$  vhodnou velikost, která je dána Goldschmidtovým tolerančním faktorem

$$t = \frac{r_A + r_X}{\sqrt{2}(r_B + r_X)}, \quad (2.1)$$

kde  $t$  je Goldschmidtův toleranční faktor,  $r_A$  je iontový poloměr kationtu A,  $r_B$  je iontový poloměr kationtu B a  $r_X$  je iontový poloměry aniontu X. [Goldschmidt]

2.1. Základní vlastnosti a způsoby přípravy hybridního perovskitu  
 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

---



Obrázek 2.2: Krystalová struktura perovskitu. Převzato z [Hajkova] a upraveno.

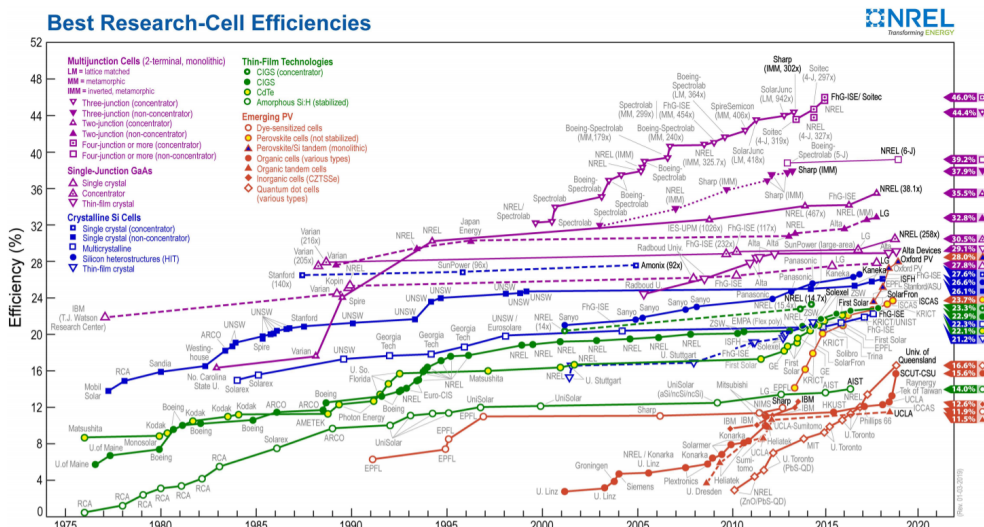
Pro nejstabilnější struktury nabývá faktor hodnot  $t = 0,8-1$ . Z uvedeného vztahu vyplývá podmínka pro velikosti iontových poloměrů kationtů

$$r_A > r_B, \quad (2.2)$$

kde  $r_A$  je iontový poloměr kationtu A a  $r_B$  je iontový poloměr kationtu B. [Koh]

Perovskitové materiály chemického vzorce  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbX}_3$ , tvořené methylamonným kationtem  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$ , kationtem olova  $\text{Pb}^{2+}$  a halogenidovým aniontem X (např.  $\text{I}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ), jsou řazeny mezi organicko-anorganické hybridní perovskity. Solární články na jejich bázi lze označit jako tzv. třetí generaci fotovoltaických technologií. Uplatnění těchto materiálů by měl zajistit jejich nižší výslednou cenu, v porovnání s ostatními využívanými fotovoltaickými technologiemi. [Shi, Benesova, Green] Účinnost přeměny čistě perovskitových solárních článků dosahuje hodnoty 23,7 %, v případě tandemových solárních článků, které využívají kombinaci perovskitu a krystalického křemíku, pak 28 %. [Efficiency] Uplatnění těchto materiálů se očekává i mimo fotovoltaiku, protože dokáží světlo nejen absorbovat, ale lze dosáhnout i stimulované emise. [Hajkova]

## 2. TEORETICKÁ ČÁST



Obrázek 2.3: Historický vývoj nejvyšše dosažených účinností solárních článků. Převzato z [Efficiency].

### 2.1.2 Základní vlastnosti hybridního perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Mezi intenzivně zkoumané hybridní perovskity je řazen polovodičový materiál  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , kde je jako halogenid využit jodid. Právě tato struktura přináší špičkové hodnoty při měření účinnosti solárních článků. [Hajkova, Koh, Mutalikdesai]

Při pokojové teplotě zhruba  $26\text{ }^\circ\text{C}$  má perovskit  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  tvar tetragonální krystalové soustavy, ze které při teplotě kolem  $55\text{ }^\circ\text{C}$  přechází do kubické. Pro teploty nad  $275\text{ }^\circ\text{C}$  začíná struktura perovskitu nevratně degradovat. Pro teploty nižší než  $-115\text{ }^\circ\text{C}$  se struktura mění na ortorombickou a dochází ke změně šířky zakázaného pásu. [Whitfield] Působení různých tlaků a teplot, způsobuje nesymetrie krystalické struktury perovskitu a ovlivňuje elektrické i optické vlastnosti. [Amat]

Tepelné vodivostní vlastnosti perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  jsou nízké a nezávislé na velikosti struktury (srovnání samostatných velkých krystalů a polykrytalických skupiny mikrokrytalů). [Pisoni]

Šířka zakázaného pásu hybridního perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  je přibližně 1,6 eV, proto má schopnost absorbovat široké spektrum dopadajícího záření. [Eperon, Xing] Difúzní délka je vhodná pro solární články a má hodnotu u elektronů přibližně 130 nm, u děr kolem 90 nm. [Xing]

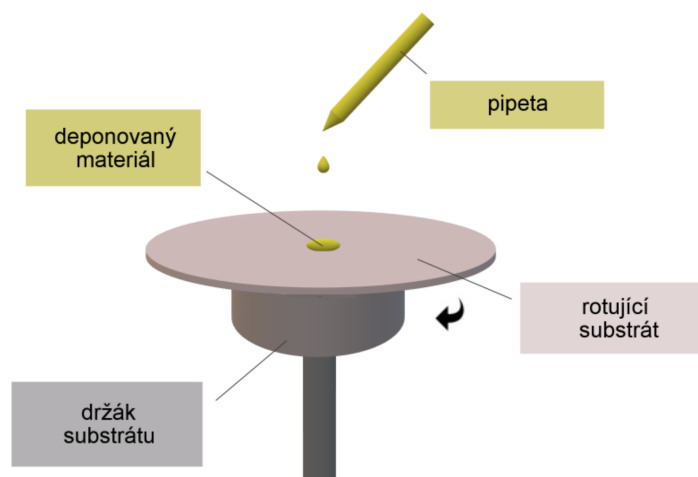
Nevýhodou perovskitových materiálů  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  je obsah toxického olova a jeho uvolňování do životního prostředí. Vhodným řešením je nahrazení tohoto prvku jiným. To však negativně ovlivňuje získanou účinnost. [Hajkova]



### 2.1.3 Způsoby přípravy hybridního perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Hlavní výhodou perovskitových materiálů je snadnější, levnější a méně časově náročná příprava. Existuje několik způsobů, kterými lze tenkovrstvý perovskit připravit. Nejvyužívanější jsou metody jedno-krokového nebo dvou-krokového odstředivého rotačního nanášení mokrou cestou, ale lze se setkat i s nanášením např. z plynné fáze. [Mutalikdesai, Xiao]

Nevýhodou perovskitů je jejich citlivost na podmínky přípravy. Seběmenší změna depozičních parametrů (např. doba a rychlost kapání roztoků, viskozita roztoků, rychlost otáčení a teplota zahřívání) může razantně ovlivnit vlastnosti jejich výsledné krystalické struktury. Proto je proces přípravy roztoků a depozice principem rotačního nanášení (*spin-coating*) nejčastěji prováděn v ochranné atmosféře (např. dusíkového) rukavicového boxu (*gloveboxu*) za velmi nízké koncentrace vody a kyslíku. [Hajkova]



Obrázek 2.4: Princip technologie *spin-coating*. Inspirováno [Kopecky].

#### Princip rotačního nanášení

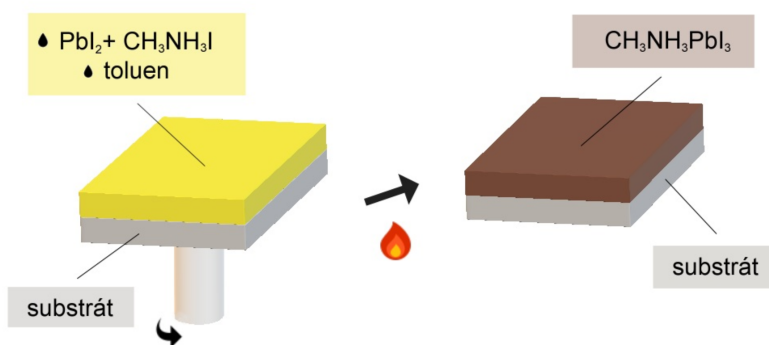
Rotační nanášení tzv. *spin-coating* je velmi rozšířená a reprodukovatelná technologie nanášení tenkých vrstev z kapalně fáze na ploché substráty, kdy je nanášený materiál rozpuštěn ve vhodném rozpouštědle. Princip *spin-coatingu* je založen na nanesení malého objemu (kapka až jednotky ml) deponovaného materiálu do středu horizontálně upevněného substrátu. Tento materiál je pomocí odstředivých sil vzniklých vysokou rychlostí rotace substrátu (až 1000 rpm) rovnoměrně roztažen po jeho povrchu, kde vytvoří tenkou

vrstvu. Zařízení určené pro tento druhu nanášení je nazýváno *spin-coater* nebo *spinner*. [Kopecky]

### 2.1.3.1 Jedno-kroková metoda depozice

Ve vhodně zvoleném rozpouštědle (např.  $\gamma$ -butyrolakton, dimethylsulfoxid, N,N-dimethylformamid) dochází k rozpuštění obou výchozích pevných sloučenin jodidu olovnatého  $\text{PbI}_2$  a jodidu methylamonného  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ . Rozpouštění je obvykle prováděno za stálého míchání a zvýšené teploty ( $70\text{ }^\circ\text{C}$ ) po dobu 1–2 dnů.

Výsledný roztok je pomocí pipety nanesen na předem očištěné substráty (např. sklo), kde je roztočen pomocí *spin-coateru* vysokou rychlostí, aby došlo k jeho rovnoměrnému rozprostření po celé ploše substrátu. Pro zdokonalení krystalizačního procesu je během rotace přikapáváno malé množství chlorbenzenu nebo toluenu. Následuje umístění vzorku na vyhřátou plotnu, kde je zahříván po dobu 2–10 minut při  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , kde dojde k jeho ztmavnutí k typické hnědo-černé barvě. [Hajkova, Xiao]

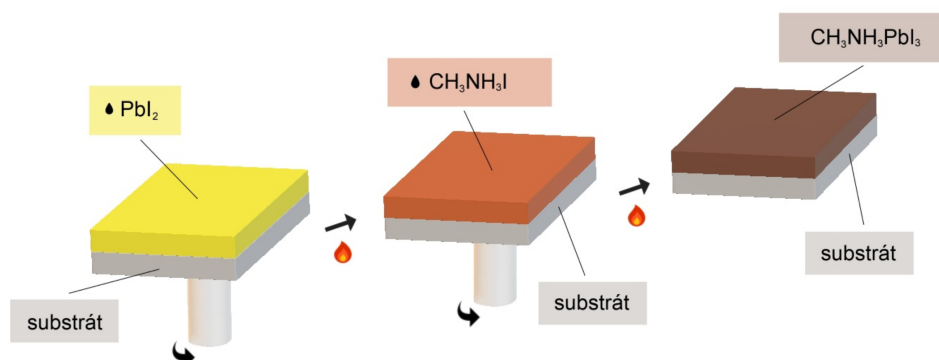


Obrázek 2.5: Schéma jedno-krokové přípravy perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Inspirováno [Mutalikdesai].

### 2.1.3.2 Dvou-kroková metoda depozice

Roztok jodidu olovnatého a vhodného rozpouštědla, získaný pomocí postupu uvedeného v jednokrokové depozici, za přibližně hodinového míchání při teplotě  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , je až do okamžiku experimentu udržován při teplotě okolí a těsně před ním je pouze protřepán. Následuje jeho rotační nanášení na připravený substrát, a krátké zahřátí po dobu 2–10 min při  $70\text{ }^\circ\text{C}$ . Na vytvořenou vrstvu je rotačně nanášen rozpuštěný jodid methylamonný  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  v isopropylalkoholu IPA. Tím je vytvořena vrstva (obvykle světlejší) perovskitové barvy. Vytvořené vzorky jsou žíhány, maximálně po dobu 10 minut, na vyhřáté plotně (cca  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ), kde dojde k jejich ztmavnutí. [Hajkova, Xiao, Burschka]

Závěrečné zahřívání vzorků může být také provedeno například v parách N,N-dimethylformamidu DMF, kdy jsou vzorky s pár kapkami této sloučeniny umístěny v uzavřené nádobě (např. Petriho miska) a nechány po dobu cca 10 minut na plotně vyhřáté na  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Během procesu může dojít k zesvětlení vzorků, aby bylo dosaženo požadované barvy a vlastností, jsou vzorky ponechány následující 1–2 minuty v otevřené nádobě při zachované teplotě plotny. [Xiao, Burschka]

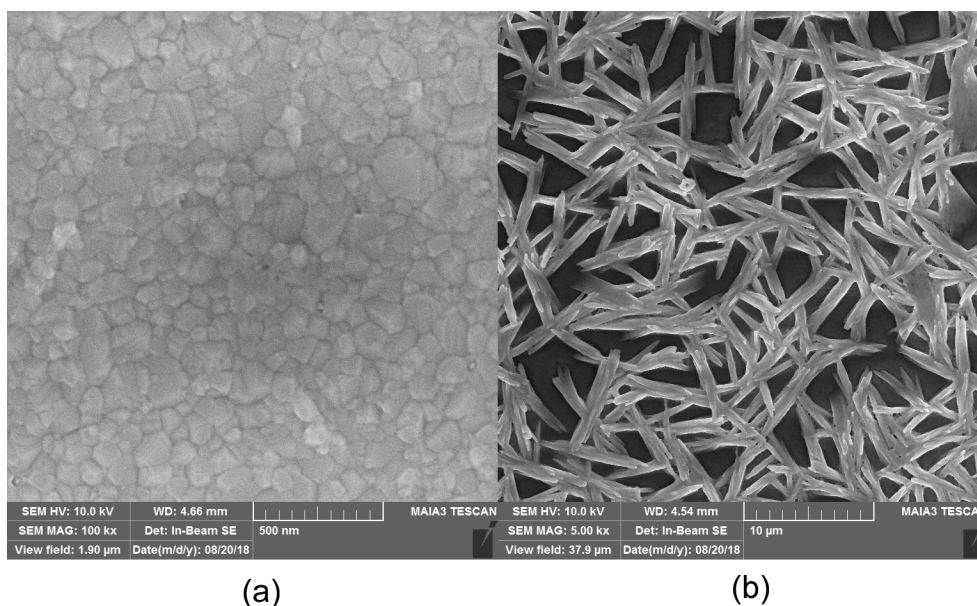


Obrázek 2.6: Schéma dvou-krokové přípravy perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Inspirováno [Mutalikdesai].

### 2.1.3.3 Výsledná perovskitová vrstva

Vzhledem k vlastnostem struktury dochází u výsledné perovskitové vrstvy k nevratné degradaci, a to pouze díky faktorům jako jsou např. UV záření, teplota, vlhkost či přítomnost kyslíku. [Mutalikdesai] Proto jsou získané vzorky nejčastěji uchovávány v ochranné atmosféře, opatřeny vhodným zapouzdřením nebo UV filtry. [Hajkova]

Hlavní nevýhodou popsaných způsobů přípravy perovskitových materiálů je reprodukovatelnost. U zmíněných metod je velmi náročné zajistit konstantní depoziční parametry a připravit sérii totožných vzorků, se stejnými vlastnostmi a strukturou. [Kopecky] Detail krystalických zrn odlišných perovskitových struktur připravených za stejných podmínek je uveden na Obrázku 2.7, kde (a) znázorňuje požadovanou krystalickou strukturu a (b) je ukázkou vzorku s nevhodnou morfologií. V budoucích letech je očekáváno zautomatizování výroby materiálů na bázi perovskitů, za využití např. nástřiků nebo tisku. [Hajkova]



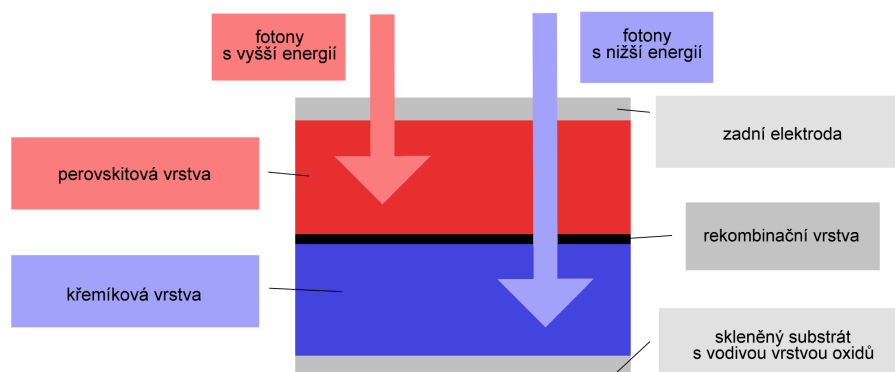
Obrázek 2.7: Detail, získaný pomocí elektronového mikroskopu, na krystalická zrna perovskitových struktur  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  připravených za stejných podmínek, kde (a) požadovaná struktura, (b) vzorek s nevhodnou morfologií.

## 2.2 Tandemový solární článek perovskit-krystalický křemík

Přidání vrstvy  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  do tandemu ke konvenčnímu solárnímu článku se v současné době jeví jako nejperspektivnější využití perovskitové technologie. Proto byla v uvedené teoretické části popsána struktura tandemových solárních článků na bázi perovskitu a krystalického křemíku, spolu s principem jejich fotovoltaické přeměny.

### 2.2.1 Základní struktura a princip tandemového solárního článku perovskit-krystalický křemík

Tandemové solární články perovskit-krystalický křemík jsou tvořeny dvěma fotovoltaickými články s různou šířkou zakázaných pásů. Tyto články jsou řazeny do série. Dopadající sluneční záření prochází nejdříve vrstvou s vyšší a následně s nižší šířkou zakázaného pásu. [Benesova]



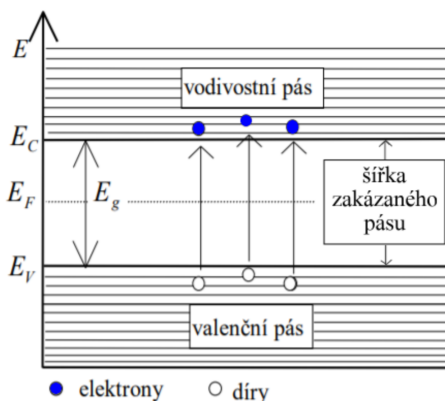
Obrázek 2.8: Schematická struktura a princip tandemového solárního článku. Inspirováno [Eperon].

Struktura tandemového solárního článku perovskit-krystalický křemík je uvedena na Obrázku 2.8. Nejčastěji voleným substrátem, na který je článek deponován, je sklo s nanosenou vodivou vrstvou oxidů (např. fluorem dopovaný oxid cínčitý FTO, indiem dopovaný oxid cínčitý ITO). Tato vrstva tvoří tzv. průhlednou (dolní) elektrodu. Následuje křemíková vrstva, pokrytá přechodovou (rekombinační) vrstvou, tvořící polovodičový p-n přechod. Na ni je depozicí nanosená vrstva perovskitového materiálu, na které je umístěna zadní elektroda. [Eperon, Benesova]

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

Přeměna sluneční energie na energii elektrickou je založena na absorpci dopadajících fotonů elektromagnetického slunečního záření s vyšší energií, než je šířka zakázaného pásu fotovoltaického (polovodičového) materiálu. Absorpce fotonu odevzdá svoji energii, díky které dojde k vybuzení elektronu z pásu valenčního do pásu vodivostního a následnému vytvoření páru elektron-díra. Odvod generovaných elektronů a děr pomocí selektivních kontaktů vytvoří elektrický proud. [Benesova]

K tomu, aby mohl být pár elektron-díra vytvořen, musí mít dopadající foton dostatečnou energii, která musí být větší nebo rovna tzv. šířce zakázaného pásu. Tato šířka odpovídá energii  $E_g$ , která je nezbytná k přesunu elektronu z valenčního do vodivostního pásu. Pro krystalický křemík je hodnota  $E_g$  přibližně 1,1 eV. Křemíkové, konvenčně vyráběné, sluneční články jsou tedy schopny absorbovat pouze fotony s energií větší nebo rovnou hodnotě 1,1 eV. V případě, že dojde k absorpci fotonu s energií větší, rozdíl mezi touto energií fotonu a  $E_g$  se ztrácí ve formě tepla. [Liptak]



Obrázek 2.9: Pásový diagram zobrazující vodivostní, valenční a zakázaný pás. Převzato z [Liptak] a upraveno.

Šířka zakázaného pásu je v případě perovskitů snadno ovlivnitelná jejich složením (halogenidovými anionty), a to v rozmezí 1,5–2,3 eV. Vrchní perovskitová vrstva tandemového solárního článku absorbuje fotony s energií vyšší (např.  $\geq 1,6$  eV), a přes perovskit prošlé (neabsorbované) fotony s nižší energií (např. z intervalu 1,1–1,6 eV) jsou absorbovány spodní křemíkovou vrstvou. [Pvedu, Eperon] Takto vyrobený článek dokáže efektivněji využít energii dopadajících slunečních fotonů a mohl by dosáhnout účinnosti vyšší než 30 %. [Correa]

## Kapitola 3

# Experimentální část

Provedená experimentální část byla koncipována do dvou, vzájemně na sebe navazujících částí. První část byla věnována přípravě solárního článku na bázi hybridního perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . V druhé části byly popsány naměřené vlastnosti připravených článků, se specializací na měření voltampérové charakteristiky a sledování jevů vznikajících v důsledku osvětlení. V každé části byly nejdříve uvedeny doplňující východiska k rešeršní části, kterých bylo během přípravy a měření využito. Dále byla provedena prezentace dosažených výsledků.

Experimentální příprava a měření bylo provedeno v podmínkách Katedry elektrotechnologie Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, laboratořích Centra pokročilé fotovoltaiky (CAP) a Fyzikálního ústavu AV ČR (FZÚ AV ČR). Veškeré použité postupy vycházely z teoretických metod uvedených v teoretické nebo experimentální části. Během realizace byly tyto postupy přizpůsobeny dle rad a zkušeností pracovníků zmíněných pracovišť.

### 3.1 Příprava solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Příprava solárního článku na bázi hybridního perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  byla realizována deponováním podpůrných vrstev optimalizujících vlastnosti výsledných vzorků, na základní teoretickou strukturu tohoto typu článků. Proto byla v uvedené kapitole popsána základní struktura perovskitových solárních článků, spolu se zaznamenaným procesem experimentální přípravy.

#### Struktura perovskitového solárního článku

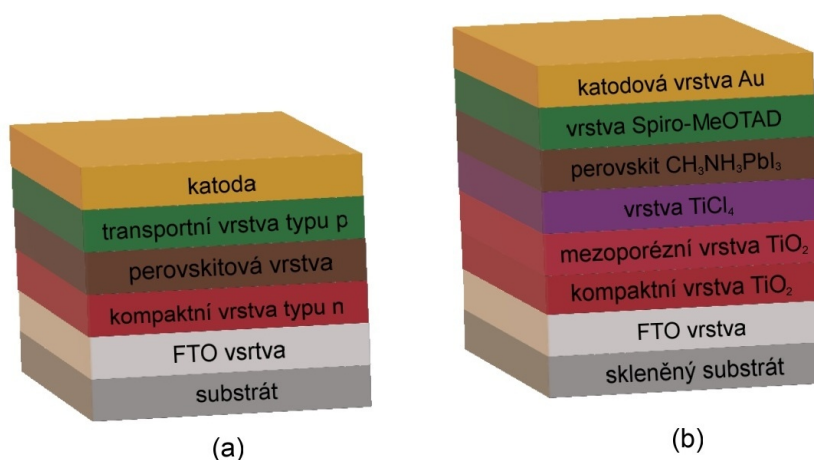
Základní struktura perovskitového solárního článku je tvořena vhodně ošetřeným substrátem, který zastává roli průhledné elektrody. Nejčastěji je volen skleněný substrát s nanosenou vodivou vrstvou oxidů (např. fluorem dopovaný oxid cínčitý FTO, indiem dopovaný oxid cínčitý ITO). Následuje na-

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

---

nesení kompaktní n-vrstvy, která tvoří elektronový kontakt. Jako další je deponována vybraná perovskitová vrstva, na kterou je nanesen děrový kontakt (transportní p-vrstva), díky kterému je zajištěn sběr kladně nabitých děr na katodě. [Scholtzova]

Kvalita výsledných parametrů připravených solárních článků je velmi snadno ovlivnitelná depozicí všech vrstev. [Mutalikdesai] Porovnání základní popsané a námi vytvořené struktury solárního článku na bázi perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  je zobrazeno na Obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Struktury perovskitových solárních článků (a) základní struktura, (b) struktura námi vyrobeného článku. Inspirováno [Scholtzova].

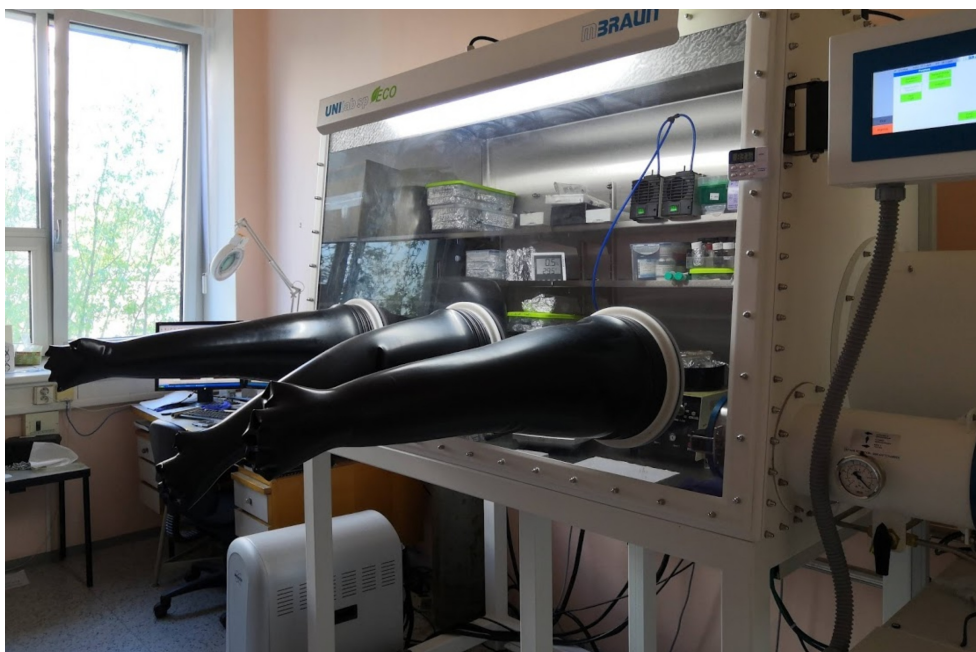
#### 3.1.1 Provedená příprava solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Během celého roku bylo vyrobeno několik desítek vzorků solárních článků na bázi perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , lišících se způsobem použité přípravy nebo získané struktury. Pro studium degradačních a reverzibilních změn byla vybrána série 6 vzorků, k jejichž přípravě bylo využito metody jedno-krokové i dvou-krokové depozice.

Veškeré přípravy roztoků a procesy jejich deponování byly provedeny za minimálních koncentrací vlhkosti a kyslíku nastavených dusíkovým *gloveboxem* typu MBraun UNILab ( $\text{H}_2\text{O} < 1 \text{ ppm}$  a  $\text{O}_2 < 10 \text{ ppm}$ ) nebo za podmínek poskytnutých filtrační digestoří Captair Toxicap umístěných v laboratořích Centra pokročilé fotovoltaiky. Získané vzorky solárních článků na bázi perovskitu, společně se vzorky získanými v průběhu přípravy, byly uchovávány v dusíkovém *gloveboxu* s ochranou proti dopadajícímu UV záření.



### 3.1. Příprava solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$



Obrázek 3.2: Dusíkový *glovebox* typu MBraun UNIlab v laboratoři Centra pokročilé fotovoltaiky (CAP), Katedře elektrotechnologií FEL ČVUT v Praze.

#### Příprava perovskitových roztoků

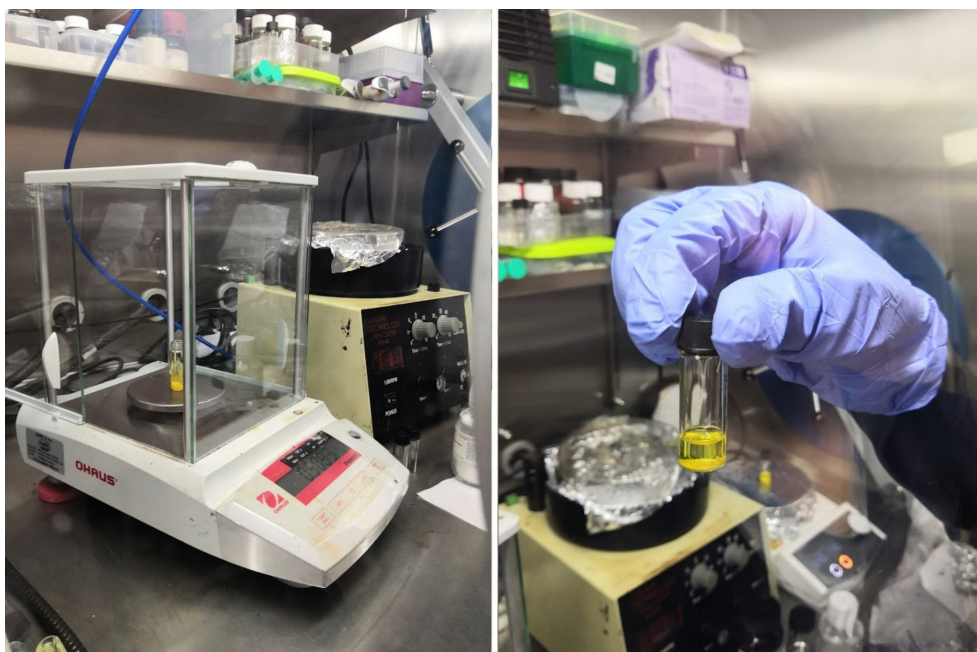
K vytvoření hybridní perovskitové vrstvy na bázi jodidu methyলামonno-olovnatého  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  byly den předem připraveny roztoky, odpovídající jednotlivým metodám rotačního nanášení mokrou formou.

Pro přípravu roztoku jedno-krokové depozice bylo využito 507,8 mg jodidu olovnatého  $\text{PbI}_2$  a 175,8 mg jodidu methyলামonného  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  (MAI) rozpuštěných v 0,66 ml  $\gamma$ -butyrolaktonu GBL a 0,44 ml dimethylsulfoxidu DMSO. Proces rozpuštění probíhal za stálého míchání při teplotě 70 °C až do doby nanášení perovskitové vrstvy hybridní struktury  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ .

Pro dvou-krokovou depozici byl připraven roztok jodidu olovnatého  $\text{PbI}_2$ , rozpuštěním 461,0 mg  $\text{PbI}_2$  v 0,95 ml N,N-dimethylformamidu DMF a 0,05 ml dimethylsulfoxidu DMSO. Rozpuštění bylo provedeno občasným protřepáním získaného roztoku a jeho zahříváním na teplotu 70 °C po dobu asi 30 minut. Následně byl roztok až do doby deponování perovskitové vrstvy  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  uchováván při teplotě dusíkového *gloveboxu*. Pro přípravu roztoku jodidu methyলামonného  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}$  (MAI) bylo připraveno 70 mg této sloučeniny, která byla rozpuštěna až těsně před nanášením.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

---



Obrázek 3.3: Příprava roztoků pro jedno-krokovou metodu depozice perovskitové struktury  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Připravený roztok jodidu olovnatého  $\text{PbI}_2$  a jodidu methylamonného  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  (MAI).

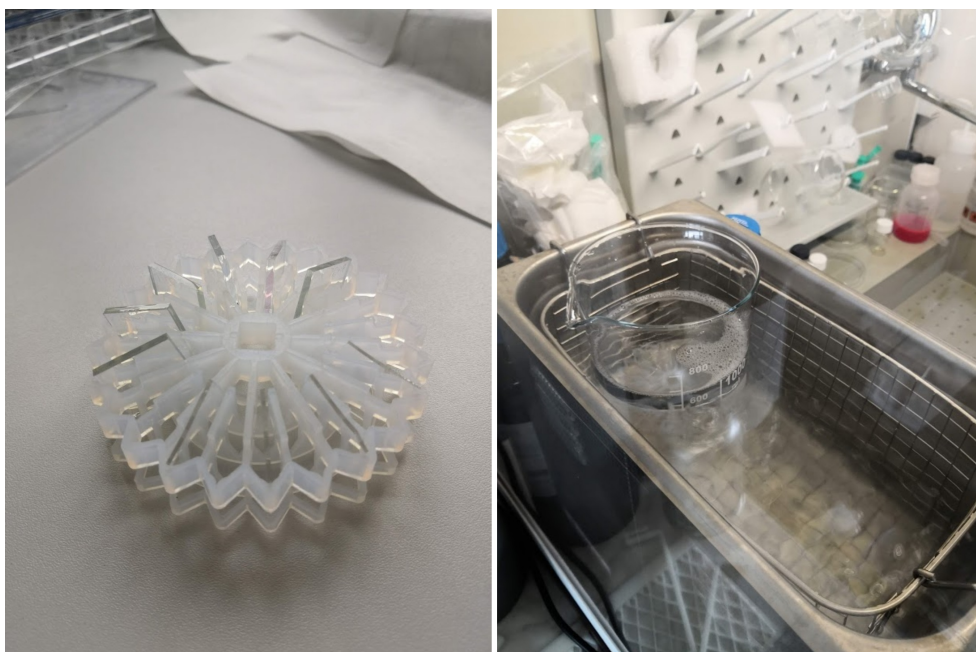
#### Příprava perovskitových solárních článků

Solární články na bázi perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  byly zhotoveny nanesením dále uvedených vrstev.

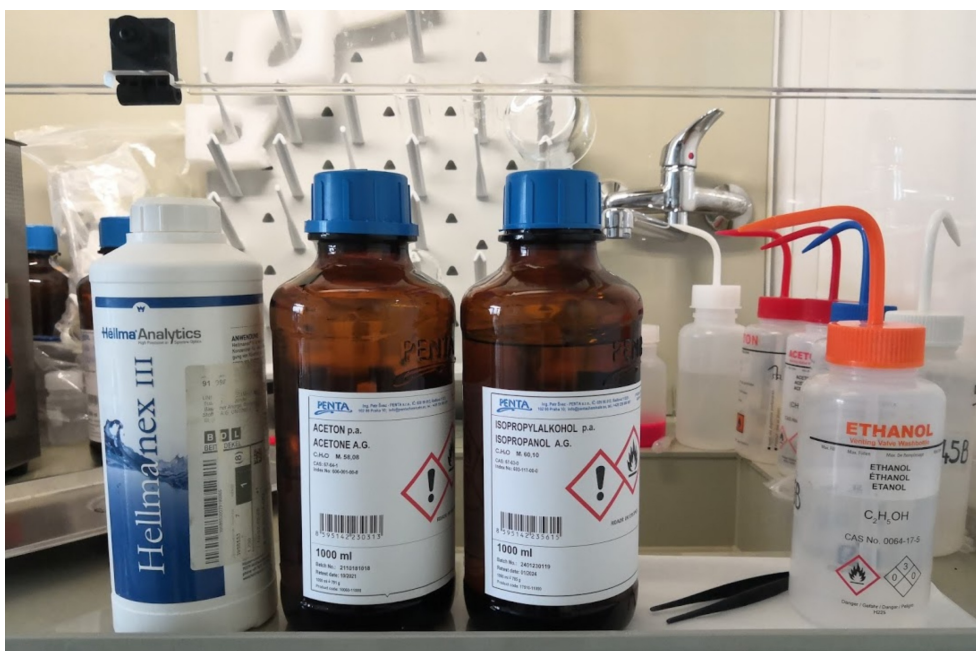
##### Substrát

Roztoky byly deponovány na komerčně vyráběná skla SOLARONIX rozměru 2 x 2,5 cm s nanesenou FTO (fluorem dopovaný oxid cíničitý) vrstvou, která již byla na jednom okraji odleptána kvůli zamezení zkratu se zadním kontaktem. V případě, kdy nebylo těchto skel využíváno, byla přibližně třetina FTO vrstvy odleptána pomocí dvou-molárního roztoku kyseliny chlorovodíkové 2M HCl a práškového zinku. Tato skla byla očištěna s využitím tříступňové metody čištění za pomoci ultrazvukové čističky, kde jako média ultrasonifikace byl zvolený 2% roztok zásaditého koncentrátu Hellmanex a destilované vody, aceton a isopropylalkohol IPA. Jednotlivé sonifikace byly prováděny po dobu 10–15 minut. Na závěr byla skla očištěna pomocí etanolu a stlačeného dusíku.

### 3.1. Příprava solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$



Obrázek 3.4: Proces třístupňové metody čištění s využitím ultrazvukové čističky. Košík se vzorky připravenými na čištění. Pracující ultrasonikátor.



Obrázek 3.5: Využitá média tříkrokové metody ultrasonifikace. Zleva zásaditý koncentrát Hellmanex, aceton a isopropylalkohol IPA. Ethanol sloužící k oplachu očištěných vzorků.

#### **Kompaktní vrstva oxidu titaničitého $\text{TiO}_2$**

Nanesení kompaktní vrstvy oxidu titaničitého  $\text{TiO}_2$  bylo provedeno sprejovou pyrolýzou, pomocí rozprašovací pistole poháněné stlačeným kyslíkem. Před aplikací byly vzorky zahřáty na teplotu  $450\text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 15 minut. Samotná pyrolýza byla realizována za stejné teploty, na přibližně dvě třetiny plochy vzorků, z konstantní výšky cca 20 cm, využitím 4 ml roztoku 0,4 ml prekurzoru titanu diisopropooxidu bis(acetylacetonátu) a 3,6 ml absolutního etanolu. Proces byl ukončen žíháním takto nanesené vrstvy za teploty  $500\text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 30 minut a jejich následným zchlazením na pokojovou teplotu.

#### **Mezoporézní vrstva oxidu titaničitého $\text{TiO}_2$**

Pro depozici mezoporézní vrstvy oxidu titaničitého  $\text{TiO}_2$  byl připraven roztok dyesolu (30 NR-D) a absolutního ethanolu v poměru 144 mg/ml. S využitím *spin-coateru*, s nastavením 4000 rpm po dobu 20 s a náběžnou hranou 2000 rpm, bylo na jednotlivé vzorky aplikováno 100  $\mu\text{l}$  tohoto roztoku. Po ukončení spinování byly vzorky umístěny na vyhřátou plotnu na  $150\text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 10 minut. Celý proces byl ukončen sintrováním nanesené vrstvy při teplotě  $500\text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 1 hodiny a následným zchlazením vzorků na teplotu okolí.

#### **Vrstva lithia bis(trifluorometanesulfonyl)imidu LiTFSI**

K optimalizaci vlastností vrstvy oxidu titaničitého  $\text{TiO}_2$ , byly připravené vzorky ošetřeny rotačním nanesením 100  $\mu\text{l}$  roztoku trifluorometanesulfonyl LiTFSI v acetonitrilu v poměru 10 mg/ml. Po ukončení *spinování* s nastavenými parametry na 3000 rpm po 30 s a zrychlením 1000 rpm, byly vzorky vyžíhány při  $450\text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 30 minut a následně ponechány do ustálení teploty na teplotu okolí.

Velmi často byla při přípravě tato vrstva nahrazována vrstvou chloridu titaničitého  $\text{TiCl}_4$ . Vzorky byly ošetřeny roztokem  $\text{TiCl}_4$  a destilované vody při  $70\text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 30 minut, následně byly očištěny pomocí etanolu a destilované vody a sintrovány při  $500\text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 30 minut. Proces byl ukončen ponecháním vzorků při pokojové teplotě. Během této přípravy nebyla uvedena vrstva použita.

#### **Vrstva hybridního perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$**

K depozici perovskitové vrstvy byly využity den předem připravené roztoky dle zmíněného postupu.

Před deponováním pomocí jedno-krokové metody byl horký roztok jodidu olovnatého  $\text{PbI}_2$  a jodidu methylnamonného  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}$  (MAI) zfiltrován přes PTFE stříkačkový filtr s velikostí pórů 0,2  $\mu\text{m}$ . Na jednotlivé vzorky bylo pomocí pipety nanášeno 150  $\mu\text{l}$  roztoku, který byl deponován pomocí *spin-coateru* s nastavenými parametry otáček na 1000 rpm po dobu 12 s s následným zrychlením na 5000 rpm po dobu 40 s. Pro zdokonalení krystalizačního procesu bylo po 20 s spinování přidáno malé množství dyethyl etheru. Následně byly vzorky, s nanášenou transparentní vrstvou, umístěny na plotnu vyhřátou na  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , kde došlo k jejich ztmavnutí k typické hnědo-černé barvě.



### 3.1. Příprava solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$



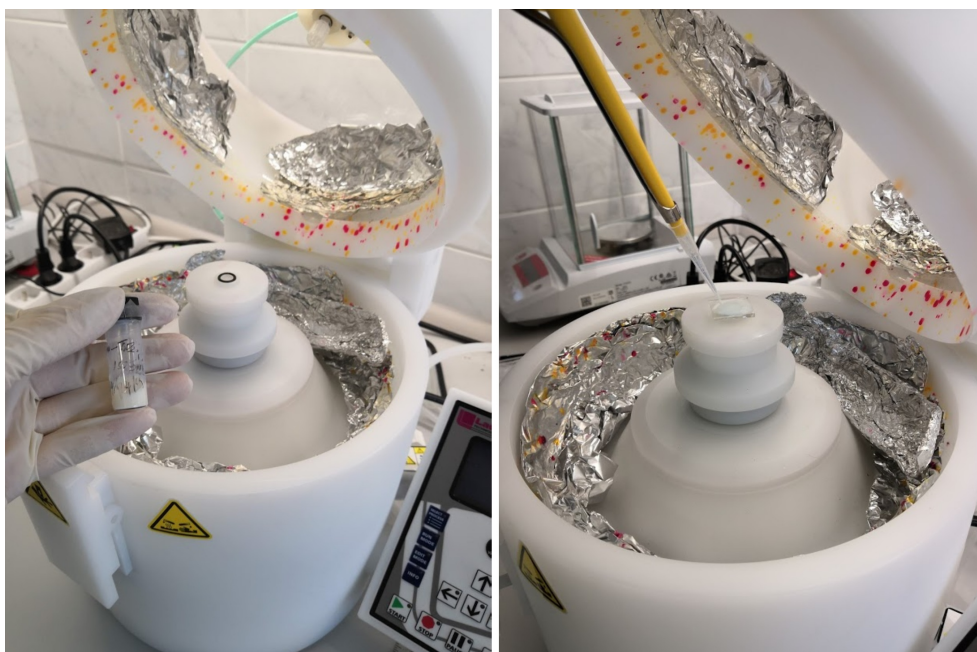
Obrázek 3.6: Filtrační digestoř Captair Toxicap v laboratoři Centra pokročilé fotovoltaiky (CAP), Katedře elektrotechnologie, FEL ČVUT v Praze. Roztok pro nanesení kompaktní vrstvy oxidu titaničitého  $\text{TiO}_2$  pomocí sprejové pyrolýzy.



Obrázek 3.7: Sprejová pyrolýza kompaktní vrstvy oxidu titaničitého  $\text{TiO}_2$ . Rozprašovací pistole. Využití umístění vzorků na vyhřáté plotně. 21

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

---



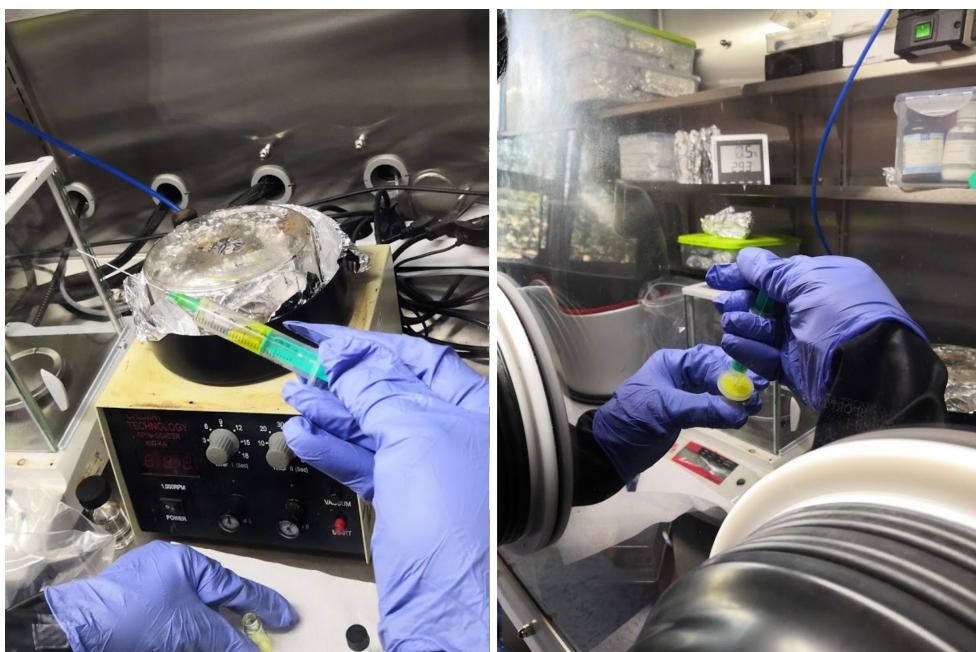
Obrázek 3.8: Nanesení mezoporézní vrstvy oxidu titaničitého  $\text{TiO}_2$  pomocí *spin-coateru*.



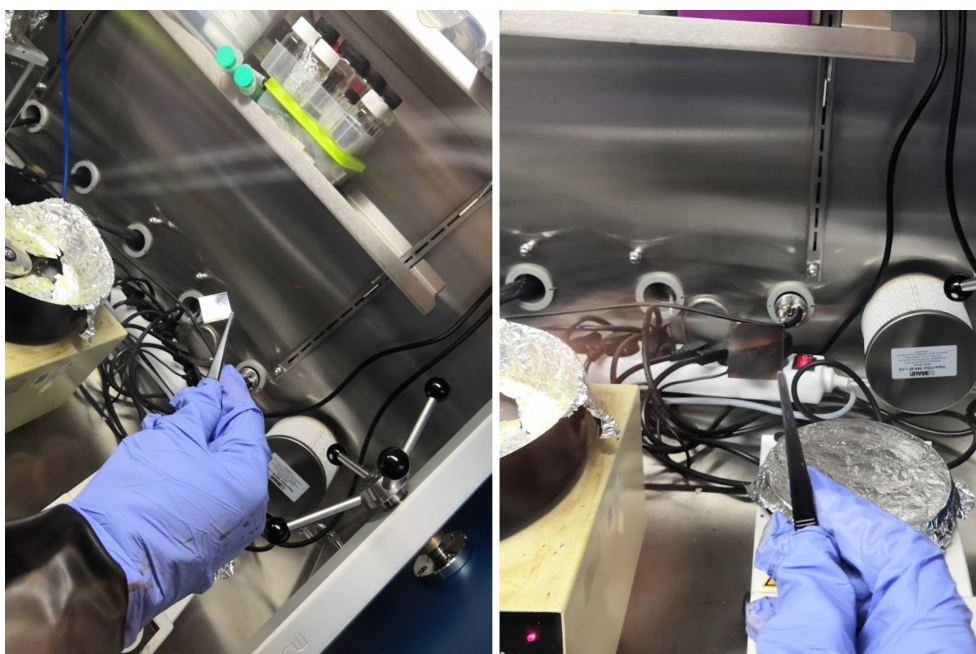
Obrázek 3.9: Nanesení vrstvy lithia bis(trifluorometanesulfonyl)imidu LiTFSI pomocí *spin-coateru*.



### 3.1. Příprava solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$



Obrázek 3.10: Filtrace roztoku jodidu olovnatého  $\text{PbI}_2$  a jodidu methylamonného  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}$  (MAI) přes PTFE stříkačkový filtr.

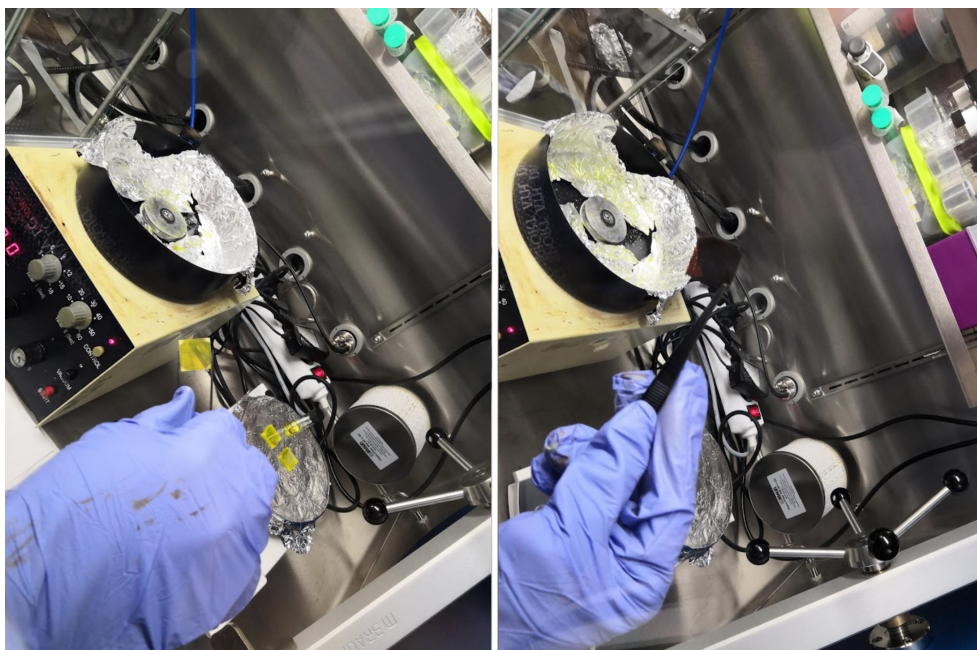


Obrázek 3.11: Nanesení vrstvy  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  pomocí jedno-krokové depozice. Deponovaná vrstva roztoku  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Výsledná tloušťka vrstvy je tak slabá, že se jeví jako transparentní. Typicky zbarvený vzorek po sejmutí z vyhřáté plotny.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

---

Před nanesením hybridní perovskitové vrstvy  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  pomocí dvou-krokové depozice byl nejdříve připraven krátkým protřepáním a zahřátím roztok jodidu methylnamonného  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}$  (MAI), kde byly k připravené sloučenině přidány 2 ml isopropylalkoholu IPA. Následovalo rotační nanesení  $100 \mu\text{l}$  roztoku jodidu olovnatého  $\text{PbI}_2$  na jednotlivé vzorky, sloužící jako substráty, s nastavenými parametry *spinneru* na 1000 rpm po dobu 40 s. Deponovaná vrstva byla žhána na plotně vyhřáté na  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 10 minut. K vytvoření perovskitové vrstvy bylo na nanesenou vrstvu rovnoměrně aplikováno  $200 \mu\text{l}$  roztoku MAI. Tento roztok se nechal do vrstvy  $\text{PbI}_2$  pronikat po dobu 60 s, během kterého došlo k typické změně barvy. Proces deponování vrstvy byl proveden pomocí *spin-coateru* s parametry 4000 rpm po dobu 40 s. Konečné ztmavnutí vzorků bylo způsobeno žháním za teploty  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 30 minut.



Obrázek 3.12: Nanesení vrstvy  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  pomocí dvou-krokové depozice. Deponovaná vrstva roztoku jodidu olovnatého  $\text{PbI}_2$ , s jasně žlutým zabarvením po sejmutí z plotny. Typický zbarvený vzorek po depozici roztoku jodidu olovnatého  $\text{PbI}_2$ .

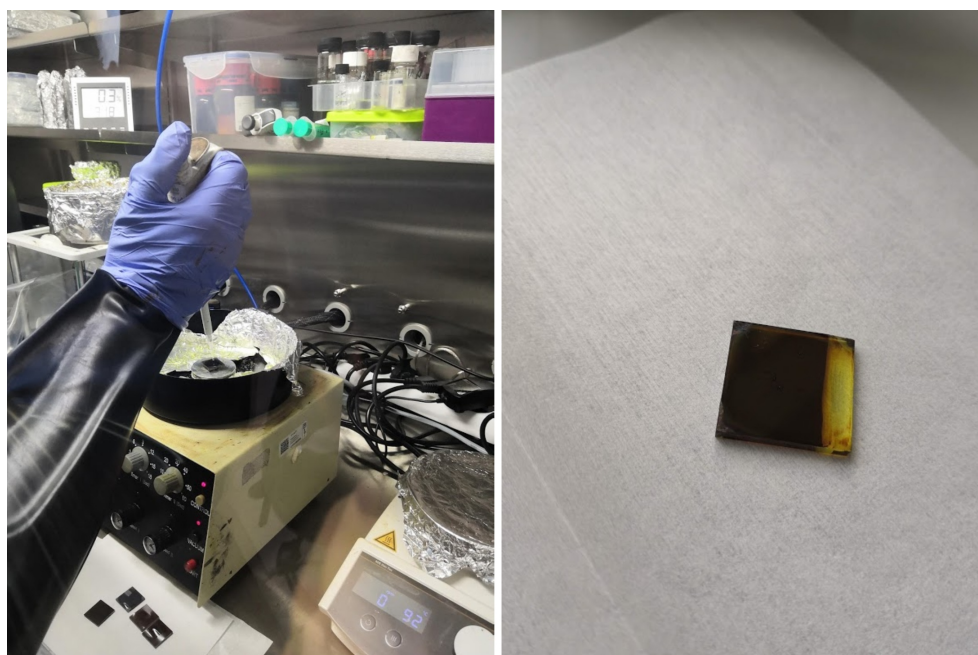


### Transportní vrstva Spiro-MeOTAD

K vytvoření transportní vrstvy byl pomocí *spin-coateru* nanesen roztok získaný z roztoků Spiro-MeOTAD a chlorbenzenu v poměru 72,3 mg/ml, 28,8  $\mu\text{l}$  4-t-butylpyridinu a 17,5  $\mu\text{l}$  roztoku LiTFSI získaného z LiTFSi a acetonitrilu připraveného v poměru 520 mg/ml. Na každý vzorek bylo naneseno 50  $\mu\text{l}$  tohoto roztoku, za předem nastavených podmínek *spin-coateru* (4000 rpm po dobu 30 sekund). Přibližně ze čtvrtiny plochy vzorků byly deponované vrstvy odstraněny, až k vrstvě FTO použitého skla, která tvoří samostatnou elektrodu. Pro zajištění optimálních vlastností deponované vrstvy, byly vzorky ponechány přes noc oxidovat ve vzduchotěsné nádobě (simulující podmínky suchého boxu) s využitím granulovité formy oxidu křemičitého Silikagel, jako pohlcovače vlhkosti.

### Katodová vrstva

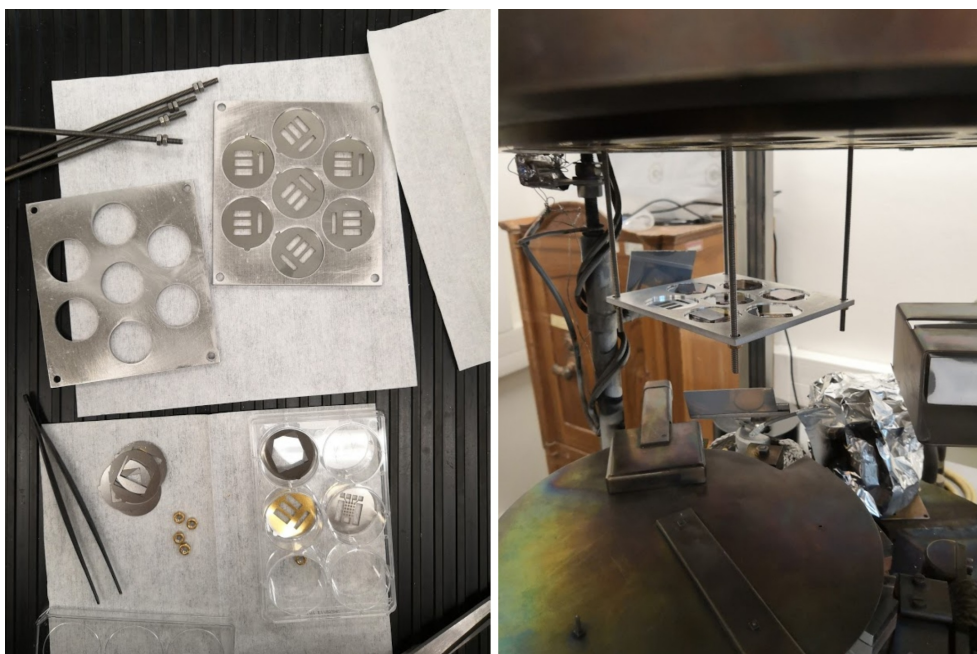
Zadní elektroda byla vytvořena pomocí vakuového zařízení pro napařování EDWARD, typu 19E6, instalovaného na Katedře elektrotechnologie. Pomocí masky, tvořící 3 oddělené solární články na jednom vzorku, byla napařena vrstva zlata.



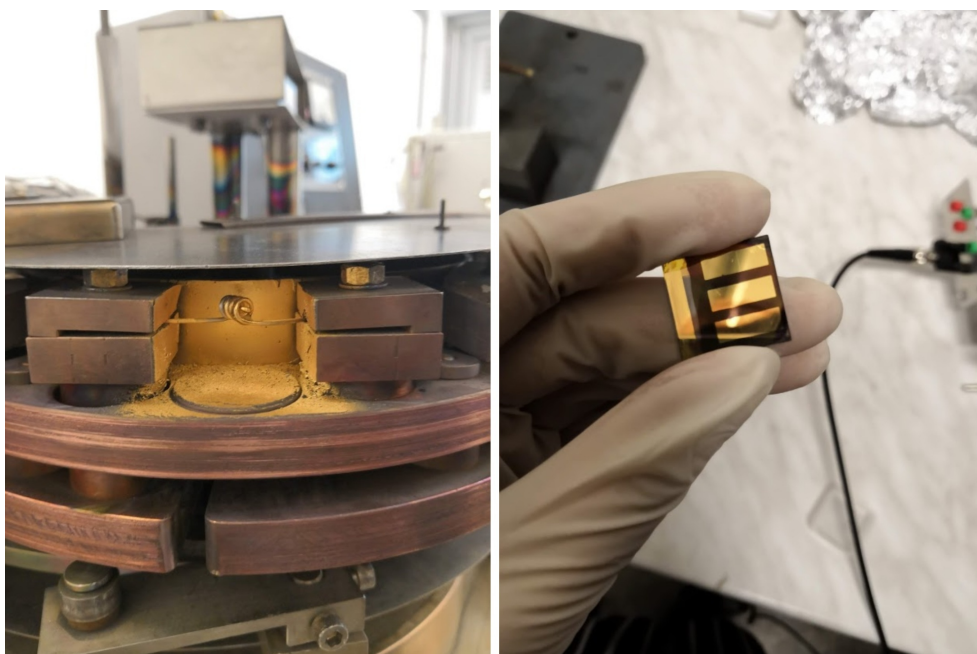
Obrázek 3.13: Nanesení transportní vrstvy Spiro-MeOTAD s využitím *spin-coateru*. Vzorek po odstranění deponovaných vrstev na pravém okraji, před nanesením zadní elektrody.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

---



Obrázek 3.14: Stínící maska pro napařování zadní elektrody solárních článků. Vakuové zařízení pro napařování EDWARD, s umístěnou stínící maskou.



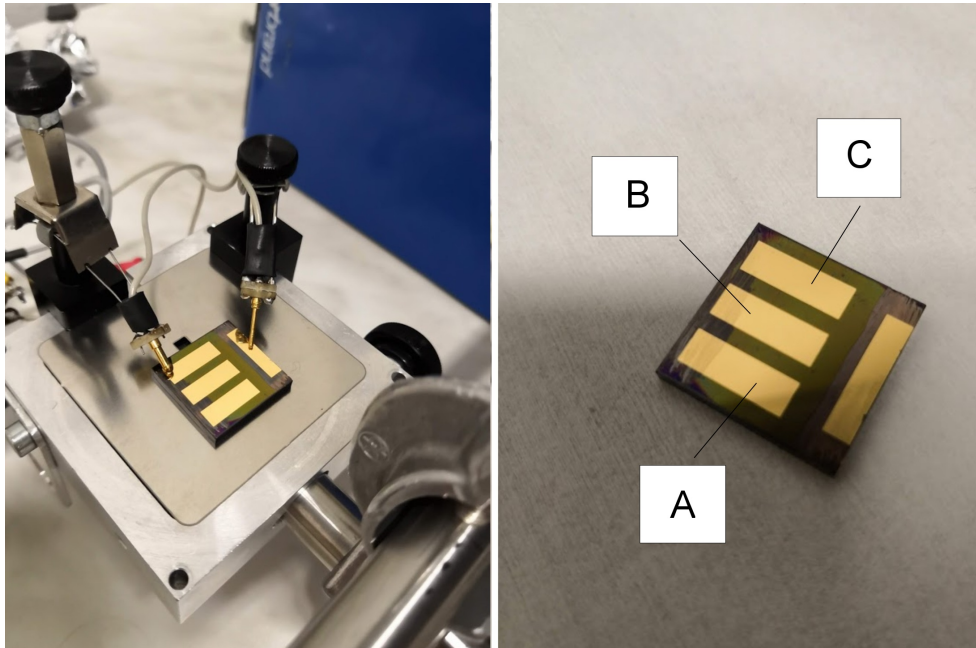
Obrázek 3.15: Zlato v odpařovacím zdroji. Napařená vrstva zlata, sloužící jako zadní elektroda na získaném vzorku solárního článku na bázi hybridního perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ .

### 3.2 Měření solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

Zaznamenaná měření byla uskutečněna na sérii 6 vzorků P0043–P0048, jejichž způsob přípravy byl detailně popsán. Každý ze vzorků obsahoval 3 oddělené solární články, na kterých byla jednotlivá měření provedena. Pro interpretaci výsledků byly využity vzorky s nejlepšími vlastnostmi.

V uvedené kapitole byly definovány charakteristické parametry měřené na solárních článcích. Dále byly uvedeny faktory ovlivňující stabilitu a způsobující reverzibilní jevy, vznikající v důsledku osvětlení, perovskitových solárních článků struktury  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Závěrem byly prezentovány dosažené výsledky jednotlivých měření.

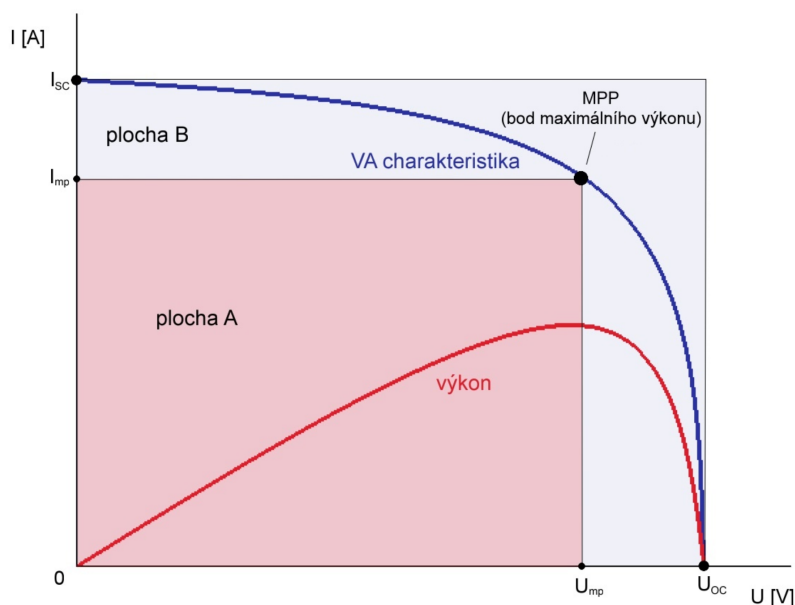
Vlastnosti připravených perovskitových solárních článků byly získány měřením voltampérových charakteristik, které byly měřeny čtyřkvadrantovým měřicím zdrojem Keithley 2401. Jako zdroj záření byl používán solární simulátor 89 North využívající bílé světlo s intenzitou záření 1 slunce ( $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ) a sada modrých LED diod.



Obrázek 3.16: Měření voltampérových charakteristik připraveného perovskitového solárního článku, čtyřkvadrantovým měřicím zdrojem Keithley 2401. Zavedené značení jednotlivých solárních článků na připraveném vzorku.

### Charakteristické parametry solárních článků

Mezi charakteristické veličiny, které jsou získávány při měření všech typů solárních článků, patří napětí naprázdno  $U_{OC}$ , které udává maximální možnou hodnotu napětí, pokud je článek ve zkratu, a proud nakrátko (někdy též zkratový proud)  $I_{SC}$ , který článek dodává. K porovnání kvality provedení získaných solárních článků je využíváno i ostatní charakteristických parametrů při maximální zátěži jako je proudová hustota  $J_{SC}$ , účinnost  $\eta$  a maximální výkon  $P_{MAX}$ , faktor plnění  $FF$ . K úplnému popsání naměřených parametrů článků je využíváno voltampérové (pracovní) charakteristiky a výkonové křivky. [PVeđu]



Obrázek 3.17: Voltampérová charakteristika solárního článku. Inspirováno [PVeđu].

#### Proudová hustota

Proudová hustota, která je v oblasti fotovoltaických solárních článků využívána k usnadnění výpočtu velikosti generovaného proudu, je získána pomocí podílu hodnota proudu a aktivní plochy článku. Často bývá vynášena místo proudu ve voltampérové charakteristice. Použití  $J_{SC}$  tvar křivky nijak neovlivní.

K výpočtu je využíván vzorec:

$$J_{SC} = \frac{I_{SC}}{A} \text{ [A/m}^2\text{]} \quad (3.1)$$

kde  $J_{SC}$  je proudová hustota,  $I_{SC}$  je proud nakrátko a  $A$  je plocha aktivní části článku. **[PVedu]**

### Účinnost

Parametr účinnosti je nejčastěji používán ke srovnávání několika solárních článků mezi sebou. Účinnost je definována jako podíl energie výstupní (ze článku) a vstupní (energie „ze slunce“), platí tedy vztah:

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot U_{OC} \cdot FF}{P_{in}} \text{ [%]} \quad (3.2)$$

kde  $\eta$  je účinnost,  $I_{SC}$  je proud nakrátko,  $U_{OC}$  je napětí naprázdno,  $FF$  je faktor plnění a  $P_{in}$  je vstupní výkon, který je pro výpočty obvykle  $1 \text{ kW/m}^2$  nebo  $100 \text{ mW/cm}^2$ . **[PVedu]**

### Maximální výkon

Výkon solárního článku je definován jako součin proudu a napětí. Pro každý článek existuje na jeho pracovní charakteristice bod, ve kterém má největší výkon. Tento bod je označován jako bod maximálního výkonu  $MPP$  o proudu  $I_{mp}$  a napětí  $U_{mp}$ . Výkon vypočteme dle vzorce:

$$P_{max} = I_{mp} \cdot U_{mp} \text{ [W]} \quad (3.3)$$

kde  $P_{max}$  je maximální výkon,  $I_{mp}$  a  $U_{mp}$  jsou hodnoty proudu a napětí v bodě  $MPP$ . **[PVedu]**

### Faktor plnění

Faktor (činitel) plnění tzv. Fill Factor je další parametrem, který je určen ke srovnávání kvality solárních článků. Činitel lze vyjádřit jako poměr vyznačených ploch (výkonů) na Obrázku 3.17, k jeho výpočtu je využíváno vzorce:

$$FF = \frac{\text{plocha A}}{\text{plocha B}} = \frac{I_{mp} \cdot U_{mp}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \text{ [-]} \quad (3.4)$$

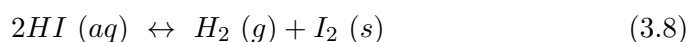
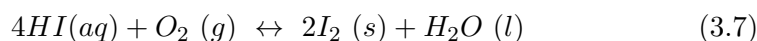
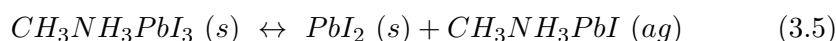
kde  $FF$  je faktor plnění,  $I_{SC}$  je proud nakrátko,  $I_{mp}$  je hodnota proudu v bodě maximálního výkonu  $MPP$ ,  $U_{OC}$  je napětí naprázdno,  $U_{mp}$  je hodnota napětí v bodě maximálního výkonu  $MPP$ , plochy A a B symbolizují příslušné výkony. **[PVedu]**

### Stabilita perovskitových solárních článků

Faktory ovlivňující stabilitu perovskitových fotovoltaických solárních článků jsou vlhkost vzduchu spolu s přítomností kyslíku a viditelné záření, dále pak teplota, proces přípravy a kvalita použitých materiálů. [Hajkova, Mutalikdesai]

#### Vliv přítomnosti vlhkosti vzduchu, kyslíku a viditelného záření

Perovskit  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  má v přítomnosti vlhkosti sklon k hydrolyze, která negativně ovlivňuje charakteristické vlastnosti fotovoltaických solárních článků. Za přítomnosti vlhkosti, kyslíku a záření degraduje dle následující rovnice:



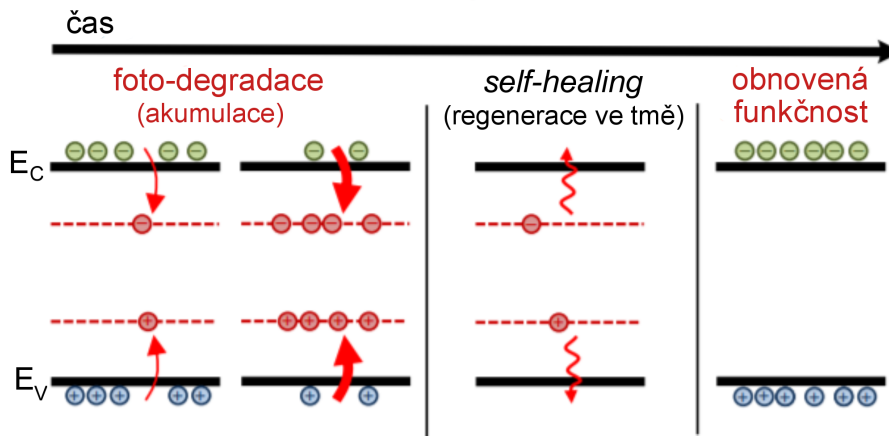
Reakce 3.6 může postupovat dvěma způsoby, rozkladem pomocí jedнокrokové redoxní reakce za přítomnosti kyslíku 3.7 nebo pomocí fotochemické reakce za přítomnosti záření 3.8. [Mutalikdesai]

K vytvoření perovskitové struktury, jsou obvykle vzorky žhánány při 100 °C po dobu 10 minut. [Xiao] Při navýšení teploty žhánání na 120 °C začalo docházet k rozkladu perovskitu na  $\text{Pb}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}$  a  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl}$ , při teplotě 300 °C pak na  $\text{Pb}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  a  $\text{HI}$ . Tato degradace je způsobena kompaktní nebo porézní nestechiometrickou  $\text{TiO}_2$  vrstvou, která v přítomnosti s perovskitem a zářením způsobuje oxidaci organických sloučenin. [Dualeh, Ito] Ke zvýšení stability vytvářených fotovoltaických solárních článků se na rozhraní vrstvy  $\text{TiO}_2$  a perovskitu přidává tzv. blokovácí vrstva (např.  $\text{TiCl}_4$ ). [Dualeh, Mutalikdesai]

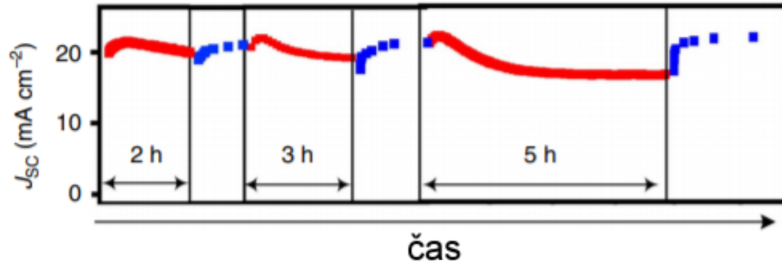
### Reverzibilní vlastnosti perovskitových solárních článků

Mezi zásadní problémy perovskitových solárních článků je řazena jejich nedostatečná stabilita při dlouhodobém slunečním záření. [Hajkova, Mutalikdesai, Nie] Jedním z prokázaných důvodů degradace osvitem, je vznik stavů metastabilních pastí, které při delší době ozařování mohou vést až k akumulaci volných nábojů. Pravděpodobně při těchto stavech dochází ke slučování pastí, které díky svým vlastnostem vytváří makroskopické nabitě oblasti. To způsobuje např. nehomogenní vlastnosti elektrického pole perovskitové struktury. [Nie] Intenzita degradace a pozorovaných změn, probíhajících v solárních člancích, je snadno ovlivnitelná vlnovou délkou použitého záření. [Cappel]





Obrázek 3.18: Schéma mechanismu procesu degradace a regenerace. Vyobrazení valenčního  $E_V$  a vodivostního  $E_C$  pásu během foto-degradace (akumulace náboje), procesu regenerace za tmy (*self-healing*) a po zregenerování. Červené přerušované čáry znázorňují stavy meta-stabilních pastí. Šipky naznačují zaplňování a uvolňování pastí fotogenerovanými nosiči. Převzato z [Nie] a upraveno.



Obrázek 3.19: Cykly degradačního procesu perovskitového solárního článku zaznamenaného během jednoho dne. Červená barva značí dobu osvětlení, modrá uchování ve tmě. Převzato z [Nie] a upraveno.

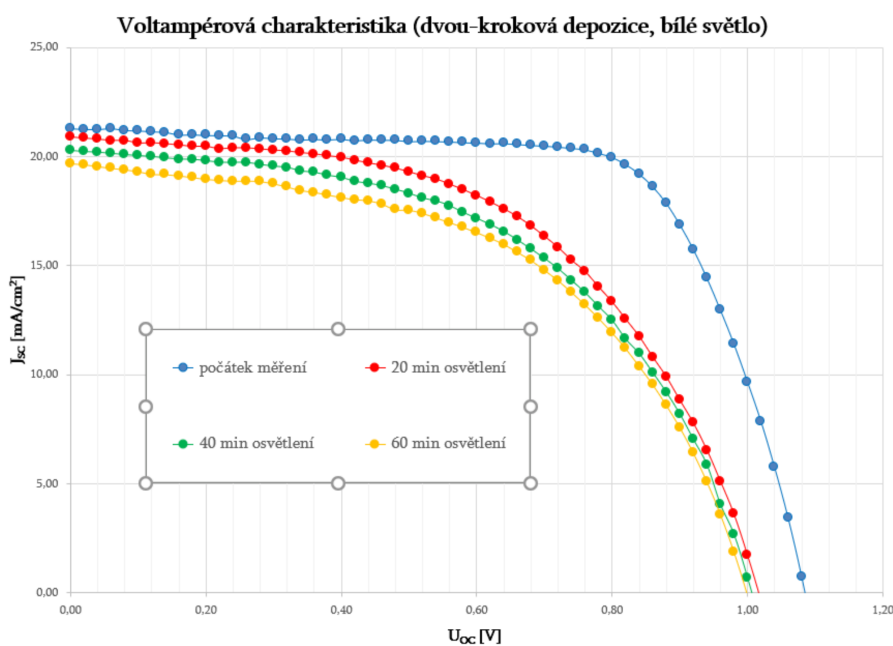
Proces degradace solárních článků může být vystřídán procesem regenerace (*self-healing*). Regenerací je označována obnova parametrů solárních článků k jejich původní hodnotě, kterou je možné označit jako vykazování reverzibilních vlastností. Tyto vlastnosti vykazovaly solární články na bázi perovskitu po uchování po určitou dobu ve tmě, kdy došlo ke snížení počtu meta-stabilních hlubokých pastí. Vykazované vlastnosti se dostavily i po opakovaném střídání osvětlení a tmy. Aplikovaným procesem regenerace lze významně

zvrátit pokles sledovaných parametrů perovskitových solárních článků. [Nie]

### 3.2.1 Měření voltampérové charakteristiky

Základní parametry připravených solárních článků na bázi perovskitové struktury  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  byly získány měřením voltampérových charakteristik. Pro měření byl vybrán solární článek B vzorku P0046, který byl připraven pomocí metody dvou-krokové depozice. Vzorek byl nepřetržitě osvětlován solárním simulátorem, využívajícím bílé světlo o intenzitě 1 slunce, po dobu jedné hodiny. Jednotlivá měření byla prováděna s krokem pěti minut, při teplotě místnosti 22,9-23,9 °C, za konstantních podmínek vzdušné vlhkosti 37,8 %.

Na Obrázku 3.20 jsou zobrazeny naměřené voltampérové charakteristiky. Na ose y je vynesena proudová hustota, která určuje přesnou velikost proudu generovaného na aktivní ploše článku. Pro lepší interpretaci výsledků byly do grafu vyneseny hodnoty získané s krokem měření 20 minut.



Obrázek 3.20: Pozorování degradačního procesu na vynesných voltampérových charakteristikách při osvitě solárním simulátorem 89 North poskytujícím nepřetržitý osvit bílého světla o intenzitě záření 1 slunce.

Prvním měřením byly získány charakteristické parametry připraveného článku. U všech ostatních měření byl zaznamenán pokles těchto hodnot. Kon-



### 3.2. Měření solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

stantní osvit způsobil degradaci získaných parametrů. Nejrychlejší degradace byla zaznamenána při počátečních měřeních. S narůstající délkou prováděného experimentu rychlost degradace klesala. Hodnoty naměřených parametrů prezentující faktor degradace jsou uvedeny v Tabulce 3.1, kde pro výpočet  $J_{SC}$  bylo využito vztahu 3.1 a pro výpočet  $\eta$  vztahu 4.9.

čas [min]	$U_{OC}$ [V]	$J_{SC}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	FF [-]	$\eta$ [%]
0	1,085	13,400	0,699	10,163
20	1,016	13,148	0,539	7,200
40	1,006	12,763	0,526	6,754
60	0,999	12,385	0,528	6,533

Tabulka 3.1: Pozorované hodnoty degradačního procesu na charakteristických parametrech perovskitového solárního článku připraveného pomocí dvoukrokové depozice nepřetržitě osvětlovaného bílým světlem solárního simulátoru o intenzitě 1 slunce.

Na začátku experimentu článek dosahoval přibližně 10 % hodnoty účinnosti  $\eta$  a téměř 70 % hodnoty činitele plnění  $FF$ . Tento článek byl podroben degradačnímu experimentu. Pro napětí naprázdno  $U_{OC}$  byla nejrychlejší degradace zaznamenána při měření po 20 minutách, kdy hodnota poklesla přibližně o 6,4 % vůči počáteční hodnotě. V následujících 40 minutách došlo k patrnému snížení degradační rychlosti, hodnota napětí byla snížena o 1,5 % vztažením ke stejné hodnotě. Hodnoty proudové hustoty  $J_{SC}$  vykazovaly zhruba konstantní rychlosti degradace. Při prvním měření se pohybovala hodnota degradace kolem 1,9 % vzhledem k první naměřené hodnotě. Pro následující měření s krokem 20 minut byl zaznamenán vždy pokles o 2,8 % vůči počáteční hodnotě. Pro hodnotu činitele plnění  $FF$  byl nejdříve zaznamenán pokles naměřených hodnot, ovlivněný degradací, na přibližně 77,2 % původní hodnoty. Degradační faktor s parametrem času slábl, pro další měření byl zaznamenán pokles o 1,8 %. Po dalších 20 minutách měření hodnota  $FF$  již neklesala, naopak byl zaznamenán její nárůst o 0,3 % vůči počáteční hodnotě. U hodnoty účinnosti  $\eta$  byly sledovány podobné vlastnosti degradačního procesu jako pro hodnotu napětí naprázdno  $U_{OC}$ . Nejprve byl vykazován nejsilnější pokles, o 29 % vzhledem k počáteční hodnotě, následovaný poklesem o 4,3 % a 2,2 % vůči původní hodnotě pro uvedené kroky měření.

Při srovnání faktorů ovlivňujících stabilitu perovskitových solárních článků struktury [Mutalikdesai] byly zaznamenané degradační procesy nepochybně nejvíce ovlivňovány osvitem bílým světlem simulujícím solární svit o hodnotě 1 slunce (100 mW/cm<sup>2</sup>), vzhledem ke konstantním podmínkám kyslíku a vlhkosti v průběhu měření. Dalším faktorem, který mohl získané hodnoty ovlivnit, byla teplota článků, která se pravděpodobně s rostoucí délkou doby měření (a osvit) zvyšovala. Tato teplota však nebyla zaznamenávána. Při tomto měření byl u hodnoty  $FF$  zaznamenán regenerační proces, který ve srovnání s

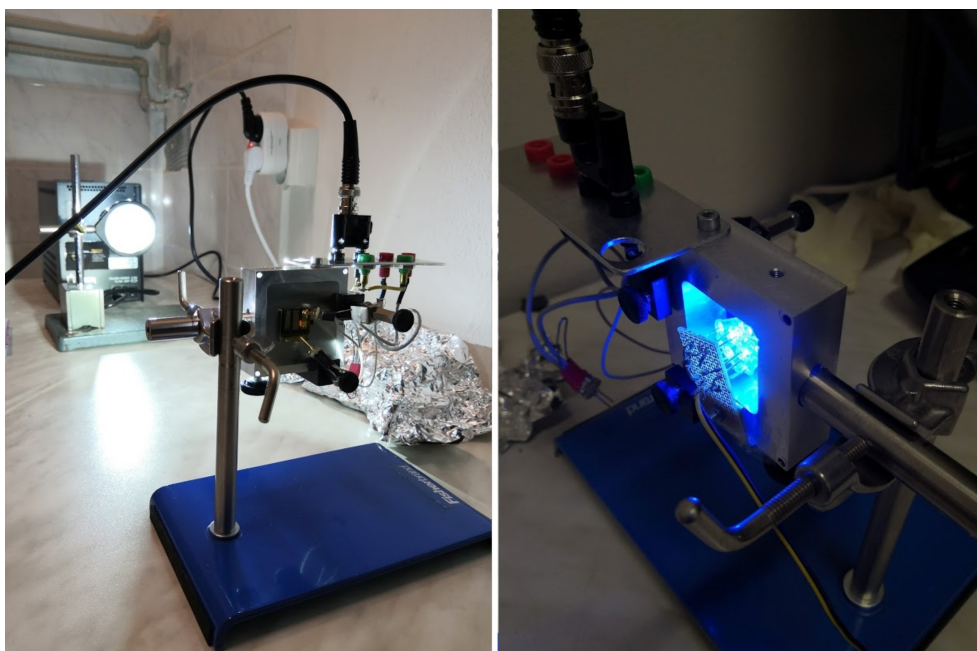
### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

---

ostatními výsledky byl posouzen jako možná chyba měření.

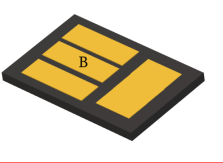
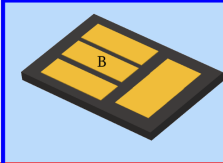
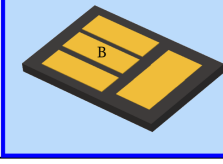
#### 3.2.2 Sledování reverzibilní jevů v důsledku osvětlení

Měření určené ke sledování reversibilních jevů na připravených perovskitových solárních článcích bylo rozděleno na dvě části. V prvním měření byly využity různé zdroje osvětlení – bílé světlo solárního simulátoru o intenzitě 1 slunce a sadou modrých LED diod. V druhém měření byly srovnány reverzibilní jevy odlišných metod použité depozice perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ : jedno-krokové a dvou-krokové. V uvedených grafech byly užity normalizované hodnoty. Jejich přesný výpočet je uveden v Dodatku A.



Obrázek 3.21: Měření připravených vzorků při osvětlení bílým světlem solárního simulátoru 89 North a osvětlení sadou modrých LED diod.

### 3.2. Měření solárního článku na bázi perovskitu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$

VZOREK	SVĚTLO	
	BÍLÉ	MODRÉ
P0046 článek B dvou-kroková depozice		
P0044 článek B jedno-kroková depozice		

Obrázek 3.22: Metodika měření sledování reverzibilních jevů v důsledku osvětlení. Červenou barvou je označeno Pozorování různých zdrojů osvitu, modrou barvou Pozorování různých metod deposice perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ .

#### Porovnání různých zdrojů osvitu

Pro měření byl využit solární článek B vzorku P0046 připraveného pomocí dvou-krokové deposice. Pro srovnání různých zdrojů osvitu byly provedeny dva 7 hodinové procesy měření. Během 1 hodiny nepřetržitého osvitu bílým světlem byly měřeny hodnoty s krokem 5 minut. Následovalo uložení vzorku do tmy po dobu 6 hodin, kdy byly zaznamenávány hodnoty změn parametrů s krokem 1 hodiny. Pro měření způsobené osvitom modrým světlem byl vzorek hodinu nepřetržitě osvětlován. Po této době byla změřeny požadované parametry. Následně byl vzorek uchován ve tmě. Měření parametrů ve tmě bylo prováděno se stejným krokem jako u osvitu bílým světlem. Získané hodnoty jednotlivých parametrů jsou na Obrázku 3.23.

U všech měřených parametrů byly zaznamenány rozdíly mezi procesy vznikajícími srovnávanými zdroji záření. Během měření provedeném za nepřetržitého osvitu byly pozorovány degradační procesy. Měření provedené za tmy prokázalo vykazování reverzibilních vlastností u sledovaného článku.

Pro hodnoty napětí na prázdko  $U_{OC}$  byl zaznamenán silnější vliv degradace při osvitu bílým světlem. Naměřené hodnoty ukazují, že minima dosahujícího 91,3 % maximální hodnoty zaznamenané během měření způsobeného degradací nebylo dosaženo na konci hodiny nepřetržitého osvitu. Vzhledem k ostatním naměřeným hodnotám byla hodnota z 50 minuty měření vyhodnocena jako nerelevantní. Během uchování vzorků ve tmě byly u hodnoty napětí pozorovány regenerační vlastnosti. Pro oba srovnávané typy světla byl po první hodině tohoto měření zaznamenán nárůst měřeného parametru nad velikost původní hodnoty nepoznamenané degradačním faktorem o 0,5 % pro

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

---

bílé světlo a o 1,8 % pro modré světlo. Pozorovaná reverzibilní změna byla tak silná, že následně zaznamenaná degradace, která byla považována za ustálení jevů probíhajících ve člancích, ustálila po 6 hodinách měření hodnoty napětí na prázdno  $U_{OC}$  na hodnotách lišících se o desetiny procent od hodnot původních. Tento proces se pro obě srovnávaná měření téměř nelišil.

Sledované hodnoty proudové hustoty  $J_{SC}$  během nepřetržitého hodinového osvitu pro oba zdroje osvitu degradovaly. Byla zaznamenána silnější degradace pro osvit modrým světlem. V obou případech byl pozorován regenerační nárůst při měření provedeném za uložení do tmy tohoto parametru na hodnotu vyšší, než byla hodnota výchozí. Proudová hustota se po procesu měření ustálila přibližně na 99,2 % pro bílý a 98,7 % pro modrý zdroj osvitu maximální hodnoty, které bylo během měření dosaženo. Pro bílé světlo byla pozorována degradace i přes ponechání tohoto článku ve tmě. Pro světlo modré došlo k tak výraznému regeneračnímu procesu, že poslední měřené parametry dosáhly nad hodnoty počáteční. Procentní rozdíl změn probíhajících mezi srovnávanými zdroji, byla zaznamenána rostoucí tendence, pohybující se v rámci desetin procenta, od měření provedeném po 1 hodině uchování ve tmě.

U hodnot činitele plnění  $FF$  byly během hodiny nepřetržitého osvitu pozorovány podobné vlastnosti na diferentní zdroje osvitu, jako vykazovalo napětí naprázdno  $U_{OC}$ . Bílé světlo mělo na degradaci větší vliv než světlo modré. Během měření pomocí bílého záření byl v této části měřícího procesu zaznamenán patrný výkyv měřený v 45 a 50 minutě. Hodnoty získané v těchto minutách byly výsledně vyhodnoceny jako chybná měření. Činitel plnění i přes uchování vzorku ve tmě při osvitu modrým světlem stále vykazoval degradační účinky. Tento proces se začal měnit až mezi 2–3 hodinou měření tohoto procesu, kde byly zaznamenány reverzibilní vlastnosti. Tento vzorek i přes uchování ve tmě při osvitu zdrojem modrého záření degradoval na 86,5 % původní hodnoty. Pro osvit světlem bílým byly sledovány regenerační schopnosti měřeného vzorku během celé doby uchování ve tmě. I přes tyto pozorované jevy byla u vzorku zaznamenána degradace na 87,3 % výchozí hodnoty.

Získané hodnoty účinnosti  $\eta$  byly vypočteny z ostatních naměřených hodnot dle vztahu 4.9. Proto je u osvitu bílým světlem pozorován stejný výkyv, jako u hodnoty činitele plnění  $FF$ . Pro zdroj tohoto napětí byla také zaznamenána silnější intenzita degradace. Uchování vzorku ve tmě mělo pro oba srovnávané zdroje osvitu na hodnotu účinnosti pozitivní vliv – byly zaznamenány regenerační vlastnosti. Při osvitu modrým světlem byly tyto jevy pozorovány se silnější intenzitou. Výsledná hodnota pro tento osvit činila 89,8 % původní hodnoty. Stejně zaznamenaná hodnota pro bílé světlo činila 83 % výchozí hodnoty. Pro hodnotu účinnosti během osvitu a následného ponechání ve tmě pro oba zdroje osvitu byla zaznamenána degradace vůči prvotní hodnotě měření.

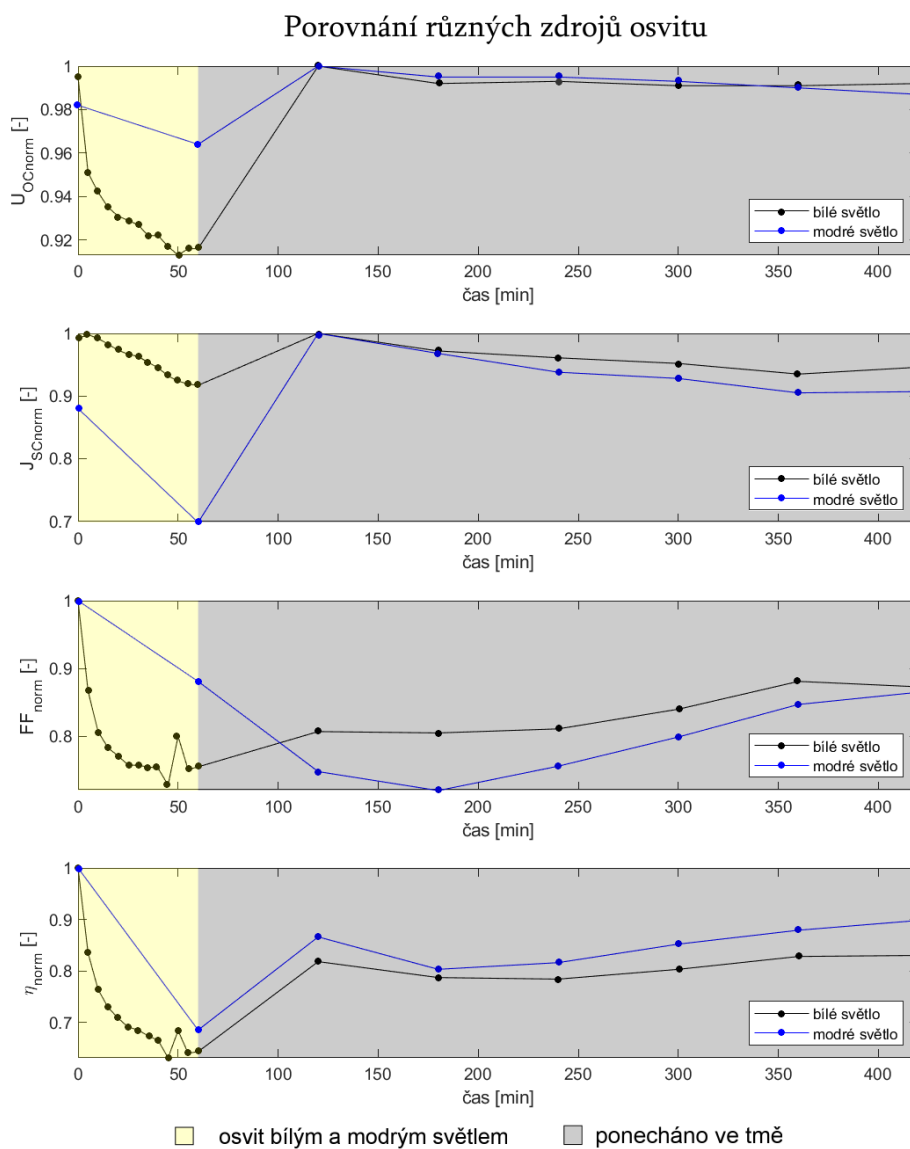
Měřením bylo prokázáno vykazování degradačních i reverzibilních vlastností vzorku na bázi perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  připraveného pomocí dvoukrokové depozice. Provedené měření potvrdilo, že zdroj záření má vliv na procesy, které během osvitu vzorku a jeho následném uchování ve tmě, v solár-

ním článku vznikají. U všech charakteristických parametrů byla zaznamenána výsledná degradace vůči výchozí hodnotě. Tyto hodnoty již byly ovlivněny regeneračním faktorem, který byl sledován a který byl pro bílé a modré světlo různý. Intenzita reverzibilních jevů sledovaných u napětí naprázdno  $U_{OC}$  měla pro srovnávané zdroje osvitů téměř totožnou úroveň. Pro hodnotu proudové hustoty  $J_{SC}$  byla zaznamenána inderference, v mezích desetin procent. Pro oba tyto měřené parametry byla během 1 hodiny uchování ve tmě zaznamenána vysoká míra regenerace, kdy byly naměřeny hodnoty vyšší, než hodnoty výchozí. Pro hodnotu činitele plnění  $FF$  při osvitě modrým světlem nebyly sledovány reverzibilní jevy po prvním měření po uchování ve tmě, jako tomu bylo u všech ostatních parametrů. Regenerační schopnosti začaly být vykazovány až po 2 hodině tohoto měřeného procesu. U hodnoty účinnosti  $\eta$  byly po celou dobu uchování ve tmě zaznamenány silnější reverzibilní vlastnosti při osvitě modrým světlem. To mohlo být ovlivněno slabší degradací, kterou tento osvit, v porovnání se světlem bílým, způsobil.

Měření potvrdilo vykazování degradačních procesů a rozdíl intenzity degradace při užití zdrojů osvitů různé vlnové délky dle [Nie]. Proces degradace byl dle [Nie] vystřídán procesem regeneračním (*self-healing*). I u tohoto procesu byla zaznamenána závislost na použité vlnové délce zdroje osvitů. Provedené měření potvrdilo možný vznik stavů meta-stabilních pastí, díky kterým byly uvedené procesy pozorovány.

Během osvitů zdrojem bílého světla byly některé hodnoty označeny jako chyba měření. Není vyloučeno, že tyto hodnoty byly důkazem silnější akumulace stavů meta-stabilních pastí vznikajících v důsledku ozařování. Pravděpodobně se tyto meta-stabilní pasti pohybují ve struktuře vzorku, proto mohlo dojít k ovlivnění hodnot, pouze u uvedených měření, která se tak jeví jako nerelevantní. Tento efekt nebyl pro měření modrým světlem pozorován. To je přisouzeno příliš hrubému časovému kroku, který byl pro tento proces měření stanoven.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST



Obrázek 3.23: Sledování degradačních a reversibilních jevů v důsledku různých zdrojů osvitu. Porovnání bílého světla solárního simulátoru o intenzitě záření 1 slunce a modré LED diody.

**Porovnání různých metod depozice perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$** 

Pro měření byl použit solární článek B vzorku P0046 připraveného pomocí dvou-krokové depozice a solární článek B vzorku P0044 připraveného pomocí jedno-krokové depozice. Pro srovnání různých metod depozic perovskitové struktury  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  byly provedeny dva 7 hodinové procesy měření. Během měření byly oba dva vzorky osvětlovány modrým světlem. Metodika měření byla pro obě srovnávané metody totožná. Vzorky byly hodinu nepřetržitě osvětlovány s následným zaznamenáním degradačního procesu. Dalších 6 hodin byly vzorky uchovávány ve tmě, kdy bylo prováděno měření s krokem 1 hodiny. Naměřené hodnoty jednotlivých parametrů jsou na Obrázku 3.24.

U všech měřených parametrů byly zaznamenány rozdíly mezi procesy sledovanými na vzorcích připravených pomocí různých způsobů depozice. Během měření provedeném za nepřetržitého osvětlení modrým světlem byly pozorovány degradační procesy. Měření provedené za tmy prokázalo vykazování reverzibilních vlastností u sledovaných článků.

Pro hodnoty napětí na prázdko  $U_{OC}$  byl zaznamenán silnější vliv degradace u vzorku připraveného pomocí dvou-krokové depozice. Během uchování ve tmě byly u hodnot napětí u obou vzorků pozorovány silné regenerační vlastnosti. Během tohoto procesu byly naměřeny hodnoty vyšší, než byly hodnoty původní. Pro dvou-krokovou metodu byla zaznamenána nejvyšší dosažená hodnota po 1 hodině měření při uchování ve tmě. U jedno-krokové metody byly sledovány postupné regenerační vlastnosti, vedoucí k prokazatelnému zlepšení celkových vlastností tohoto vzorku, zaznamenaných ke konci procesu měření při uchování ve tmě. Hodnota napětí naprázdno tohoto vzorku po degeneračním a reverzibilním procesu vzrostla o 0,9 % vůči výchozí hodnotě.

U hodnot proudové hustoty  $J_{SC}$  byl zaznamenán při 1 hodině konstantního osvětlení modrým světlem rozdíl mezi srovnávanými metodami. Vzorek připravený pomocí dvou-krokové depozice degradoval a dosáhl minima zaznamenaného na konci tohoto procesu měření. U vzorku připraveného pomocí jedno-krokové depozice byly pozorovány regenerační vlastnosti. Po 1 hodině konstantního osvětlení byla naměřena maximální hodnota tohoto vzorku. Stejný vzorek při ponechání ve tmě po dobu 6 hodin nevykazoval žádné regenerační schopnosti. Byl zaznamenán slabší vliv degradace a ustálení hodnot na 97,1 % nejvyšší naměřené hodnoty. Dvou-krokově deponovaný vzorek regenerační vlastnosti vykazoval. Reverzibilní jevy vedly k naměření maxima po 1 hodině uchování ve tmě, a následném poklesu a ustálení hodnot.

Při srovnání získaných hodnot činitele plnění  $FF$  během hodiny nepřetržitého osvětlení byl pozorován větší degradační vliv u vzorku připraveného pomocí metody jedno-krokové depozice. Tento vzorek při uchování ve tmě vykazoval silnější regenerační jevy, které byly zaznamenávány po celou dobu 6 hodinového měření. Hodnota činitele plnění  $FF$  vzorku dvou-krokové depozice degradovala i při měření provedeném za uchování ve tmě, následoval proces regenerace, kdy došlo k ustálení hodnoty na 86,5 % výchozí hodnoty.

Při sledování hodnot účinnosti  $\eta$  připravených vzorků během hodiny nepřetr-

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

---

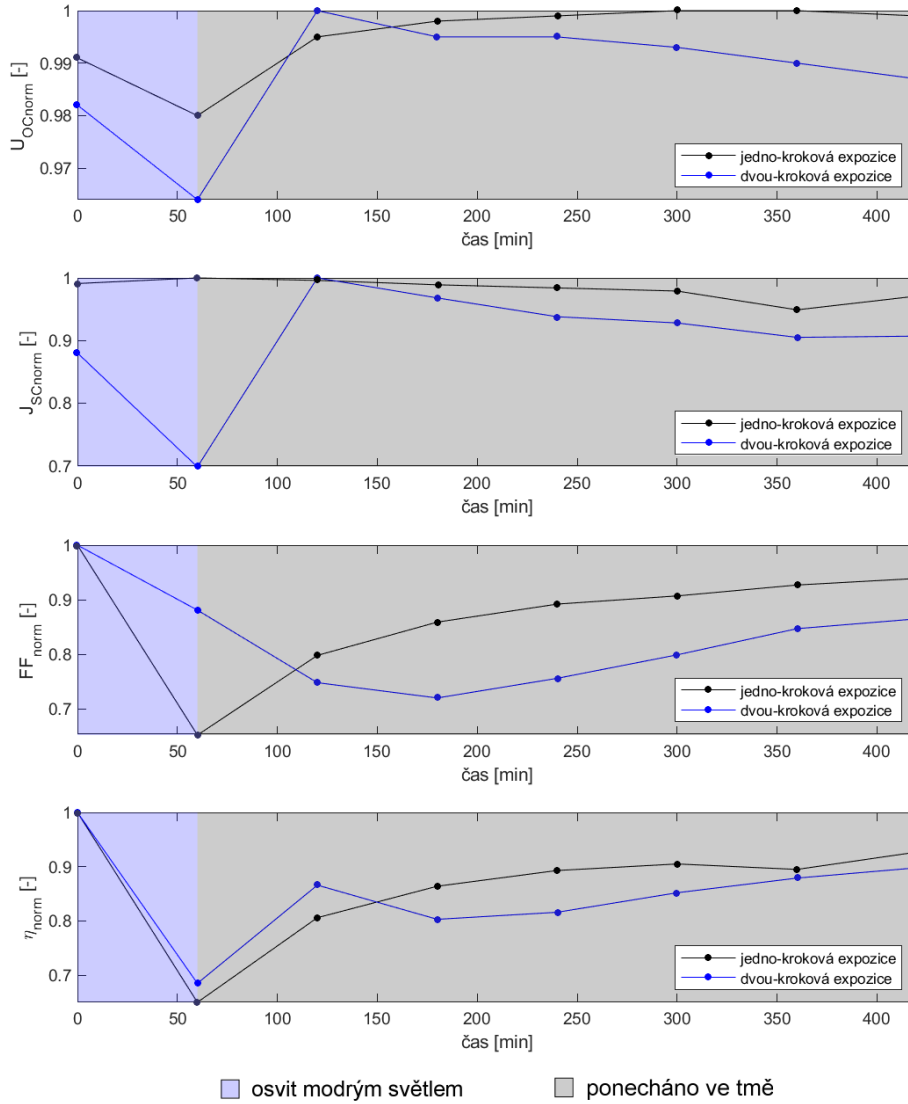
tržitého osvitu byl pozorován téměř identický degradační vliv srovnávaných metod. Na uchování ve tmě reagovaly vzorky odlišně. Vzorek jedno-krokové depozice vykazoval regenerační vlastnosti se silnou rostoucí tendencí a na konci měření dosáhl 92,7 % původní, maximální hodnoty. Vzorek připravený pomocí dvou-krokové depozice vykazoval během 1 hodiny měření regenerační vliv s patrnými výkyvy.

Měřením byly prokázány degradační a reverzibilní jevy vznikající ve vzorcích na bázi perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  připravených pomocí různých způsobů depozice za použití totožného zdroje záření. Po hodině nepřetržitého osvitu modrým světlem byly u napětí naprázdno, činitele plnění a účinnosti zaznamenány degradační procesy. U hodnoty proudové hustoty vzorku jedno-krokové depozice byl zaznamenán po této době nárůst na maximální naměřenou hodnotu. Při uchování vzorků ve tmě byly u obou vzorků a všech sledovaných parametrů pozorovány reverzibilní jevy. Pro napětí naprázdno byly tyto regenerační schopnosti vzorku jedno-krokové depozice tak silné, že došlo k ustálení hodnoty po osvitu a uchování ve tmě na vyšší hodnotě, než byla hodnota výchozí. U ostatních měřených parametrů byl sledován vliv degradace, vůči počáteční hodnotě.

Provedené měření potvrdilo, že způsob přípravy perovskitových solárních článků ovlivňuje jejich stabilitu. [Mutalikdesai] Způsob depozice ovlivnil jak proces degradace připravených článků, tak i jejich regenerační schopnosti (*self-healing*). Ty jsou stejně jako v případě srovnání různých zdrojů záření připisovány vzniku stavů metastabilních pastí. I přes to, že byl deponován stejný perovskit, tak způsob, kterým tak bylo učiněno ovlivňuje vlastnosti těchto pastí. Pravděpodobně způsob depozice má vliv na množství a možné slučování těchto pastí do makroskopicky nabitých oblastí. Proto byly sledovány zaznamenané rozdílné vlastnosti.



Porovnání různých metod deposice perovskitové struktury  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$



Obrázek 3.24: Sledování degradačních a reversibilních jevů v důsledku osvětlení. Porovnání vzorků připravených pomocí jedno-krokové a dvou-krokové metody deposice při osvětlení modrou LED diodou.



## Kapitola 4

# Ekonomická část

Ekonomické zhodnocení bylo založeno na srovnání výhodnosti investice do konvenčních (křemíkových) nebo tandemových fotovoltaických technologií, kde byl analyzován vliv přidání vrstvy  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  do tandemu k solárnímu článku konvenčně nabízených FV modulů. Vypracované zhodnocení bylo rozděleno do dvou odlišných částí. První část byla věnována grafické interpretaci porovnávající tyto technologie v době zavedení tandemových technologií na trh a v budoucích letech. V druhé části byla provedena případová studie modelového uživatele srovnávající technologie dle ceny vyrobené energie pomocí metody dlouhodobých měrných nákladů LCOE pro identická zmíněná období. Zhodnocení bylo doplněno o část popisující východiska, kterých bylo během zpracování využito.

### 4.1 Východiska ekonomického zhodnocení

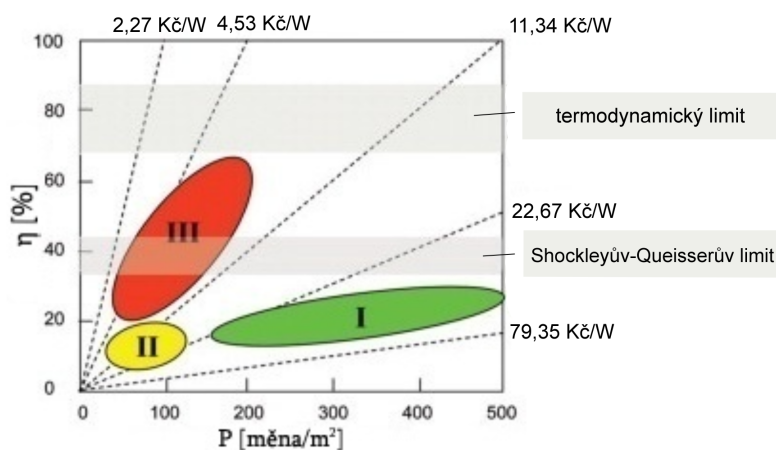
K ekonomickému zhodnocení konvenčních (křemíkových) a tandemových fotovoltaických technologií bylo využito komerčně nabízených FV modulů. V této kapitole byly uvedeny vlastnosti využitých technologií, definovány vzorce a ekonomické ukazatele, kterých bylo během provedení zhodnocení použito a popsány charakteristické parametry užitých FV modulů získaných z katalogových (technických) listů.

### 4.1.1 Teoretické podklady

Pro srovnávané fotovoltaické technologie byly uvedeny vlastnosti, které je specifikují. Dále byla definována metoda dlouhodobých měrných nákladů LCOE.

#### Generace fotovoltaických technologií

Fotovoltaické technologie jsou děleny do tří skupin – fotovoltaických technologií první, druhé a třetí generace. [TzB] Sledovaným faktorem je vliv účinnosti fotovoltaické přeměny na cenu těchto technologií, která je ovlivňována Shockleyovým-Queisserovým a termodynamickým limitem. [Green]



Obrázek 4.1: Závislost účinnosti a ceny (nákladů) pro fotovoltaické technologie první, druhé a třetí generace. Křivky nejnižší elektrické energie. Převzato z [Green] a upraveno.

**Shockleyův-Queisserův limit (S-Q limit)** – maximální teoretická účinnost přeměny dopadajícího slunečního záření na elektrickou energii FV článků s jedním PN přechodem je určena Shockleyovým-Queisserovým limitem. Tento limit je závislý na šířce zakázaného pásu  $E_g$  polovodiče a spektru dopadajícího záření. [Shockley] K absorpci dopadajícího záření a její přeměně na elektrickou energii dochází pouze u fotonů, jejichž energie odpovídá šířce zakázaného pásu. Zbytek této energie je přeměněn na teplo. [Liptak]

**Termodynamický limit** – absolutní maximální teoreticky možná účinnost přeměny dopadajícího slunečního záření na elektrickou energii. [Belghachi] Teoretické hodnoty tohoto limitu leží v rozmezí 67–87 % účinnosti FV přeměny. [Green]

**Fotovoltaické technologie první generace** – solární články z křemíku, které v současné době jsou řazeny mezi články nejúčinnější a celosvětově nejrozšířenější. [Solarfacts] Teoretické maximum přeměny slunečního záření této generace je dáno Shockleyovým-Queisserovým limitem. [Branker] Experimentálně tyto články dosahují přibližně 75 % teoretického maxima, konvenčně vyráběné články pak dosahují na 50–65 % stanoveného limitu. [TZB] Do této skupiny jsou řazeny články vyrobené na bázi krystalického křemíku (polykrystalické, monokrystalické, tenkovrstvé krystalické a hybridní). [Solarfacts, Efficiency]

**Fotovoltaické technologie druhé generace** – generace tvořena články též označovanými jako články tenkovrstvé. K jejich výrobě je využito až stokrát menšího množství křemíku oproti I generaci. To vede ke snížení ceny vyrobeného článku, která je však ovlivňována drahými vakuovými technologiemi nanášení. [TZB, Solarfacts] Tyto technologie mají stejný limit dosažitelné účinnosti, komerčně dosažitelné hodnoty se však pohybují jen okolo 6 %. Mezi tenkovrstvé články jsou zařazovány typy CdTe (cadmium-telur), CIS (měď-indium-selen), CIGS (měď-indium-galium-selen) a amorfni křemík. [TZB]

**Fotovoltaické technologie třetí generace** – články, které překračují Shockleyův-Queisserův limit a jejichž mezní hodnotou by měl být pouze limit termodynamický s faktory vázanými k využití struktury. [TZB, Branker, Green] Mezi hlavní skupiny této generace jsou řazeny vícevrstvé články, které jsou teoreticky schopné dosáhnout až 42 % (dvouvrstvé), 49 % (třívrstvé) a 65 % (šestivrstvé) teoretického maxima účinnosti a články koncentrátorové, u kterých se hodnoty teoretického maxima účinnosti pohybují okolo 41 % (jednovrstvé), 55 % (dvouvrstvé), 63 % (třívrstvé). [TZB]

### Dlouhodobé měrné náklady LCOE

Jinak zvané dlouhodobé měrné náklady LCOE (*Levelized Cost Of Energy*) jsou využívány k porovnávání různých metod výroby elektřiny pro určování jejich ekonomické efektivity v energetice. Porovnání je provedeno vyjádřením jednotkové výrobní ceny energie (měnová jednotka/1 kWh nebo MWh vyrobené energie). [**Electricitycosts**] Jedná se o cenu jednotky vyrobené energie, která rozhoduje o úhradě všech vynaložených investic, za celou dobu životnosti systému nebo o výhodnosti porovnávaných systémů. [**Donev**]

Výpočet LCOE je definován jako podíl ekonomických ukazatelů čisté současné hodnoty celkových kapitálových a operačních nákladů  $NPV_{CK}$  a čisté současné hodnoty očekávané produkce elektrické energie  $NPV_E$ . [**Electricitycosts**]

$$LCOE = \frac{NPV_{CK}}{NPV_E}. \quad (4.1)$$

Pro jednotlivé ukazatele platí:

$$NPV_{CK} = \sum_0^n \frac{(\text{celkové kapitálové a operační náklady})_n}{(1+r)^n}, \quad (4.2)$$

$$NPV_E = \sum_0^n \frac{(\text{očekávaná produkce elektrické energie})_n}{(1+r)^n}, \quad (4.3)$$

kde  $r$  je diskontní sazba a  $n$  je životnost systému. [**Electricitycosts**]

Tento vztah nabývá pro fotovoltaické systémy tvaru:

$$LCOE = \frac{\sum_0^n \frac{(I_n + O_n + F_n + M_n)}{(1+r)^n}}{\sum_0^n \frac{E_n \cdot (1-d)^n}{(1+r)^n}} [\text{měna/Wh}], \quad (4.4)$$

kde  $I_n$  jsou investiční náklady v roce  $n$ ,  $O_n$  jsou ostatní variabilní náklady v roce  $n$ ,  $F_n$  jsou fixní náklady v roce  $n$ ,  $M_n$  jsou náklady na provoz a údržbu systému v roce  $n$ ,  $E_n$  je množství vyrobené elektrické energie v roce  $n$ ,  $(1-d)$  je degrační faktor,  $r$  je diskontní sazba a  $n$  je životnost systému. [**Donev**]

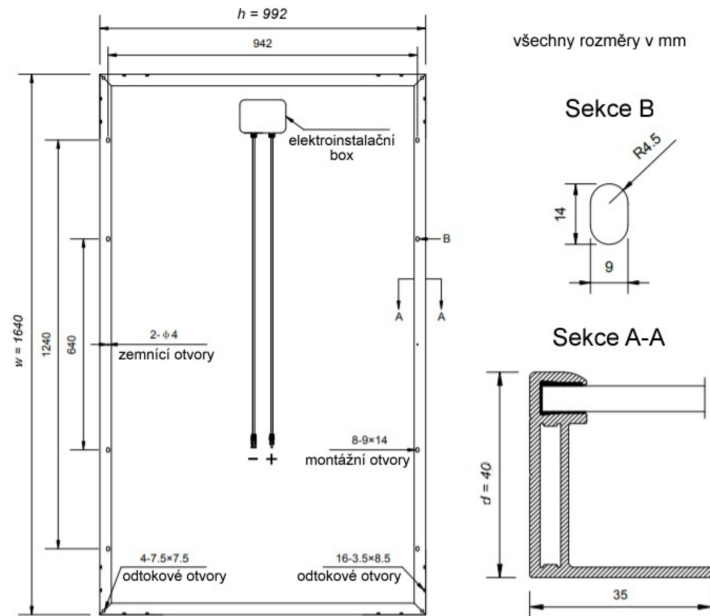
#### 4.1.2 Katalogové podklady

Parametry FV modulů, získaných z katalogových listů, jsou přímo i nepřímo ovlivňovány mnoha, dále uvedenými, faktory.

##### Rozměry FV modulu

Rozměrové vlastnosti konkrétního typu FV modulu jsou uváděny v katalogových listech. [**Katalogovylist**] Nejčastěji je udávána výška  $h$ , šířka  $w$  a tloušťka  $d$  ve formátu:

$$h \times w \times d \text{ [mm}^2\text{]}. \quad (4.5)$$



Obrázek 4.2: Schéma modulu s reálnými rozměry 1640 x 992 x 40 mm. Pře-  
vzato z [Katalogovýlist] a upraveno.

Zmíněné rozměry jsou využívány k výpočtu celkové plochy  $A$  FV modulu, kde pro výpočet platí:

$$A = h \cdot w \text{ [mm}^2\text{]}. \quad (4.6)$$

### Nominální výkon FV modulu

Nominální (jmenovitý) výkon je výkon, kterého je dosaženo při standardi-  
zovaných testovacích podmínkách (STC = *Standard Test Conditions*), mezi  
které je řazena referenční zkušební teplota článku  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , referenční slun-  
neční ozáření  $G_{\text{ref}} = 1000 \text{ W/m}^2$  a referenční sluneční spektrum *Air Mass*  
 $AM = 1,5$ . [Conditions, TZB] Jednotkou takto dosaženého výkonu je  $W_p$  (*watt-*  
*peak*). [Solarniexpert]

**Referenční zkušební teplota článku** – koresponduje s hodnotou tep-  
loty článku (popř. modulu), ne teplotou okolí. [Conditions]

**Referenční sluneční ozáření** – označuje množství slunečního záření dopadající na danou oblast v daném čase. [Conditions]

**Referenční sluneční spektrum *Air Mass*** – popisuje poměr množství slunečního záření, které musí projít zemskou atmosférou, než dopadne na zemský povrch. [Conditions]

Pokud hodnota nominálního výkonu FV modulu  $P_n$  není k dispozici, může být orientačně vypočten dle vztahu:

$$P_n = K_{pk} \cdot A \text{ [Wp]}, \quad (4.7)$$

kde  $K_{pk}$  je součinitel špičkového výkonu a  $A$  je celková plocha FV modulu.

Informativní hodnoty součinitele špičkového výkonu jsou uvedeny v Tabulce 4.1, kde je uvažováno minimálně 80% zaplnění apertury články. Protože je tato hodnota totožná s účinností  $\eta$  jednotlivých FV modulů [TZB], je možné vzorec zjednodušit na:

$$P_n = \eta \cdot A \text{ [Wp]}. \quad (4.8)$$

Druh FV modulu	$K_{pk}$ [kW/m <sup>2</sup> ], $\eta$ [%]
Polykrystalický křemík	0,10 až 0,16
Monokrystalický křemík	0,12 až 0,18

Tabulka 4.1: Informativní hodnoty součinitele špičkového výkonu, resp. účinnosti FV modulů. Převzato a upraveno z [TZB].

### Účinnost FV modulu

Velikost účinnosti je udávána vztahem:

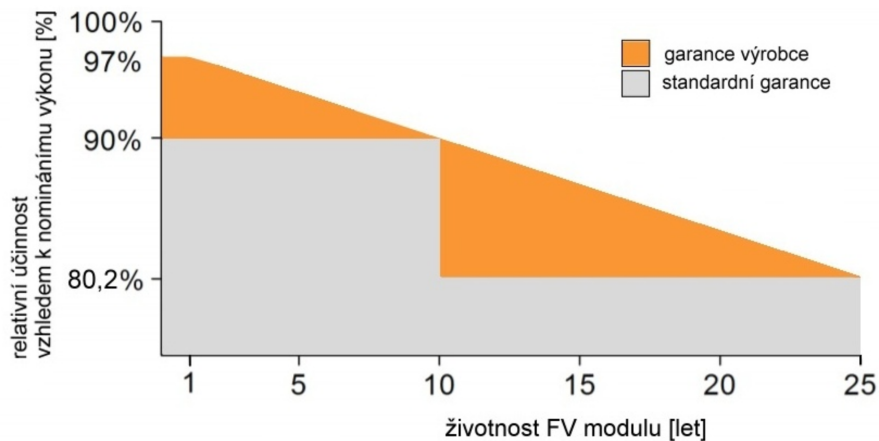
$$\eta = \frac{P_n}{A} \text{ [%]}, \quad (4.9)$$

kde  $P_n$  je nominální výkon FV modulu a  $A$  je celková plocha FV modulu. [Photovoltaicsoftware] Tato hodnota reprezentuje účinnost FV modulu, která v průběhu celé jeho životnosti klesá. [Katalogovýlist] To je způsobeno zejména degradací FV článků. [TZB]

**Životnost FV modulu** – doba, po kterou by měl být garancí (standardní nebo od výrobce) zaručen maximální procentní pokles degradace účinnosti dosažitelného nominálního výkonu FV modulů  $P_n$ , je označována jako životnost FV modulů. [Katalogovýlist] Doba životnosti  $n$  je nejčastěji uváděna v grafu zaručeného výkonu uvedeného na Obrázku 4.3 ,kde standardní garance zaručuje dosažení nejméně 90 % nominálního výkonu po 10 letech provozu a nejméně 80 % nominálního výkonu po 25 letech provozu. Výrobce naopak



připouští až 3% pokles nominálního výkonu v průběhu prvního roku užívání, následovaný 0,7% lineárním poklesem tohoto výkonu v následujících letech až k minimální účinnosti 80,2 % nominálního výkonu po 25 letech užívání.



Obrázek 4.3: Graf zaručeného výkonu. Inspirováno [Katalogovylis].

**Degradační závislost FV modulů** – degradace, postupné zhoršování vlastností systému, které může ovlivnit jeho schopnost pracovat v mezích přijatelnosti, je způsobena provozními podmínkami jako je opakovaná změna teploty, vlhkost, mechanické zatížení, UV ozáření nebo namrznutí. Tyto faktory mohou vést až k viditelným projevům degradace na modulech, mezi které patří koroze, zbarvení, delaminace nebo praskání jednotlivých buněk. [Ndiaye] Medián degradačních projevů křemíkových technologií se pohybuje okolo 0,5–0,6 % za rok s průměrem poklesu o 0,8–0,9 % ročně. [Jordan]

### Roční vyrobená energie FV modulu

Hodnota vyrobené energie, kterou vyrobí modul během jednoho roku je definována:

$$E = A \cdot \eta \cdot H \cdot PR \text{ [kWh]}, \quad (4.10)$$

kde  $A$  je celková plocha FV modulu,  $\eta$  účinnost FV modulu,  $H$  roční úhrn slunečního záření a  $PR$  poměr výkonů. [Photovoltaicsoftware]

**Roční úhrn slunečního záření** – množství sluneční energie, které dopadá na  $m^2$  činné plochy FV modulů. Celkový roční úhrn je ovlivňován zeměpisnou

#### 4. EKONOMICKÁ ČÁST

---

polohou, orientací fotovoltaického systému vzhledem ke slunci, nadmořskou výškou, celkovou dobou slunečního osvětlení, přímým a difúzním zářením a také čistotou ovzduší. [Isofen] Hodnoty tohoto množství energie lze získat například z mapy globálního slunečního záření. [Isofen, Vyskovyservis]

**Poměr výkonů** – tzv. poměr kvality nebo *Performance Ratio* je poměr skutečného energetického výnosu fotovoltaického systému vzhledem k výnosu teoreticky možnému, resp. poměr mezi skutečným a požadovaným energetickým výnosem fotovoltaického systému. Tento podíl je zapsán vzorcem tvaru:

$$PR = \frac{P_{sk}}{P_{teo}} [-], \quad (4.11)$$

kde  $P_{sk}$  reprezentuje skutečný (odečtený) energetický výnos fotovoltaického systému za rok v kWh a  $P_{teo}$  je vypočítaný (jmenovitý) energetický výnos fotovoltaického systému za rok v kWh.

Výslednou hodnotu PR ovlivňuje mnoho faktorů, mezi hlavní z nich patří teplota FV modulů, zastínění nebo znečištění FV modulů. [PR] Ukázkové hodnoty poměru výkonů jsou zaznamenány na Obrázku 4.4.

Performance Ratio PR	Popis
0,85	absolutní špičkové zařízení, dobře odvětrávané, bez zastínění, malé znečištění
0,8	velmi dobrá úroveň zařízení, dobré odvětrávání, bez zastínění
0,75	průměrná úroveň zařízení
0,7	průměrná úroveň zařízení, vinou zastínění nebo špatným odvětráváním
0,6	špatná úroveň zařízení, s většími ztrátami způsobenými zastíněním, znečištěním nebo výpadkem systému
0,5	velmi špatná úroveň zařízení s velkým zastíněním nebo poruchami

Obrázek 4.4: Ukázkové hodnoty Performance Ratio u FV modulů zapojených do sítě. [Quaschnig2010]

**Teoretická maximální roční vyrobená energie FV modulu** – pokud hodnota poměru výkonů PR je rovna 1, pak po dosazení do vztahu 4.10 je získáván vzorec pro výpočet teoretické maximální roční vyrobené energie modulu:

#### 4.1. Východiska ekonomického zhodnocení

---

$$E = A \cdot \eta \cdot H \text{ [kWh]}, \quad (4.12)$$

kde  $A$  je celková plocha FV modulu,  $\eta$  účinnost FV modulu a  $H$  roční úhrn slunečního záření. [**Photovoltaicsoftware**]

## 4.2 Ekonomické zhodnocení

Srovnání výhodnosti investice do konvenčních (křemíkových) nebo tandemových fotovoltaických technologií byla rozdělena do třech částí. V druhé části, grafickém porovnání výhodnosti srovnávaných technologií, bylo využito komerčně nabízených FV modulů bez omezení v rámci výkonnostních řad. Ve třetí části, případové studii modelového uživatele, bylo použito metody dlouhodobých měrných nákladů LCOE. Zhodnocení byla provedena pro stav zavedení tandemových technologií na trh a predikovanou situaci v průběhu let.

Veškeré provedené výpočty, použité předpoklady a predikce, zavedené ve zpracovaných částech zhodnocení, byly popsány v příslušných kapitolách. Obě zhodnocení vychází z komerčně nabízených FV modulů. K zhodnocení byly vybrány moduly křemíkové – polykrystalické i monokrystalické, kde k získání použitých hodnot bylo využito českých a zahraničních internetových obchodů. K převodu cen modulů ze zahraničních internetových obchodů na české koruny bylo využito současného kurzu (březen 2019) a to 25,62 Kč/euro a 22,67 Kč/USD. [**Kurzy**]

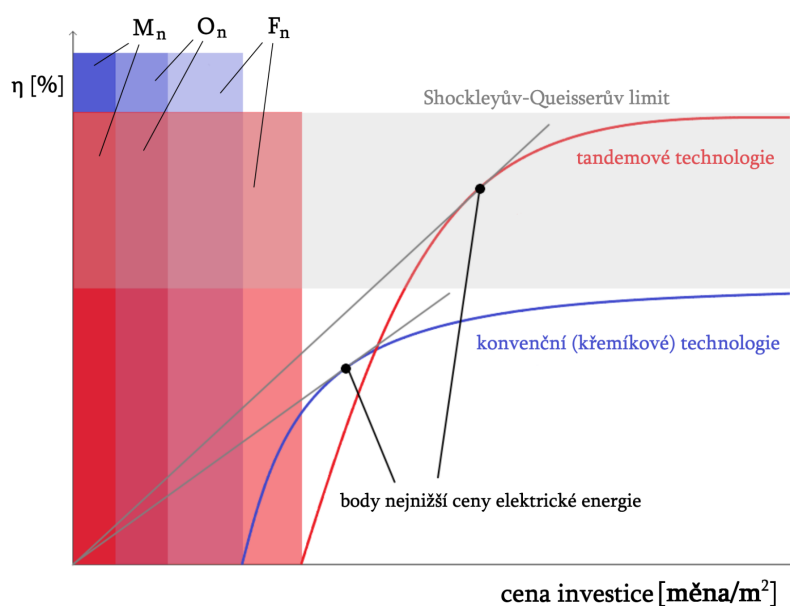
V uvedené části ekonomického zhodnocení byly použity tabulky prezentující dosažené výsledky. Plná interpretace, zachycující krokový postup výpočtů, je uvedena v Dodatku A.

### 4.2.1 Předpoklady ekonomického zhodnocení

Provedená ekonomická zhodnocení byla zaměřena na srovnání konvenčních (křemíkových) a tandemových fotovoltaických technologií, vycházejících z vlastností a předpokladů vázaným k technologiím první a třetí generace. Grafická interpretace, která tyto předpoklady shrnuje, je uvedena na Obrázku 4.5.

Předpoklady využití při zhodnocení byly stanoveny ze závislosti účinnosti a ceny investice  $m^2$  celkové plochy, která je uvedena na Obrázku 4.1 a dlouhodobých měrných nákladů LCOE definovaných vztahem 4.4. V grafické interpretaci jsou znázorněny křivky srovnávaných technologií, Schockleyův-Queisserův limit, křivka ceny elektrické energie, fixní náklady  $F_n$  v roce  $n$  a to pro křemíkové  $F_{n_{Si}}$  a tandemové  $F_{n_t}$  technologie, ostatní variabilní náklady  $O_n$  v roce  $n$  a náklady na provoz a údržbu systému  $M_n$  v roce  $n$ .

Výrobní proces tandemových technologií bude vzhledem k jejich struktuře v porovnání s technologiemi křemíkovými finančně náročnější. Proto se fixní náklady srovnávaných technologií liší. Větší fixní náklady tandemových technologií  $F_{n_T}$  byly stanoveny na základě struktury tandemových solárních článků [**Benesova**]. Vzhledem k technologiím křemíkovým  $F_{n_{Si}}$  je zde navíc cena přidané perovskitové vrstvy. Variabilní náklady  $O_n$  v letech  $n$  a náklady spojené s provozem a údržbou systému  $M_n$  v letech  $n$  byly pro obě technologie uvažovány identické. Ostatní variabilní náklady  $O_n$  v roce  $n$  a fixní náklady  $F_n$  v roce  $n$  lze jednotně označit jako náklady BOS. [**Ringbeck, Fraunhofer**]

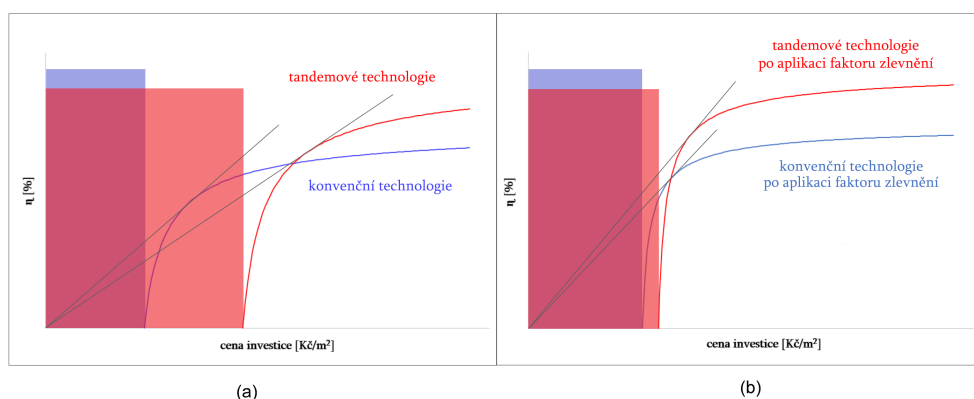


Obrázek 4.5: Závislost účinnosti a ceny fotovoltaických technologií první a třetí generace.

U křivek srovnávaných technologií bylo předpokládáno, že vyšších hodnot účinnosti bude dosaženo s narůstající cenou nabízených FV modulů [Fraunhofer], vzhledem ke zvyšující se technologické náročnosti výroby. Body nejnižší elektrické energie byly určeny křivkami, procházejícími počátkem a znázorňujícími nejvýhodnější poměr účinnosti a ceny. [Green] Teoretické hodnoty ceny elektrické energie (Kč/W), jsou uvedeny na Obrázku 4.1.

Maximum dosažitelné účinnosti křemíkových technologií je dáno Shockley-Queisserovým limitem. [Branker] V grafické interpretaci bylo uvažováno, že se křemíkové technologie budou blížit spodní hranici S-Q limitu, které však nikdy nedosáhnou. Teoretická maximální účinnost dvouvrstvých solárních článků je stanovena nad Shockley-Queisserovým limitem. [TZB] Proto křivka tandemových technologií byla směřována k této hranici, bez jejího možného dosažení.

#### 4. EKONOMICKÁ ČÁST



Obrázek 4.6: Závislost účinnosti a ceny fotovoltaických technologií první a třetí generace, (a) zanedbatelná výhodnost tandemových technologií, (b) výrazná výhodnost tandemových technologií.

Závislost uvedená na Obrázku 4.5 znázorňuje situaci, kde je investice do tandemových technologií výhodnější. Pokud tato situace nenastane se zavedením tandemových technologií na trh, očekává se zvýhodnění těchto technologií v průběhu let. [Green] Pro možné nastínění popsané situace byl zaveden tzv. faktor zlevnění, vycházející dle [Fraunhofer] z klesajícího trendu cen FV modulů, který byl pozorován v posledních několika letech. Možná situace je znázorněna na obrázku 4.6.

Situace na obrázku 4.6 (a) zobrazuje nevýhodnou investici do tandemových technologií. Výhodná je investice do technologií křemíkových. Situace z obrázku 4.6 (b) ilustruje patrně výhodnější investici do technologií tandemových než do technologií křemíkových. [Green] Zobrazená situace vychází z Obrázku 4.6 (a), kde byl využit na obě technologie stejný faktor zlevnění.

#### 4.2.2 Ekonomické zhodnocení FV modulů

Tato část ekonomického zhodnocení byla věnována grafické interpretaci srovnávaných fotovoltaických technologií. Ve zhodnocení byla popsána situace zavedení tandemových technologií na trh a situace po zlevnění nabízených technologií, která ilustrovala výhodnost tandemových technologií a znázornila přínos využití perovskitů u FV modulů.

Ke zhodnocení byly použity konvenční (křemíkové) FV moduly ze čtyř českých a tří zahraničních internetových obchodů, a to celého spektra nabízených výkonostních řad, tzn. v rozmezí 30–360 Wp. K výpočtům bylo využito 56 polykrystalických a 58 monokrystalických modulů.

### Použitá data konvenčních FV modulů

Z katalogových listů vybraných FV modulů byly zaznamenány hodnoty nominálního výkonu FV modulů  $P_{nSi}$ , účinnosti FV modulů  $\eta_n$ , výšky FV modulů  $h$ , šířky FV modulů  $w$  a ceny FV modulů  $M_{Si}$ . Dle vztahu 4.6 byla vypočtena velikost celkové plochy  $A$  FV modulů. Pro moduly, u kterých nebyla uvedena hodnota účinnosti bylo k jejímu výpočtu využito vztahu 4.9. Cena modulů byla vydělena příslušnou velikostí celkové plochy modulů pro získání ceny  $m^2$  celkové plochy FV modulu, vyjádřenou dle vzorce:

$$M_{m_{Si}} = \frac{M_{Si}}{A} \text{ [Kč/m}^2\text{]}, \quad (4.13)$$

kde  $M_{m_{Si}}$  je cena  $m^2$  celkové plochy FV modulu,  $M_{Si}$  je cena FV modulu,  $A$  je velikost celkové plochy FV modulu. K veškerým hodnotám byly vypočteny i jejich průměrné hodnoty.

### Stanovení použitých dat tandemových FV modulů

#### Stanovení účinnosti tandemových FV modulů

Maxima dosažitelných účinností generací fotovoltaických technologií jsou dána Shockley-Queisserovým limitem. [Branker] Pro krystalický křemík je hodnota tohoto maxima stanovena na 29 %. [Andreani] Komerčně vyráběné FV moduly pravděpodobně nedosáhnou této účinnosti. Nárůst jejich účinností bude pravděpodobně razantně zpomalen hranicí 25 % [Deign], proto bylo maximum účinnosti konvenčních (křemíkových) technologií stanoveno na 26 %. Pro dvouvrstvé tandemové technologie je předpokládána maximální hranice dosažitelné účinnosti 35 %. [Meillaud] Hodnota maxima účinnosti komerčně nabízených tandemových technologií byla stanovena dle maxima s ohledem na předpoklady této technologie [Green] dle rozsahu křemíkových technologií a stanovena na 33 %.

Z hodnot účinností FV křemíkových modulů byla vybrána nejvyšší dosažená hodnota. Ta odpovídá monokrystalickému modulu s účinností rovnou  $\eta_{v_{Si}} = 20,84$  %. V době zavedení tandemových technologií na trh, bude pravděpodobně většina konvenčně nabízených modulů této účinnosti dosahovat. Vybraná účinnost dosahuje 80 % stanoveného maxima účinnosti konvenčních křemíkových technologií. Stejným způsobem byla určena účinnost většiny nabízených tandemových modulů na  $\eta_{sT} = 26$  %.

Byl určen poměr  $p_\eta$  mezi stanovenou účinností tandemových modulů a vybranou nejvyšší dosaženou účinností křemíkových modulů  $p_\eta = 1,25$ . K výpočtu účinností tandemových modulů  $\eta_T$  bylo využito vztahu:

$$\eta_T = \eta_{Si} \cdot p_\eta \text{ [-]}, \quad (4.14)$$

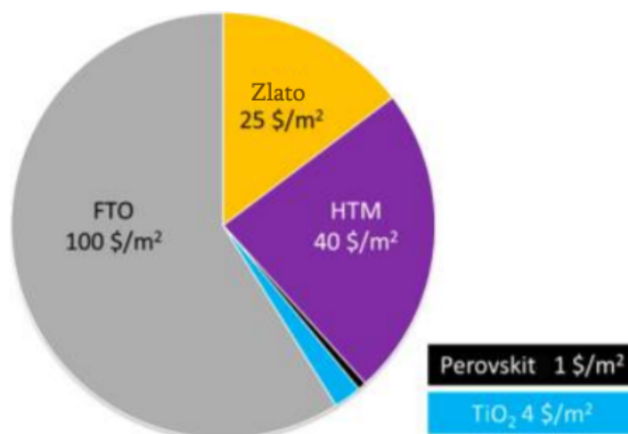
kde  $\eta_T$  je účinnost tandemových FV modulů,  $\eta_{Si}$  je účinnost konvenčních FV modulů a  $p_\eta$  je poměr mezi stanovenou účinností tandemových FV modulů  $\eta_{sT}$  a vybranou nejvyšší dosaženou účinností křemíkových FV modulů  $\eta_{vSi}$ .

### Stanovení ceny tandemových FV modulů

Při stanovení ceny  $m^2$  celkové plochy komerčně vyráběných tandemových FV modulů bylo využito ceny experimentální výroby perovskitových FV článků. Cena takto vyrobených článků byla dle Obrázku 4.19 stanovena ve výši 3765,48 Kč/ $m^2$ . [Binek] Uvedená cena je po odečtení ceny skla. [IHSMarkit] Sklo, sloužící jako substrát článku, nebylo do ceny započítáváno. Vzhledem ke struktuře článku je nahrazeno křemíkovou vrstvou. [Benesova] Dle struktury tandemových solárních článků [Eperon] byla tato cena přičtena k získané ceně  $m^2$  celkové plochy modulu a tím byla určena cena  $m^2$  celkové plochy FV tandemových modulů  $M_{m_T}$  dle vzorce:

$$M_{m_t} = M_{m_{Si}} + M_{ET} \text{ [Kč/m}^2\text{]}, \quad (4.15)$$

kde  $M_{m_T}$  je cena  $m^2$  celkové plochy tandemových FV modulů,  $M_{m_{Si}}$  je cena  $m^2$  celkové plochy křemíkových FV modulů a  $M_{ET}$  je cena  $m^2$  experimentálně vyráběných perovskitových solárních článků.



Obrázek 4.7: Graf znázorňující odhadované náklady jednotlivých vrstev experimentálně vyráběných perovskitových FV solárních článků. Zobrazené vrstvy: FTO (sklo s nanosenou FTO vrstvou), TiO<sub>2</sub>, perovskitová struktura, HTM (transportní vrstva), zlato. Převzato z [Binek] a upraveno.



### Použitá data tandemových FV modulů

K určení účinnosti tandemových FV modulů  $\eta_T$  byl využit vztah 4.14, který byl aplikován na získaná data účinnosti konvenčních FV modulů  $\eta_{Si}$ , k výpočtu ceny  $m^2$  celkové plochy FV tandemových modulů  $M_{m_T}$  bylo využito vztahu 4.19, ve kterém bylo použito příslušné ceny  $m^2$  celkových ploch těchto konvenčních FV modulů  $M_{m_{Si}}$ .

### Stanovení investičních nákladů

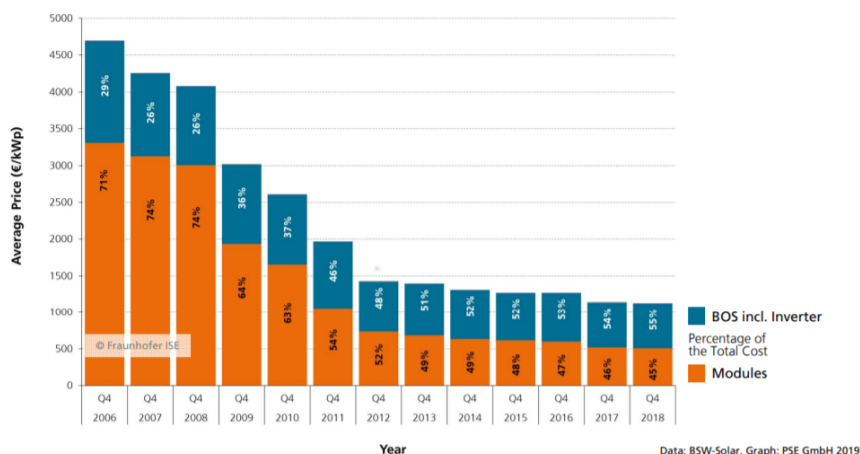
Jako investiční náklady srovnávaných fotovoltaických systémů  $I_{Si}$  a  $I_T$  byly uvažovány průměrné ceny  $m^2$  celkové plochy křemíkových  $M_{m_{Si}}$  a tandemových  $M_{m_T}$  FV modulů. Veškeré ostatní investice spojené např. s dopravou nebo montáží fotovoltaického systému byly již zahrnuty v nákladech BOS. Tyto náklady jsou vyobrazeny společně s náklady BOS v Tabulce 4.2.

### Stanovení nákladů BOS krystalických modulů

Náklady BOS (*Balance Of System*) jsou definovány jako veškeré investiční náklady kromě ceny FV modulů. Mezi mechanické náklady BOS jsou řazeny mechanické díly, konstrukce, montážní díly, včetně práce nutné pro jejich montáž. Elektrické náklady BOS jsou tvořeny elektrickými komponenty nutnými pro připojení k elektrické síti a kombinování FV modulů, jako jsou střídače, transformátory, potřebná kabeláž a práce za tuto montáž nebo instalaci. Jako ostatní náklady BOS jsou považovány všechny ostatní práce a náklady nepřímo spjaté s fotovoltaickým systémem. [Ringbeck]

Ke stanovení výše nákladů BOS byla využita jejich definice [Ringbeck] a Obrázek 4.8, kde je znázorněn procentní podíl investičních a BOS nákladů z průměrné ceny celkových nákladů spjatých s instalací fotovoltaického systému pro výkonnostní řady 10–100 kWp střešních fotovoltaických systémů instalovaných v Německu v průběhu posledních 13 let. [Fraunhofer] Rozdíl, mezi hodnotami nominálních výkonů uvedených výkonnostních řad [Fraunhofer] a hodnotami zhodnocení byl zanedbán. V posledních pěti letech se cena nákladů pohybuje v mezích 52–55 % celkové ceny instalace fotovoltaického systému. Výše nákladů BOS křemíkových technologií  $BOS_{Si}$  byla stanovena jako 55% podíl z celkové ceny instalace fotovoltaického systému. K určení byl využit 45% podíl ceny stanovených investičních nákladů  $I$ , tedy průměrné ceny  $m^2$  celkové plochy křemíkových  $M_{m_{Si}}$ . Náklady BOS tandemových technologií  $BOS_T$  byly určeny ve stejné výši. Dle [Fraunhofer] nebyly stanovené náklady na provoz a údržbu systému  $M_n$  v letech  $n$  k těmto nákladům započítávány. V Tabulce 4.2 jsou uvedeny stanovené náklady BOS srovnávaných variant.

### Average Price for PV Rooftop Systems in Germany (10kWp - 100kWp)



42

© Fraunhofer ISE

Obrázek 4.8: Graf procentního podílu investičních a BOS nákladů z průměrné ceny celkových nákladů spjatých s instalací fotovoltaického systému pro výkonostní řady 10–100 kWp střešních fotovoltaických systémů instalovaných v Německu v průběhu posledních 13 let. [Fraunhofer]

BOS NÁKLADY FV SYSTÉMU	
KONVENČNÍ	TANDEMOVÉ
BOS <sub>Si</sub> [Kč/m <sup>2</sup> ]	BOS <sub>T</sub> [Kč/m <sup>2</sup> ]
4459,42	

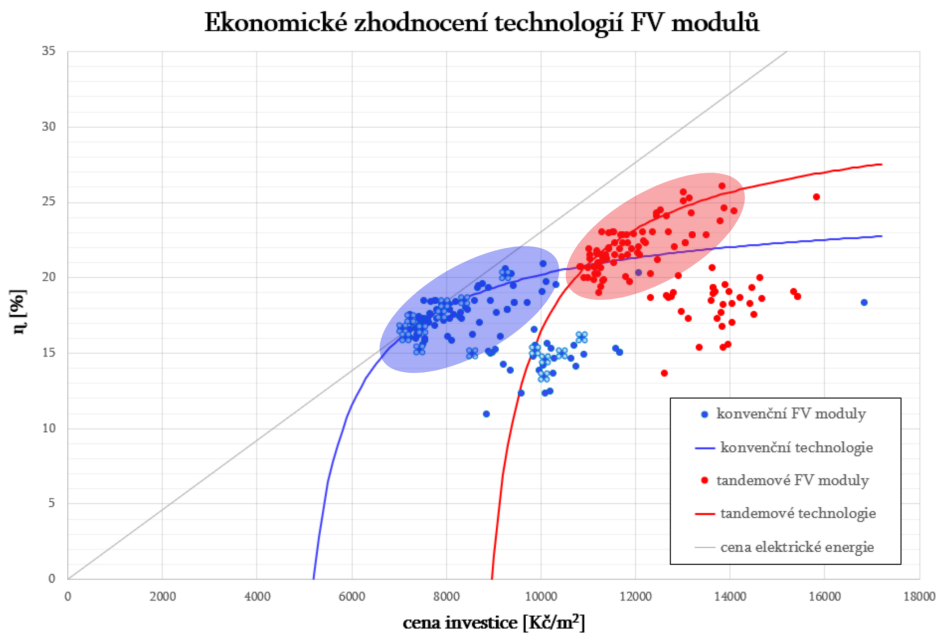
Tabulka 4.2: BOS náklady jednotlivých variant.

#### Stanovení nákladů na provoz a údržbu systému

Pro stanovení výše ročních nákladů na provoz a údržbu jednoho FV modulu na částku  $M = 733$  Kč bylo využito provedené případové studie, kde náklady tohoto typu byly určeny v kapitole 4.3. Jejich přesné stanovení je uvedeno v Tabulce 4.9.

### 4.2.2.1 Výsledky ekonomického zhodnocení FV modulů

Grafická interpretace byla získána využitím interpolace, vycházející ze stanovených hodnot počátků křivek, statistických hodnot a asymptot určených stanovenými dosažitelnými účinnosti jednotlivých technologií. Získaná situace je zobrazena na Obrázku 4.9.



Obrázek 4.9: Grafická interpretace zhodnocení srovnávaných fotovoltaických technologií.

Zhodnocení zobrazuje získané body komerčně nabízených konvenčních (křemíkových) a komerčně odhadovaných tandemových modulů, vyjádřených v závislosti účinnosti a ceně  $\text{m}^2$  celkové plochy těchto modulů. Tyto body byly pomyslně rozděleny na body vhodné pro provedené zhodnocení (vyznačené oblasti) a body, které byly uvažovány jako nerelevantní. Nerelevantní body, speciální produkty, se nenachází v okolí vynesných křivek vhodných bodů jednotlivých technologií. U těchto produktů se cení jiné vlastnosti než je získávaný výkon, proto se jejich cena může výrazně lišit. Jako počátek křivek byla zvolena hodnota stanovených nákladů BOS v případě konvenčních technologií a hodnota stanovených nákladů BOS s přičtenou cenou  $\text{m}^2$  celkové plochy experimentálně vyráběných perovskitových solárních článků. Křivky technologií

se asymptoticky blíží stanoveným maximům účinností srovnávaných technologií. Vynesená křivka ceny elektrické energie byla zkonstruována jako tečna, procházející počátkem. Na takto zvolené křivce leží body s nejvýhodnějším poměrem účinnosti a ceny.

Pro předpokládané účinnosti většiny komerčně nabízených FV modulů stanovených na  $\eta_{v_{Si}} = 20,84$  % pro křemíkové a  $\eta_{s_T} = 26$  % pro tandemové technologie byla určena konvenční (křemíková) technologie jako výhodnější.

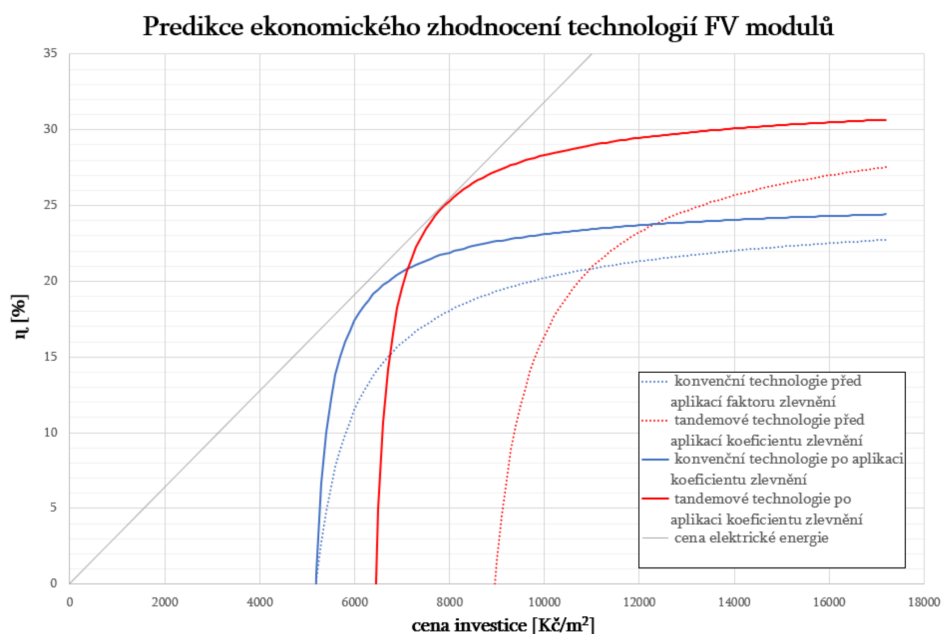
Skutečná situace se může od znázorněné situace lišit. Ve zhodnocení byly určeny maximální komerčně dosažitelné účinnosti, kterých nemusí být ve skutečnosti vůbec dosaženo, stejně tak mohou být tyto hranice snadno překonány. Pro stanovení nákladů BOS fotovoltaického systému byla využita průměrná cena konvenčních FV modulů. Při stanovení jiného výběru, by tato hodnota byla snadno změnitelná. Pro určení ceny  $m^2$  celkové plochy tandemových modulů bylo využito ceny  $m^2$  experimentálně vytvořeného perovskitového solárního článku. Hodnota experimentální přípravy byla uvažována jako možné nejdražší řešení. Zautomatizování výrobního procesu by mělo tuto hodnotu snížit a tandemové technologie by měly být výhodnější, než bylo v grafické interpretaci zobrazeno.

#### Predikce situace v dalších letech

V následujících několika letech se očekává, že tandemové technologie budou dle [Green] v porovnání s ostatními fotovoltaickými technologiemi výhodnější. Pro nastínění této situace bylo zpracováno řešení vycházející z dosažených výsledků a využití faktoru zlevnění. Situace je zobrazena na Obrázku 4.10.

Pro vyobrazenou grafickou interpretaci byl využit základní předpoklad, cena srovnávaných technologií bude nadále klesat, zatímco cena stanovených nákladů BOS fotovoltaického systému bude přibližně konstantní. [Fraunhofer] Tento trend je zřejmý z Obrázku 4.8 Proto byl na získané křivky srovnávaných technologií z Obrázku 4.9 použit tzv. faktor zlevnění. Ten způsobil posun křivek obou technologií za snížení ceny investic.

Pro případ, kdy byl zvolen faktor zlevnění 3, byla dle stejné metody jako v předešlém případě, zhodnocena jako výhodnější investice do tandemové technologie. Hodnota zvoleného faktoru zlevnění byla pro tandemové technologie uvažována jako dosažitelná. Pro konvenční (křemíkovou) technologii byl tento faktor uvažován jako nadsazený. Grafická interpretace křivky konvenčních technologií pro faktory nižší by se pohybovala v mezích křivek vynesených na Obrázku 4.9 a 4.10. Proto byla vynesena pouze křivka zachycující tuto extrémní možnou situaci, která i přes to, potvrdila výhodnost tandemových technologií a tedy zřejmý přínos využití perovskitové vrstvy u FV modulů.



Obrázek 4.10: Grafická interpretace predikce zhodnocení srovnávaných fotovoltaických technologií.

### 4.3 Případová studie

Ekonomické zhodnocení výhodnosti investice do konvenčních (křemíkových) a tandemových technologií bylo provedeno pomocí případové studie. Ta byla zaměřena na modelového uživatele, který se rozhoduje mezi investicí do FV modulů zmíněných technologií. Uživatel chce moduly pokrýt střechu svého rodinného domu (přibližně  $32 \text{ m}^2$ ) a očekává roční množství vyrobené energie okolo 5 MWh. Srovnání bylo provedeno pomocí metody dlouhodobých měrných nákladů LCOE, pro separované případy polykrystalických a monokrystalických křemíkových technologií. Byla zhodnocena situace předpokládající zavedení tandemových technologií na trh v roce 2020 a situace, která by nastala v průběhu několika let od tohoto zavedení.

V průběhu let u FV modulů pravděpodobně dojde k navýšení účinnosti. To je spjato s nárůstem ceny využívaných technologií, ovlivněné klesajícím trendem z minulých let. [Fraunhofer] Vzhledem k odhadu stanovenému na další rok, by se však jednalo o změny tak nepatrné, že byly zanedbány.

Byl zaveden předpoklad, že uživatel nebude dlouze pátrat, porovnávat nebo srovnávat ceny všech nabízených typů modulů. Proto bylo ke zhodnocení použito dat získaných ze tří českých a dvou zahraničních internetových obchodů s moduly. Z aktuální nabídky byly vybrány všechny nabízené po-

#### 4. EKONOMICKÁ ČÁST

---

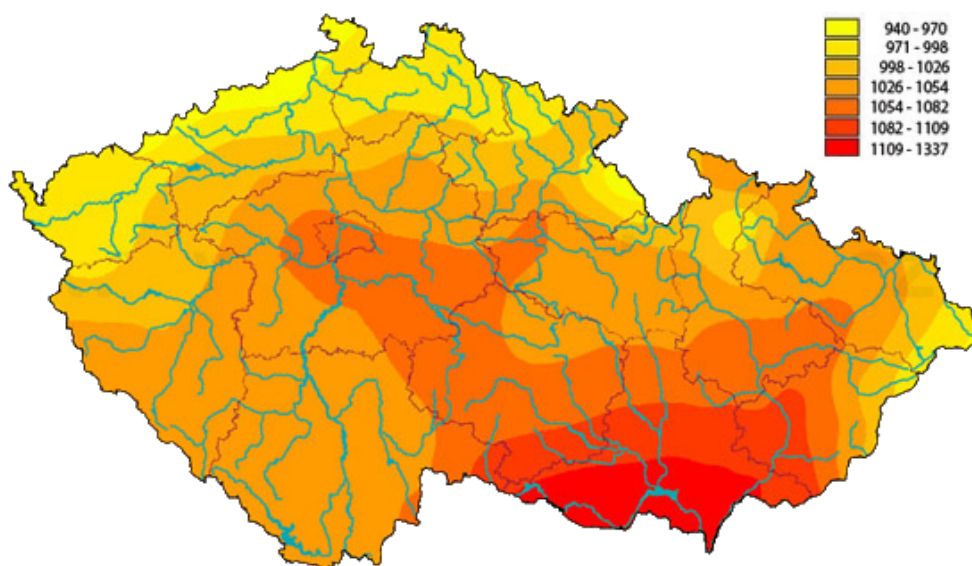
lykrystalické a monokrystalické křemíkové moduly v rozmezí výkonostních řad 270–300 Wp, které jsou při investici do 20 kusů modulů, optimální volbou pro žádaný výkon. [Solarniexperti] Ve zhodnocení bylo použito 22 polykrystalických a 22 monokrystalických křemíkových modulů.

#### Modelový případ uživatele

Dům uživatele byl situován do západní části hlavního města Prahy. Dle Obrázku 4.11 byl stanoven roční úhrn slunečního záření  $H$  v této lokalitě jako průměrná hodnota z uvedených mezí, tedy:

$$H = \frac{\text{dolní mez} + \text{horní mez}}{2} = \frac{1054 + 1082}{2} = 1068 \text{ W/m}^2, \quad (4.16)$$

Bylo předpokládáno, že v této hodnotě jsou již započítány všechny ovlivňující faktory, jako je nadmořská výška, celková doba slunečního osvětlení, přímé a difúzní záření nebo čistota ovzduší.



Obrázek 4.11: Roční úhrn globálního slunečního záření v ČR [W/m<sup>2</sup>]. Převzato z [Isofen].

Dle základního předpokladu pro naši polokouli byla orientace modulů zvolena směrem na jih, se sklonem 35°, který je dle [Globalsolar] nejvhodnější pro celoroční provoz.

PVGIS		Sklon					
orientace		0°	20°	35°	45°	60°	90°
Z	90°	88,8%	86,2%	82,9%	79,2%	71,7%	51,0%
ZJZ	67,5°	88,8%	91,4%	89,7%	87,1%	80,4%	56,7%
JZ	45°	88,8%	95,7%	94,8%	93,1%	87,1%	63,9%
JJZ	22,5°	88,8%	97,4%	98,3%	97,4%	91,4%	67,1%
J	0°	88,8%	97,4%	100,0%	98,3%	92,2%	67,9%
JJV	-22,5°	88,8%	97,4%	98,3%	97,4%	91,4%	66,9%
JV	-45°	88,8%	95,7%	94,8%	93,1%	87,1%	63,8%
VJV	-67,5°	88,8%	91,4%	89,7%	87,1%	80,3%	58,4%
V	-90°	88,8%	86,2%	82,9%	79,2%	71,7%	50,9%

Obrázek 4.12: Poměr dopadajícího záření pro různý sklon a orientaci modulů (Praha) – model PVGIS. Převzato z [Globalsolar].

### Použitá data konvenčních FV modulů

Z katalogových listů vybraných FV modulů byly stejně jako v předešlém případě zaznamenány hodnoty nominálního výkonu FV modulů  $P_{n_{Si}}$ , účinnosti FV modulů  $\eta_n$ , výšky FV modulů  $h$ , šířky FV modulů  $w$  a ceny FV modulů  $M_{Si}$ . Dle vztahu 4.6 byla vypočtena velikosti celkové plochy  $A$  jednotlivých FV modulů. Z takto získaných dat byly spočteny průměrné hodnoty FV modulů, které jsou zaznamenány v Tabulce 4.3.

KONVENČNÍ FV MODULY					
POLYKRÝSTALICKÉ					
$P_{n_{Si}}$ [Wp]	$\eta_{Si}$ [%]	$h$ [mm]	$w$ [mm]	$A$ [ $m^2$ ]	$M_{Si}$ [Kč]
277,05	16,94	1648,18	990,77	1,63	3864,89
MONOKRÝSTALICKÉ					
$P_{n_{Si}}$ [Wp]	$\eta_{Si}$ [%]	$h$ [mm]	$w$ [mm]	$A$ [ $m^2$ ]	$M_{Si}$ [Kč]
292,95	17,82	1650,73	994,68	1,64	5080,76

Tabulka 4.3: Průměrné hodnoty získané z konvenčně vyráběných polykrystalických a monokrystalických FV modulů.

### Výpočet ročních vyrobených energií konvenčních FV modulů

Dosazením získaných průměrných hodnot do vztahu 4.12 a vynásobením počtem kusů FV modulů  $p = 20$  ks, byla vypočtena teoretická maximální roční vyrobenou energii 20 FV polykrystalických modulů  $E_{m_{Si}}$ .

$$E_{m_{Si}} = A \cdot \eta_{Si} \cdot H \cdot p = 1,63 \cdot 0,1694 \cdot 1068 \cdot 20 = 5,908 \text{ MWh.} \quad (4.17)$$

#### 4. EKONOMICKÁ ČÁST

---

Pomocí vztahu 4.10 byla, se stejně zavedenými předpoklady, stanovena roční vyrobená energie 20 FV polykrystalických modulů  $E_{Si}$ . Dle [Quaschnig2010] byla předpokládána velmi dobrá úroveň zařízení, dobré odvětrávání a žádné zastínění, proto byla určena hodnota poměru výkonů  $PR = 0,8$ .

$$E_{Si} = A \cdot \eta_{Si} \cdot H \cdot PR \cdot p = 1,63 \cdot 0,1694 \cdot 1068 \cdot 0,8 \cdot 20 = 4,727 \text{ MWh.} \quad (4.18)$$

S využitím totožných vzorců a předpokladů byly dopočítány i hodnoty monokrystalické varianty. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 4.4.

KONVENČNÍ FV MODULY			
POLYKRystalické		MONOKRystalické	
$E_{m_{Si}}$ [MWh]	$E_{Si}$ [MWh]	$E_{m_{Si}}$ [MWh]	$E_{Si}$ [MWh]
5,908	4,727	6,252	5,001

Tabulka 4.4: Roční vyrobená energie 20 konvenčních FV modulů.

#### Stanovení použitých dat tandemových FV modulů

##### Stanovení účinnosti tandemových FV modulů

V současné době nejsou na trhu nabízeny komerčně vyráběné tandemové FV moduly. V posledních letech byl zaznamenán velký pokrok v dosažené účinnosti experimentálně vyráběných tandemových solárních článků. Ty jsou schopny dosahovat účinnosti až 28 %. V případě křemíkových článků je nejvyšší experimentálně dosažená účinnost 22,3 % (polykrystalické) a 27,6 % (monokrystalické). [Weaver] Konvenční solární články komerčně nabízených modulů dosahují přibližně 77 % (polykrystalické) a 68 % (monokrystalické) této účinnosti. V současné době je tedy trh schopen nabízet moduly, které dosahují přibližně 70–80% účinnosti získané za laboratorních podmínek. Je předpokládáno, že experimentálně vytvářené články budou schopny v roce 2020 dosahovat nejméně 30% účinnosti [Weaver] a nárůst dosahované účinnosti, zaznamenaný v posledních letech, toto očekávání podporuje. [Efficiency]

Ve zhodnocení bylo předpokládáno, že nově zavedená, komerčně vyráběná technologie bude úspěšnější a bude dosahovat 80 % účinnosti získané za laboratorních podmínek. Proto byla stanovena účinnost tandemových modulů při zavedení na trh v roce 2020 na  $\eta_{sT} = 24$  %.



### Stanovení ceny tandemových FV modulů

U stanovení ceny komerčně vyráběných tandemových FV modulů  $M_T$  byly využity předpoklady z kapitoly 4.2.2. Experimentální cena  $m^2$  perovskitových solárních článků byla vynásobena průměrnou celkovou plochou  $A$  konvenčních FV modulů, která byla přičtena k průměrné hodnotě ceny konvenčních FV modulů. Tento výpočet lze definovat vztahem:

$$M_T = M_{Si} + A \cdot M_T \text{ [Kč]}, \quad (4.19)$$

kde  $M_{Si}$  je vypočtená cena konvenčních FV modulů,  $A$  je velikost celkové plochy FV modulů a  $M_T$  je cena  $m^2$  experimentálně vyrobených perovskitových solárních článků.

### Použitá data tandemových FV modulů

Z uvedených dat konvenčních FV modulů byly zachovány pouze rozměry příslušící jednotlivým variantám, a z nich průměrné hodnoty celkové plochy  $A$  FV modulů. Pro výpočet nominálního výkonu  $P_{nT}$  byl využit vztah 4.8 s využitím stanovené účinnosti tandemových technologií  $\eta_{sT} = 24 \%$ , k výpočtu ceny  $M_T$  byl použit vztah 4.19, hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 4.5.

TANDEMOVÉ FV MODULY					
POLYKRYS TAL-PEROVSKIT			MONOKRYS TAL-PEROVSKIT		
$P_{nT}$ [Wp]	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$M_T$ [Kč]	$P_{nT}$ [Wp]	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$M_T$ [Kč]
391,92	1,63	10013,86	394,08	1,64	11263,75

Tabulka 4.5: Očekávané průměrné hodnoty tandemových FV modulů vycházejících z konvenčních polykrystalických a monokrystalických FV modulů.

### Výpočet ročních vyrobených energií konvenčních FV modulů

Bylo provedeno, stejně jako pro konvenční články, vypočítání teoretické maximální roční vyrobené energie 20 FV modulů  $E_{mT}$  a roční vyrobené energie 20 FV modulů  $E_T$ , s využitím vztahů 4.12 a 4.10, dosazením příslušných hodnot a vynásobením počtem kusů FV modulů  $p = 20$  ks. Získané hodnoty jsou reprezentovány Tabulkou 4.6.

TANDEMOVÉ FV MODULY			
POLYKRYS TAL-PEROVSKIT		MONOKRYS TAL-PEROVSKIT	
$E_{mT}$ [MWh]	$E_T$ [MWh]	$E_{mT}$ [MWh]	$E_T$ [MWh]
8,371	6,697	8,418	6,734

Tabulka 4.6: Roční vyrobené energie FV tandemových modulů.

**Stanovení investičních nákladů**

Jako investiční náklady srovnávaných fotovoltaických systémů  $I_{Si}$  a  $I_T$  byly uvažovány získané průměrné ceny FV modulů křemíkových  $M_{Si}$  a tandemových  $M_T$ , vynásobené počtem kusů FV modulů  $p = 20$  ks. Byly zanedbány veškeré ostatní investice, které byly uvažovány již zahrnuty v nákladech BOS. Hodnoty těchto nákladů jednotlivých variant jsou uvedeny v Tabulce 4.7.

INVESTIČNÍ NÁKLADY FV MODULŮ			
KONVENČNÍ FV MODULY		TANDEMOVÉ FV MODULY	
POLY	MONO	POLY	MONO
$I_{Si}$ [Kč]	$I_{Si}$ [Kč]	$I_T$ [Kč]	$I_T$ [Kč]
77297,73	101615,20	200277,19	225275,02

Tabulka 4.7: Investiční náklady jednotlivých variant.

**Stanovení nákladů BOS**

Ke stanovení nákladů BOS bylo využito kapitoly 4.2.2 a 4.2.1. Náklady byly určeny procentním podílem ze stanovených investičních nákladů fotovoltaického systému  $I$  polykrystalického křemíku, tedy z průměrné ceny varianty těchto FV modulů. [Fraunhofer] Vzhledem k zavedeným předpokladům byly náklady určeny pro veškeré srovnávané varianty totožné. Získané hodnoty těchto nákladů jsou uvedeny v Tabulce 4.8.

NÁKLADY BOS FV SYSTÉMU			
KONVENČNÍ FV MODULY		TANDEMOVÉ FV MODULY	
POLY	MONO	POLY	MONO
BOS $_{Si}$ [Kč]		BOS $_T$ [Kč]	
94475,01			

Tabulka 4.8: Náklady BOS jednotlivých variant.

### Stanovení nákladů na provoz a údržbu systému

Pro stanovení nákladů na provoz a údržbu systému  $M_n$  v jednotlivých letech  $n$ , byly zanedbány provozní náklady, s předpokladem, že jsou pokryty ve variabilních nákladech  $O_n$  v letech  $n$  zahrnutých v nákladech BOS. Jediné náklady, se kterými je v průběhu celé životnosti n FV modulů počítáno, jsou náklady spojené s údržbou modulů – čištěním. Není vhodné, aby se uživatel pokoušel jakýmkoli způsobem instalované moduly čistit sám (bezpečnost, poškození systému), proto byl stanoven předpoklad, že si najde profesionální firmu, která se o celý proces postará. Specializované firmy k fixně stanoveným cenám dopravy a základního provedení služby připočítávají variabilní cenu za  $m^2$  očištěné plochy. Pokud se uživatel rozhodne, že jeho hlavní prioritou je pokrytí celé střechy FV moduly (plocha  $31,6 m^2$ ), budou náklady spojené s údržbou stejné pro obě dvě varianty. V případě, že hlavním cílem uživatele je pokrytí požadovaného výkonu, bude mu stačit k jeho dosažení menší počet tandemových modulů, stanovený na 15 kusů. Náklady na údržbu menšího množství těchto modulů zabírají plochu  $23,7 m^2$ . Bylo očekáváno, že uživatel bude provádět čištění každý rok. Byly stanoveny jak náklady roční  $M_n$ , tak pro lepší přehlednost i náklady za celou životnost fotovoltaického systému  $M_{30}$ , kde k odhadu ceny bylo využito ceníku nabízených služeb Firmy Výškový servis. [Vyskovyservis] Jednotlivé položky těchto nákladů jsou uvedeny v Tabulce 4.9.

NÁKLADY NA ÚDRŽBU FV MODULŮ				
	KONVENČNÍ	TANDEM		MODUL
POČET [ks]	20	20	15	1
PLOCHA [ $m^2$ ]	31,6	31,6	23,7	1,64
DOPRAVA [Kč]	300	300	300	300
ZÁKLADNÍ CENA [Kč]	400	400	400	400
SAZBA (20 Kč/ $m^2$ ) [Kč]	632	632	474	31,6
$M_n$ [Kč]	1132	1132	1174	733
$M_{30}$ [Kč]	<b>39960</b>	<b>39960</b>	<b>35220</b>	<b>21948</b>

Tabulka 4.9: Předpokládané náklady na údržbu fotovoltaického systému.

Náklady spojené s údržbou fotovoltaického systému za celou dobu jeho životnosti při pokrytí celé plochy střechy domu dosáhly téměř k 40000 Kč. Pokud by se uživatel rozhodl dosáhnout instalovanými moduly jen požadovaného výkonu, byla by investice do tandemových FV modulů, za celou dobu životnosti, nižší přibližně o 5000 Kč. V porovnání s ostatním vynaloženými investicemi byla uvažována tato rozdílná částka za zanedbatelnou, a proto ve všech ostatních výpočtech byl uvažován stejný počet modulů pro obě srovnávané technologie.

### Výpočet LCOE FV modulů

Ke stanovení hodnoty dlouhodobých měrných nákladů LCOE bylo vycházeno ze vztahu 4.4. Pro výpočty byla diskontní sazba  $r$  uvažována za shodnou. Dle vzorce došlo k jejímu zkrácení, proto přesná hodnota nebyla zavedena. Dle kapitoly 4.2.1 bylo provedeno zjednodušení pro určení fixních nákladů v letech  $n$   $F_n$  a ostatních variabilních nákladů v roce  $n$   $O_n$  pomocí nákladů BOS.

Konečný vztah po těchto úpravách je tvaru:

$$LCOE = \frac{\sum_0^n \frac{(I+BOS+M_n)}{(1+r)^n}}{\sum_0^n \frac{E_n \cdot (1-d)^n}{(1+r)^n}}, \quad (4.20)$$

kde  $I$  jsou stanovené investiční náklady, BOS jsou stanovené náklady BOS,  $M_n$  jsou stanovené náklady na provoz a údržbu systému v roce  $n$ ,  $E_n$  je množství vyrobené elektrické energie v roce  $n$ ,  $(1-d)$  je degrační faktor,  $r$  je diskontní sazba a  $n$  je životnost systému.

Průměrná hodnota degradace byla dle [Jordan] zvolena na 0,8 % ročně. Vyšší průměrná hodnota degradace byla použita s přihlédnutím k zanedbání vyššího degeneračního faktoru v prvním roce užívání modulů. [Katalogovýlist] Hodnota byla zvolena identická pro obě varianty, i přes očekávání, že degrační faktor tandemových technologií bude nižší. Životnost všech porovnávaných modulů byla stanovena na 30 let.

V Tabulce 4.10 jsou uvedeny hodnoty vypočtených hodnot LCOE všech variant na konci životnosti fotovoltaického systému, tedy po 30 letech provozu modulů.

FV MODULY				
	KONVENČNÍ		TANDEMOVÉ	
DOBA	POLY	MONO	POLY-PEROVSKIT	MONO-PEROVSKIT
$n$ [let]	LCOE [Kč/MWh]			
30	1900,05	2001,91	2119,90	2265,69

Tabulka 4.10: Vypočítané hodnoty LCOE srovnávaných variant 20 FV modulů na konci životnosti fotovoltaického systému.

#### 4.3.0.1 Výsledky případové studie ekonomického zhodnocení FV modulů

Při porovnání vypočtených hodnot dlouhodobých měrných nákladů LCOE na konci životnosti fotovoltaických systémů byla investice do tandemových modulů v obou vypočtených variantách určena jako nevýhodná. V případě polykrystalických modulů byly stanoveny tandemové technologie jako nevýhodné o 10,37 %, u monokrystalických modulů pak o 11,64 %.

NEVÝHODNOST TANDEMŮVÝCH FV MODULŮ [%]	
POLYKRYSTAL	MONOKRYSTAL
10,37	11,64

Tabulka 4.11: Procentní vyjádření nevýhodnosti tandemových FV modulů srovnávaných variant.

Dle spočtených výsledků lze říci, že pro zvolenou účinnost tandemových FV modulů  $\eta_T = 24$  % a jejich odhadovanou cenu  $M_T$ , vycházející z ceny konvenčně vyráběných FV modulů  $M_{Si}$  I generace a ceny experimentálně vyráběných perovskitových FV článků  $M_{ET}$  se zanedbáním změny ceny  $M_{Si}$  a účinnosti  $\eta_{Si}$  křemíkových technologií, by bylo výhodnější do nové tandemové technologie neinvestovat a investovat do klasických konvenčních (křemíkových) technologií. Rozdíl mezi variantami křemíkových technologií byl považován za minimální, a proto byla stanovena průměrná nevýhodnost tandemové technologie na 11%.

Uživatel, který by se v příštím roce rozhodoval, do které fotovoltaické technologie komerčně nabízených modulů se vyplatí investovat, by měl zvolit variantu křemíkových technologií. A to v případě, že nedojde k výraznému odchýlení zhodnocených variant od předpokládaných hodnot. Skutečná situace trhu se může od popsané situace lišit. Faktory, které budou skutečnou situaci pravděpodobně nejvíce ovlivňovat bude tvořit rozdíl mezi stanovenou a reálnou cenou perovskitové vrstvy a hodnota dosažené účinnosti tandemových modulů. Nyní k určení ceny této vrstvy bylo využito ceny převzaté z jednoho zdroje. Cena této průmyslově vyráběné vrstvy je očekávána nižší. Stanovená účinnost byla určena dle současných očekávání, ve skutečnosti se však dosažené hodnoty mohou pohybovat na jiných hladinách. V případě, že by se uživatel rozhodl svojí vybranou investicí pokrýt přibližné očekávané roční množství vyrobené energie 5 kWh, stačilo by mu investovat do 15 tandemových modulů. Cena investice do FV modulů by byla nižší. Za předpokladu identických nákladů BOS a nákladů na provoz a údržbu systému stanovených pro 20 polykrystalických FV modulů, by se výsledné LCOE srovnávaných technologií zhoršilo. Proto tato varianta nebyla více rozebírána.

### Predikce situace v dalších letech

Nastínění vývoje trhu v dalších letech by mělo podpořit očekávání vázané k tandemovým technologiím a prokázat jejich výhodnost. Pro zhodnocení situace, která by nejvíce odpovídala vlastnostem reálného trhu, nebylo využito jednoho faktoru zlevnění. Takto zavedený faktor je totožný pro obě srovnávané technologie a predikuje chování trhu, které je nepravděpodobné. Proto ve srovnání bylo zavedeno přibližně 5% nárůstu účinnosti křemíkových technologií a 30% nárůstu účinnosti technologií tandemových s přibližně 5% poklesem stávající ceny křemíkových modulů a 30% poklesem ceny tandemových modulů.

Využitím takto zavedených předpokladů a jejich aplikací na stav z roku 2020, byly získány hodnoty, pro které byly dle zmíněných postupů spočítány hodnoty LCOE, které jsou spolu s výhodností tandemových technologií uvedeny v Tabulce 4.12 a 4.13.

FV MODULY				
	KONVENČNÍ		TANDEMOVÉ	
DOBA	POLY	MONO	POLY-PEROVSKIT	MONO-PEROVSKIT
$n$ [let]	LCOE [Kč/MWh]			
30	3705,24	3916,29	2496,55	2683,81

Tabulka 4.12: Vypočítané hodnoty LCOE srovnávaných variant 20 FV modulů na konci životnosti FV.

VÝHODNOST TANDEMŮVÝCH FV MODULŮ [%]	
POLYKRISTAL	MONOKRYSTAL
48,41	45,92

Tabulka 4.13: Procentní vyjádření výhodnosti tandemových FV modulů srovnávaných variant.

Popsaná situace by odpovídala průměrné 47% výhodnosti tandemových technologií. Uživatel, který by se v tomto případě rozhodoval, do které fotovoltaické technologie komerčně nabízených modulů se vyplatí investovat, by za předpokladu vývoje trhu, který by se význačně neodlišoval od předpokládaného, by měl investovat do tandemových technologií. Jakmile se stanou tandemové technologie průmyslově vyráběnými, bude jen otázkou času, kdy podobná situace nastane.

# Závěr

Bakalářská práce se věnovala tématu hybridního perovskitového materiálu jodidu methylnonammonio-olovnatého  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Zpracování bylo koncipováno do tří různých, doplňujících se oblastí – teoretické, experimentální a ekonomické.

V teoretické části byla vypracována rešerše teoretického základu, který byl využit při zpracování dalších částí. Rešerše byla věnována základním vlastnostem, strukturám a způsobům přípravy perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  a tandemovému solárnímu článku perovskit-krytalický křemík.

Experimentální část byla zaměřena na přípravu perovskitových solárních článků na bázi hybridního perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ , připravených pomocí jedno-krokové a dvou-krokové metody depozice. Na připravených vzorcích byly naměřeny voltampérové charakteristiky a pozorovány degradační a reverzibilní vlastnosti. Během měření byly porovnány dva typy záření různých vlnových délek – bílé a modré světlo a dvě metody depozice perovskitové vrstvy  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  - jedno-kroková a dvou-kroková.

Degradační procesy byly pozorovány na vzorku připraveném pomocí dvou-krokové depozice, který byl po dobu 1 hodiny ozařován solárním simulátorem s intenzitou záření 1 slunce. Všechny měřené parametry vykazovaly degradační vlastnosti. Nejsilnější degradační intenzita byla zaznamenána u hodnoty účinnosti, kde po 20 minutách osvitů klesla hodnota přibližně o 29 % vůči hodnotě počáteční. Měřením bylo prokázáno, že degradační účinek se s rostoucím parametrem času snižuje. Nejprokazatelněji byl tento jev patrný pro naměření činitele plnění  $FF$ . Po 20 minutách osvitů klesla hodnota  $FF$  přibližně o 22,8 % vzhledem k původní hodnotě, po dalších 20 minutách byl zaznamenán již pouze pokles o 1,8 %. Hlavní faktor, který způsobil pozorované degradační procesy, byl viditelný osvit.

Pro sledování reverzibilních vlastností byla provedena dvě měření. V prvním měření byl vzorek připravený pomocí dvou-krokové depozice nepřetržitě osvětlován sadou modrých LED diod po dobu 1 hodiny. Následně byly měřeny charakteristické parametry tohoto vzorku při jeho uchování v absolutní tmě po dobu 6 hodin s krokem měření 1 hodiny. Měřením bylo prokázáno, že použitý zdroj záření ovlivňuje degradační i reverzibilní vlastnosti perovskitových solárních článků na bázi  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . U všech měřených parametrů byl zaznamenán po 6 hodinách uchování ve tmě degradační pokles, vůči výchozí

hodnotě. V průběhu měření byly však sledované regenerační vlastnosti tak silné, že došlo i ke zlepšení parametrů nad tuto počáteční hodnotu. Jevy, pozorované v důsledku osvětlení jsou pravděpodobně způsobeny vznikem stavů meta-stabilních pastí. Použitá vlnová délka zřejmě ovlivňuje množství pastí, které vznikají a proto byly pro různé zdroje záření pozorovány odlišné procesy.

V druhém měření byly sledovány stejné procesy na vzorcích připravených pomocí jedno-krokové a dvou-krokové depozice perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . Vzorky byly nepřetržitě osvětlovány po dobu 1 hodiny sadou modrých LED diod a následně uchovány po dobu 6 hodin ve tmě, kdy byly zaznamenávány parametry s krokem 1 hodiny. Při tomto měření byl pro hodnotu napětí naprázdno vzorku jedno-krokové depozice zaznamenán regenerační proces, který po celém procesu měření dosahoval vyšší, než počáteční hodnoty. U zbylých parametrů obou vzorků byl pozorován degradační proces, ovlivnění sledovanými reverzibilními jevy vznikajícími v důsledku osvětlení. Měřením bylo potvrzeno, že způsob, jakým je perovskitová vrstva deponována má vliv na degradační a reverzibilní vlastnosti vznikající jako důsledek osvětlení. Zřejmě způsob depozice struktury ovlivňuje vznik stavů meta-stabilních pastí – možnost slučování do makroskopicky nabytých částí nebo celkový počet. Proto bylo možné zaznamenat odlišnosti ve sledovaných procesech.

Díky postupu přípravy perovskitového solárního článku na bázi hybridního perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  popsaném v této bakalářské práci, je možné reprodukovat připravovat vzorky s podobnými parametry, kterých bylo měřením dosaženo. Další, stejně koncipovaná měření, mohou vést k podrobnějšímu studiu chování degradačních a reverzibilních jevů stavů meta-stabilních pastí, které byly pravděpodobně důvodem vzniku pozorovaných diferencí u srovnávaných zdrojů záření a způsobů depozic.

Ekonomická část byla věnována zhodnocení vlivu přidání vrstvy perovskitu  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  do tandemu ke konvenčnímu článku. Zhodnocení bylo rozděleno do dvou částí srovnávajících výhodnost konvenčních a tandemových technologií. V první části byla vypracována grafická interpretace srovnání těchto technologií s vyhodnocením přínosů FV modulů. V druhé části byla zpracována případová studie modelového uživatele, kde byly jednotlivé technologie porovnány z hlediska ceny vyrobené energie pomocí metody dlouhodobých měrných nákladů LCOE.

První část zhodnocení vycházela z porovnání FV modulů srovnávaných technologií dle jejich dosažené účinnosti a ceny  $\text{m}^2$  celkové plochy modulu. Byly zavedeny předpokládané účinnosti konvenčně nabízených (křemíkových) modulů  $\eta_{v_{Si}} = 20,84 \%$  a účinnosti tandemových modulů  $\eta_T = 26 \%$ . a očekávané hodnoty maximálních účinností jednotlivých technologií. Pro určení ceny tandemových technologií byla využita cena  $\text{m}^2$  experimentálně vytvořeného perovskitového solárního článku. V neposlední řadě byly určeny velikosti jednotlivých složek nákladů. Pomocí interpolace byly vyneseny křivky odpovídajících technologií. Dle takto zavedených předpokladů nebyla investice do tandemových technologií v porovnání s technologiemi konvenčními (křemí-



---

kovými) výhodná. Následně byla vytvořena predikce do budoucích let, využívající u obou technologií faktor zlevnění o velikosti 3. Tím se tandemové technologie staly v porovnání s technologiemi křemíkovými značně výhodnější – dosahovaly vyšší účinnosti vztažené k m<sup>2</sup> celkové plochy těchto modulů.

Druhá část zhodnocení popsala situaci modelového uživatele, který se rozhoduje mezi investicí do křemíkových (monokrystalických a polykrystalických) a tandemových FV modulů. Ke srovnání bylo využito metody dlouhodobých měrných nákladů LCOE, se zavedením předpokladů vycházejících ze současné průměrné účinnosti křemíkových modulů a stanovené účinnosti tandemových modulů  $\eta_{sT} = 24\%$ . K určení ceny m<sup>2</sup> tandemových technologií byla využita stanovená cena experimentálně vyráběného perovskitového solárního článku. Byly určeny i hodnoty jednotlivých složek nákladů. Využitá metoda prokázala, že investice do tandemových technologií v případové studii stanovené na rok 2020, nebude výhodná. Proto byla rozebrána i situace s očekávaným vývojem trhu FV modulů, kde byl očekáván 30 % nárůst účinnosti tandemových technologií a 5 % nárůst účinnosti technologií křemíkových. Pro cenu tandemových modulů bylo předpokládáno snížení o 30 %, u konvenčních modulů byl tento pokles předpokládán pouze 5 %. Pokud by se trh vyvíjel dle očekávané predikce, stala by se investice do tandemových modulů značně výhodnější a o přínosech využití perovskitových struktur u FV modulů by se nedalo pochybovat.

Provedené ekonomické zhodnocení prokázalo, že využití perovskitových struktur na bázi perovskitu CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> u FV modulů má smysl, zejména pak jejich užití v tandemu ke konvenčně vyráběným článkům. Pokud nastane v budoucích letech situace, odpovídající zavedeným předpokladům, stanou se tandemové technologie mnohonásobně výhodnější, než technologie komerčně nabízené. Tento aspekt bude důležitý při dalším vývoji, který bude v budoucích letech perovskitovým strukturám věnován.



## Dodatek A

# Obsah přiloženého CD

K bakalářské práci bylo přiloženo CD obsahující tyto položky:

- `bakalarska_prace` .....obsahuje znění bakalářské práce a kopii zadání
- `experimentalni_cast` ..... obsahuje naměřené hodnoty  
přípravených perovskitových solárních článků zaznamenaných v programu  
Excel a skripty vytvořených grafů vytvořených v programu Matlab
- `ekonomicka_cast_1` ..... obsahuje hodnoty a grafy  
využité pro část ekonomického zhodnocení věnující se grafické interpretaci  
srovnávaných technologií zaznamenané v programu Excel
- `ekonomicka_cast_2`.....obsahuje hodnoty využití v případové  
studii ekonomického zhodnocení srovnávaných technologií vypracované v  
programu Excel