

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studium transparentních oxidů a jejich využití v perovskitových
článcích

Study of transparent oxides and their use in perovskite solar cells

Bc. Barbora Černá

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Eva Horynová

2024



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Černá** Jméno: **Barbora** Osobní číslo: **499808**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Studium transparentních oxidů a jejich využití v perovskitových článcích

Název bakalářské práce anglicky:

Study of transparent oxide and their use in perovskite solar cells

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši následujících témat: tenkovrstvé technologie, transparentní oxidy, perovskitové články, tandemové články
2. Připravte tenké vrstvy vodivých oxidů dostupnými technologiemi a na těchto vzorcích poté připravte perovskitový článek
3. Proměřte vlastnosti jak připravené oxidové vrstvy, tak celého článku
4. Proveďte ekonomické zhodnocení vhodnosti použití tandemových článků pomocí případové studie

Seznam doporučené literatury:

- [1] Seshan, K.: Handbook of thin-film deposition processes and techniques: principles, methods, equipment and applications, Norwich 2002
- [2] H.J. Snaith, Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells, J. Phys. Chem. Lett. 4 (2013)
- [3] Horynová, Eva, Oleksandr Romanyuk, Lukáš Horák, Zdeněk Remeš, Brianna Conrad, Amalraj Peter Amalathas, Lucie Landová, et al. "Optical Characterization of Low Temperature Amorphous MoOx, WOx, and VOx Prepared by Pulsed Laser Deposition." Thin Solid Films 693 (January 2020): 137690.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Eva Horynová katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Eva Horynová
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

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

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucí práce Ing. Evě Horynové za cenné rady a připomínky při tvorbě práce. Dále bych ráda poděkovala členům katedry elektrotechnologie za pomoc, a především trpělivost při experimentální části práce.

Největší dík patří mým rodičům za obrovskou podporu během celého studia. V neposlední řadě děkuji mým kolegům za rady v situacích, kdy mé znalosti nestačily, a především za nezapomenutelné zážitky z bakalářského studia.

Abstrakt

Tato bakalářská práce zkoumá nové technologie ve výrobě solárních článků, zejména využití perovskitových materiálů, které vykazují vysoký potenciál pro zvýšení účinnosti. Zvláštní pozornost je věnována tandemovým článkům kombinujícím křemík a perovskit. Teoretická část práce popisuje technologické postupy tenkovrstvých technologií a struktury různých typů solárních článků. Experimentální část se zaměřuje na přípravu perovskitových článků a analýzu vrstev transparentního vodivého oxidu ITO. Ekonomická část práce porovnává technologii tandemových článků s konvenčními křemíkovými články pomocí dlouhodobých měrných nákladů na elektřinu (LCOE) a citlivostní analýzy. Výsledky přispějí k dalšímu výzkumu na katedře elektrotechnologie a nastíní situaci při pravděpodobném zavedení tandemový článků na trh.

Klíčová slova

Perovskitové solární články, tandemové solární články, transparentní vodivý oxid, dlouhodobé měrné náklady na elektřinu (LCOE), citlivostní analýza

Abstract

This bachelor thesis explores new technologies in solar cell manufacturing, in particular the use of perovskite materials, which show high potential for efficiency improvements. Special attention is given to tandem cells combining silicon and perovskite. The theoretical part of the thesis describes the thin-film technologies and the structures of various types of solar cells. The experimental part focuses on the preparation of perovskite cells and the analysis of transparent conductive oxide ITO. The economic part of the thesis compares the technology of tandem cells with conventional silicon cells using levelized cost of energy (LCOE) and sensitivity analysis. The results will contribute to further research in the Department of Electrotechnology and provide insights into the potential market introduction of tandem cells.

Key words

Perovskite solar cells, tandem solar cells, transparent conductive oxide, levelized cost of energy (LCOE), sensitivity analysis

Seznam použitých zkratk a symbolů

LCOE	Levelized Cost of Energy
NPV _{CN}	čistá současná hodnota celkových peněžních nákladů
NPV _W	čistá současná hodnota produkce elektrické energie
CAPEX	celkové investiční náklady
OPEX	provozní náklady
W	vyrobená elektřina
n	doba životnosti
r	diskontní míra
ČNB	Česká národní banka
CAPM	Capital Asset Pricing Model
β	beta koeficient
r_E	diskont
r_f	bezrizikový výnos
r_m	Očekávaný výnos kapitálového trhu
RMP	Risk Market Premium
FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
BMS	Battery management system
STC	Standard Test Condition
PVD	Physical Vapor Deposition
CVD	Chemical Vapor Deposition
SEM	skenovací elektronový mikroskop
AFM	Atomic Force Microscopy
ETL	Electron Transport Layer
HTL	Hole Transport Layer
ITO	Indium Tin Oxide
TVO	transparentní vodivý oxid
P_{inst}	instalovaný výkon
P_{si}	cena křemíkového modulu
P_{Per}	cena perovskitového modulu
P_{Tan}	cena tandemového modulu
E_{RS}	roční spotřeba elektřiny
E_r	roční produkce elektřiny
n_{si}	počet použitých panelů
W_{si}	vyrobená elektřina křemíkovými moduly
λ	vlnová délka
α	absorpční koeficient
TiO ₂	oxid titaničitý
CaTiO ₃	Titanát vápenatý
ZnO	Oxid zinečnatý
SnO ₂	Oxid cíničitý
PTAA	Poly(triarylamín)
PCBM	methylester kyseliny [6,6]-fenyl-C71-butanové
BCP	Bathocuproin
DMF	Dimethylformamid

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Rozdělení tenkovrstvých technologií [1]	16
Obrázek 1.2 Zařízení pro napařování, upraveno [4]	16
Obrázek 1.3 Princip magnetronového napařování, upraveno [5]	17
Obrázek 2.1 Struktura křemíkového solárního článku, upraveno [7]	18
Obrázek 2.2 Struktura perovskitového článku, upraveno [8]	19
Obrázek 2.3 Perovskitová struktura [8]	20
Obrázek 2.4 Pásový model polovodiče	22
Obrázek 2.5 Princip tandemového článku, zdroje [14] [15]	22
Obrázek 3.1 Eliptická polarizace [17]	23
Obrázek 4.1 Vakuová komora	26
Obrázek 4.2 Upevnění vzorku ve vakuové komoře	26
Obrázek 4.3 Ukázka vzorků ITO	28
Obrázek 4.4 Optické porovnání vzorků SEM	31
Obrázek 4.5 Porovnání komerčního a laboratorního ITO	32
Obrázek 4.6 Porovnání vzorků AFM	33
Obrázek 5.1 Struktura připravovaného perovskitového článku	34
Obrázek 5.2 Princip rotačního nanášení	34
Obrázek 5.3 Ukázka perovskitového článku	36

Seznam grafů

Graf 4.1 Absorpční koeficient vzorků ITO	28
Graf 4.2 Modelování vodivosti vzorků ITO	29
Graf 4.3 Absorpční koeficient při konstatní době depozice	30
Graf 5.1 Naměřená VA charakteristika	36
Graf 5.2 Vliv sériového odporu na FV článek [19]	37
Graf 6.1 Výsledky citlivostní analýzy	48

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 Naměřené hodnoty vzorků	27
Tabulka 6.1 Náklady FVE.....	40
Tabulka 6.2 Použitý Si modul	43
Tabulka 6.3 Použitý tandemový modul.....	44
Tabulka 6.4 Cena FVE	45
Tabulka 6.5 Výsledky analýzy LCOE na základě stanovených předpokladů	46
Tabulka 6.6 Výsledky analýzy LCOE při 0 % systémové ztrátě	46
Tabulka 6.7 Vliv zvýšení účinnosti článků	47
Tabulka 6.8 Vliv nárůstu ceny článků.....	47

Obsah

Úvod	13
1 Tenkovrstvé technologie.....	15
1.1 Charakteristika tenké vrstvy	15
1.2 Tvorba tenké vrstvy	15
1.3 Způsob přípravy tenkých vrstev	15
1.3.1 PVD.....	16
1.3.2 Napařování	16
1.3.3 Naprašování.....	17
1.3.4 Magnetronové naprašování.....	17
2 Solární článek	18
2.1 Základní princip solárního článku	18
2.2 Perovskitový článek.....	19
2.3 Tandemový článek.....	21
2.3.1 Princip a struktura tandemového článku.....	21
3 Elipsometrie.....	23
3.1 Princip elipsometrie.....	23
3.2 Optické konstanty n a k	23
3.3 Absorpční koeficient α	24
4 Příprava vrstev transparentních vodivých oxidů.....	26
4.1 Zařízení.....	26
4.2 Postup	26
4.3 Naměřené hodnoty.....	27
4.3.1 Výsledky elipsometrie	28
4.3.2 Výsledky SEM.....	31
4.3.3 Výsledky AFM.....	33
5 Příprava perovskitového článku.....	34
5.1 Zařízení.....	34
5.2 Postup	35
5.3 Naměřené hodnoty.....	36

5.4	Shrnutí výsledků experimentální části.....	37
6	Případová studie.....	39
6.1	Dlouhodobé měrné náklady LCOE	39
6.2	Předpoklady modelu.....	41
6.3	Vstupní parametry modelu	43
6.4	Výsledky.....	46
6.5	Citlivostní analýza	47
6.6	Diskuze.....	49
7	Závěr.....	50
8	Použitá literatura.....	51

Úvod

Nacházíme se v době, kdy svět čelí výzvam v oblasti energetiky. Lidé začínají být více otevřeni novým technologiím a využívání obnovitelných zdrojů energie. Obnovitelné zdroje však často naráží na své fyzikální limity, proto je třeba hledat řešení, jak využít maximální možný potenciál těchto zdrojů.

Slunce je považováno za největší zdroj čisté a obnovitelné energie. Díky solárním technologiím jsme schopni využít tuto energii a přeměnit ji na energii elektrickou. Jedná se technologii udržitelnou, šetrnou k životnímu prostředí, neboť netvoří emise skleníkových plynů.

Tato práce zkoumá nové technologie při výrobě solárního článku, které zvyšují jeho účinnost. Velký potenciál využití v komerčních článcích mají materiály perovskitové struktury. Perovskity jsou tvořeny kombinací různých materiálů, které dodržují krystalovou strukturu. V současnosti se testují tandemové články (kombinace křemíku a perovskitu), které dosahují vynikajících výsledků z hlediska účinnosti. Díky tandemovým článkům jsme schopni posunout horní limit účinnosti článku o několik procent.

V teoretické části práce budou popsány technologické postupy tenkovrstvých technologií, zejména naprašování, které využijeme pro tvorbu solárního článku. Budou vysvětleny struktury křemíkových, perovskitových a tandemových solárních článků. Pro porovnání jednotlivých experimentálně vytvořených vzorků bude využita metoda elipsometrie, jejíž principy budou popsány.

V experimentální části práce bude připraven perovskitový solární článek. Detailně zde budou analyzovány vzorky první vrstvy článku, kterou je transparentní vodivý oxid ITO (indium tin oxide). Laboratorně připravené vzorky budou analyzovány z hlediska kvality a optických parametrů vrstev, kdy bude využita metoda elipsometrie a snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu.

V ekonomické části bude v rámci případové studie porovnána perspektivní technologie tandemových článků se současnou křemíkovou technologií. Analýza bude provedena pomocí dlouhodobých měrných nákladů na elektřinu LCOE (Levelized Cost of Electricity). Přínosem práce bude zhodnocení ekonomické efektivity této technologie pomocí citlivostní analýzy. Závěry a poznatky získané při práci budou využity pro další výzkum na katedře elektrotechnologie.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Tenkovrstvé technologie

1.1 Charakteristika tenké vrstvy

Tenkou vrstvou rozumíme vrstvu materiálu nanesenou na základním substrátu, jejíž tloušťka ovlivňuje střední volnou dráhu elektronu. Tloušťka tenké vrstvy se pohybuje v rozmezí několika desítek nanometrů až do jednotek mikrometrů. Naopak vrstvy tlusté začínají svou tloušťku od jednotek mikrometrů. Vlastnosti tenké vrstvy jsou ovlivněny použitým materiálem a zejména tloušťkou dané vrstvy. Pokud je tloušťka ve stovkách nanometrů, může být vytvořená vrstva nespojitá. Tenké vrstvy bychom mohli rozdělit na základě typů materiálu na – vodivé, izolační, polovodivé, magnetické, dielektrické a další. [1]

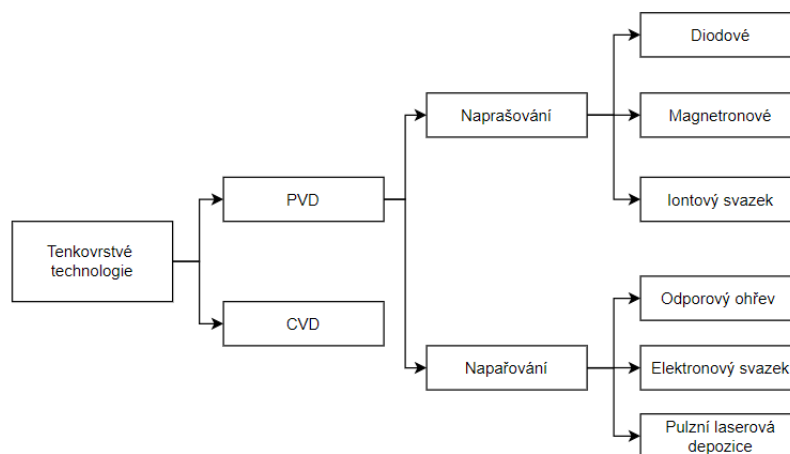
Tenké vrstvy mají využití například v oblastech energetiky při výrobě solárních článků, ve strojírenství jako diamantové vrstvy nanášené na řezné nástroje a v elektrotechnice pro výrobu kontaktů pro polovodiče.

1.2 Tvorba tenké vrstvy

Během procesu růstu tenké vrstvy dochází k několika klíčovým fázím. Prvním krokem je tvorba zárodků, kdy atomy nanášeného materiálu tvoří shluky (nuklea) na povrchu podložky. Nukleus postupně roste a dosáhne kritické velikosti, kdy se vyrovná jeho vnitřní a povrchová energie, což zastaví další růst. V této fázi se na povrchu podložky vytváří množství nových nukleí a větších ostrůvků. Při postupném zaplňování prostoru mezi nukleí dochází k jejich slévání, nazývanému koalescence. Následně začínají vytvořené ostrůvky nanášeného materiálu srůstat a vytvářejí tak síťovou strukturu. Při opakovaném nanášení materiálu nakonec vznikne souvislá vrstva. [1] [2]

1.3 Způsob přípravy tenkých vrstev

Tenká vrstva je nanášená na podložku, kterou může být např. bezalkalické nebo křemenné sklo. Podložky pro tenké vrstvy musí splňovat požadavky na čistotu a kvalitu povrchu, neboť tenká vrstva kopíruje povrch podložky. Po zajištění požadované kvality jsou podložky umývány v ultrazvukové vaně, v parách propylalkoholu nebo oleptány v silně koncentrované kyselině sírové. Mezi dvě hlavní techniky příprav tenkých vrstev patří fyzikální depozice PVD (Physical Vapor Deposition) a chemická depozice CVD (Chemical Vapor Deposition). Podrobnější rozdělení technologií viz Obrázek 1.1. V naší práci se zaměříme zejména na techniky PVD, do nichž spadá magnetronové naprašování, které jsme využili pro tvorbu vrstev článku. Další technologií, kterou využijeme bude rotační nanášení, které zařadíme do techniky CVD. [1]



Obrázek 1.1 Rozdělení tenkovrstvých technologií [1]

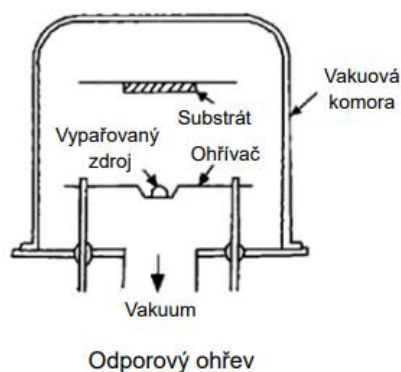
1.3.1 PVD

Fyzikální depozice může probíhat ve dvou procesech – napařování a napařování. Tyto procesy budou popsány v následující části práce.

1.3.2 Napařování

Proces napařování probíhá v uzavřeném prostředí recipientu, kde dochází k zahřívání nanášeného materiálu a tím uvolnění jeho částic ve formě par. Tyto páry pak kondenzují na základním substrátu, který je umístěn přímo nad vypařovaným materiálem, a tvoří tenkou vrstvu. Celý proces probíhá ve vakuu při tlaku 10^{-6} – 10^{-4} Pa, z důvodu zvětšení střední volné dráhy molekul nanášeného materiálu. Existuje několik způsobů ohřevu vypařovaného materiálu. Realizace je možná pomocí odporového ohřevu, iontového svazku nebo vysokofrekvenčního ohřevu atd. [3]

Na obrázku (Obrázek 1.2) je schematicky znázorněno zařízení, ve kterém proces probíhá. Je znázorněna vakuová komora (recipient), kde proces probíhá, napařovaný materiál, který je odpařován pomocí jednoho ze zmíněných způsobů a substrát (podložka) na který je vrstva nanášena.



Obrázek 1.2 Zařízení pro napařování, upraveno [4]

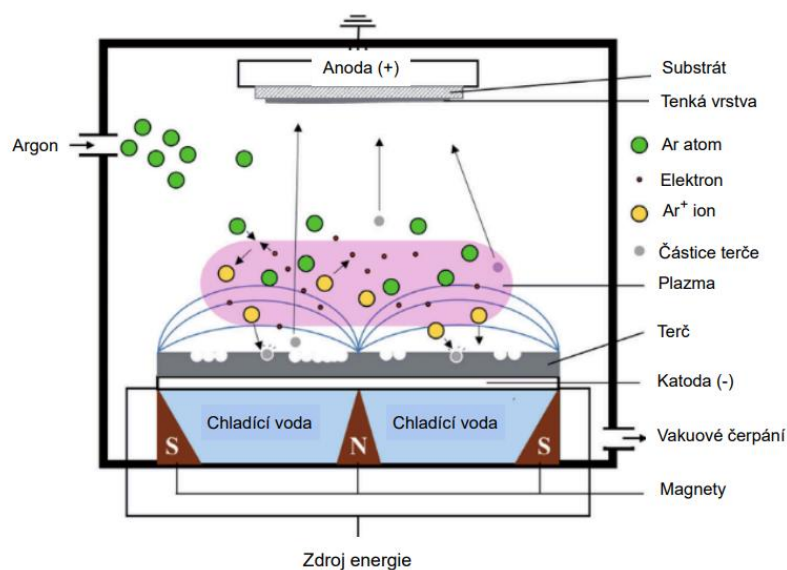
1.3.3 Naprašování

Příprava tenkých vrstev naprašováním je prováděna v uzavřeném prostředí vakuové komory, podobně jako napařování. Uvnitř komory se nachází terč z nanášeného materiálu, jehož povrch je pomocí urychlených částic narušen a jeho uvolněné částice dopadají na podložku.

Komora je vyčerpána na předem danou úroveň vakua a je do ní napuštěn inertní plyn – nejčastěji argon nebo dusík. Inertní plyn je takový plyn, který chemicky nereaguje s naprašovaným materiálem. Je nutné, aby částice argonu byly pomocí dodané energie ionizovány a vznikl tak silně ionizovaný plyn, tj. plazma. Volný elektron vyrazí z atomu inertního plynu elektron a kladně nabitý ion. Tento ion je přitahován ke katodě a vyrazí částici naprašovaného materiálu a další elektron. Díky velkému množství elektronů se zvyšuje ionizace plynu. Iony a elektrony s sebou navzájem reagují a spojují se opět v neutrální částice za vzniku fotonu. [4]

1.3.4 Magnetronové naprašování

Při magnetronovém naprašování je katodou pevný terč z rozprašovaného materiálu. Při využití této metody působí magnetické pole na katodu a doutnavý výboj je rovnoběžný s povrchem katody. Elektrony nacházející se v doutnavém výboji vykazují cykloidní pohyb ve směru $E \times B$ s driftovou rychlostí E/B kde E značí elektrické pole ve výboji a B magnetické pole. Magnetické pole je orientováno tak, že pro driftovací dráhy elektronu tvoří uzavřenou smyčku. Tento jev zvyšuje počet srážek mezi elektrony a molekulami inertního plynu a tím se zvyšuje i hustota plazmy. To vede ke zvýšení hustoty kladných iontů u katodového terče a ty vyrazí částice z rozprašovaného terče a skrz plazmu se dostávají směrem k substrátu. Popsaný postup je schematicky znázorněn viz Obrázek 1.3. Výhodou tohoto typu depozice je její vysoká rychlost a nízký tlak inertního plynu okolo 1,33 Pa. [4]



Obrázek 1.3 Princip magnetronového naprašování, upraveno [5]

2 Solární článek

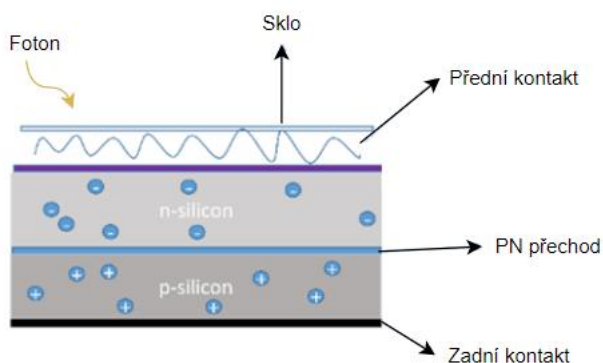
2.1 Základní princip solárního článku

Solární článek je zařízení, které slouží k přeměně sluneční energie na energii elektrickou. Článek je vyroben z polovodičového materiálu, který je schopen absorbovat fotony ze slunečního záření. Nejvíce rozšířený typ článku je křemíkový článek, proto popíšeme základní princip právě na něm. [6]

Jako nejběžnější polovodivý materiál je v solárních článcích využíván křemík s přidanou příměsí (dotováním). Podle výběru příměsi dosáhneme toho, že elektrický proud bude v polovodiči veden buď volnými elektrony (typ N) nebo děrami (typ P). Prvním typem, který definujeme je polovodič typu N (negativní). Křemík je dotován prvkem z 5. skupiny periodické tabulky, ten má o jeden valenční elektron více než křemík. Takový prvek označujeme jako donor a typicky se může jednat o fosfor nebo arsen. Objevuje se zde volný elektron, který je nosičem elektrického proudu, to označíme jako elektronovou vodivost. [6]

Druhým typem je polovodič typu P (pozitivní). Ten je dotován prvkem ze 3. hlavní skupiny, který nazveme akceptor. Akceptor má o jeden valenční elektron méně než základní polovodič, díky tomu ve struktuře valenční elektron chybí a vzniká volná díra. Říkáme, že polovodič typu P má děrovou vodivost. [6]

Typický křemíkový článek viz Obrázek 2.1 má jeden P-N přechod, který vzniká spojením polovodiče typu N a P, tedy dotovaným křemíkem. Při dopadu fotonů na PN přechod se projevuje fotoelektrický jev. Pokud je elektronům i dírákům dodána dostatečná energie, dochází k jejich uvolňování a pohybu přes PN přechod. Pro křemíkový článek se velikost potřebné energie k absorbování fotonu pohybuje kolem 1,1 eV. Oblast N se poté nabíjí záporně, oblast P kladně a dochází ke vzniku fotoelektrického napětí a tím i vzniku stejnosměrného proudu. [6]

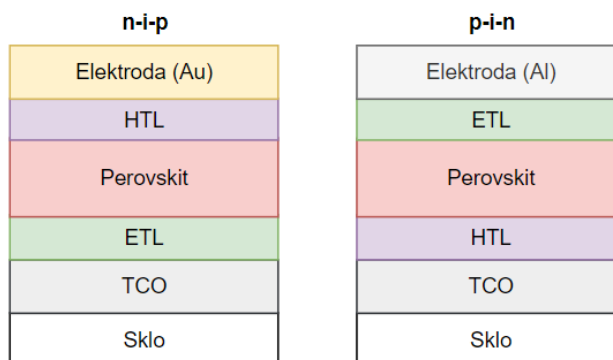


Obrázek 2.1 Struktura křemíkového solárního článku, upraveno [7]

2.2 Perovskitový článek

Perovskitové články jsou novou technologií v oblasti solární energetiky s velkým potenciálem využití ve výrobě. Článek využívá materiály perovskitové struktury, jejichž hlavní výhodou je jejich vysoká absorpční schopnost a efektivní konverze sluneční energie na elektrickou, mezi další výhody patří relativně nízká cena a snadná výroba. Mezi nedostatky naopak patří udržení dlouhodobé stability článků při různých podmínkách prostředí. [8]

Perovskitový solární článek se skládá z několika tenkých vrstev, které jsou nanášeny postupně na skleněný substrát. Typická struktura perovskitového solárního článku je zobrazena viz Obrázek 2.2. Perovskitová vrstva slouží jako absorpční vrstva, kterou obklopují nejčastěji vrstvy oxidů typu N (Electron Transport Layer) a P (Hole Transport Layer). Dalšími vrstvami článku jsou elektrody a transparentní vodivé oxidy. Perovskitové články jsou v současnosti ve fázi vývoje, kde se testují články typu n-i-p a p-i-n. [9]



Obrázek 2.2 Struktura perovskitového článku, upraveno [8]

1. Elektroda

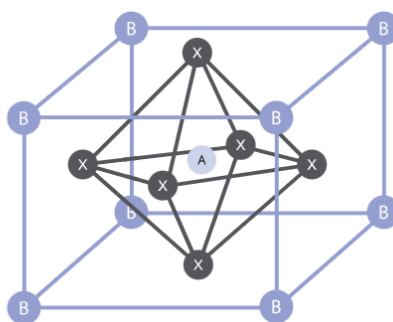
Svrchní vrstvu článku tvoří vodivý materiál. Nejčastěji využívané materiály jsou stříbro, zlato nebo hliník. V posledních letech se experimentuje s použitím transparentního vodivého oxidu místo elektrody, proto aby byla zvýšena účinnost článku.

2. Electron transport layer

V této vrstvě dochází ke shromažďování a transportu elektronů k elektrodě a blokování transportu děr k elektrodě. Typické materiály této vrstvy jsou většinou oxidy např. TiO_2 . Jedná se o oxid typu N, ze kterého lze snadno a za dostupnou cenu vytvořit vrstvu. [10]

3. Perovskit

Perovskit je druh minerálu, který byl objeven v roce 1839 v pohoří Ural. Jedná se o minerál složený z vápníku, titanu a kyslíku s chemickým vzorcem CaTiO_3 . Materiál byl zajímavý svou typickou krystalovou strukturou. Perovskitová struktura, používaná jako absorpční vrstva pro perovskitové články, má obecný vzorec ABX_3 . A ve vzorci reprezentuje pozitivně nabitý kation organické molekuly (např. formamidinium), B je nejčastěji kation anorganické molekuly (olovo, cín) a X je negativně nabitý anion (jodid, chlorid). Konkrétní použité materiály se mohou lišit, ale obecně dodržují typickou krystalografickou strukturu viz Obrázek 2.3. Podle volby konkrétních materiálů jsou určeny optoelektronické vlastnosti např. šířka zakázaného pásu nebo absorpční spektrum. [9]



Obrázek 2.3 Perovskitová struktura [8]

4. Hole transport layer

Účelem vrstvy transportující díry je extrahování děr z perovskitové vrstvy a transport těchto děr k elektrodě. Zároveň slouží tato vrstva jako bariéra před přímým kontaktem perovskitu a vrchní elektrody, což snižuje riziko rekombinace elektronů a děr v perovskitovém solárním článku typu n-i-p. [11]

5. Transparentní vodivý oxid

Vrstvy transparentních vodivých oxidů (dále TVO) nalezneme nejen v aplikacích fotovoltaiky, ale i v dotykových displejích nebo jako vrstvy v okenních sklech. Tato vrstva, jak název napovídá je opticky průhledná pro viditelné světlo a vykazuje elektrickou vodivost. V současnosti se testují TVO jako náhrada přední či zadní elektrody FV článku.

TVO jsou nejčastěji připravovány magnetronovým napařováním. Než však dojde k procesu nanášení vrstvy, je třeba upravit základní materiál (typicky oxid india), aby se stal vodivým. Oxidy, které nejsou dotovány jiným prvkem a současně mají šířku zakázaného pásu větší než 3 eV, jsou v pokojové teplotě izolanty. Pro vznik vodivého oxidu je potřeba dotace jiným materiálem. Konkrétním příkladem může být materiál ITO (Indium Tin Oxide), což je oxid india dotován cínem. Díky dotování dochází ke zvýšení hustoty volného nosiče náboje a jako důsledek tak k posunu

Fermiho hladiny do vodivostního pásu. Elektrony se tak pohybují ve vodivostní pásu a je generován elektrický proud. [12]

Aby mohl být materiál transparentní ve viditelném spektru, šířka jeho zakázaného pásu musí být větší než 3 eV. Hodnota 3 eV odpovídá spodní hranici viditelného spektra, tedy vlnové délce přibližně 413 nm.

Mezi nejznámější materiály využívané jako TVO patří ZnO, SnO₂, ITO. Jedná se o materiály s n-tytem elektrické vodivosti, kde jsou volné elektrony hlavním nosičem náboje. [12]

6. Substrát

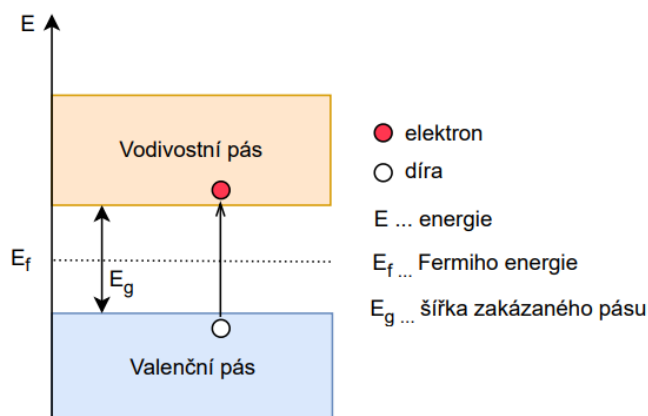
Nejspodnější vrstvou je substrát, nejčastěji sklo. Na podložku je nanášena vrstva transparentního vodivého oxidu. Nejčastěji využívané materiály pro podložky a požadavky na jejich kvalitu jsou popsány viz Kapitola 1.3.

2.3 Tandemový článek

Tandemový článek je fotovoltaický článek, kombinující více vrstev polovodičových materiálů s různými absorpčními vlastnostmi. Tandemový článek využívá široké spektrum dopadajícího slunečního záření a díky tomu dosahuje vysoké účinnosti přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Tandemové články se v současné době nevyrobí komerčně, avšak mají dle dosavadního vývoje velký potenciál do budoucna. V roce 2023 se podařilo laboratorně připravit tandemový článek křemík-perovskit s rekordní účinností 33,9 %. Technologická společnost LONGi tak překonala teoretický limit účinnosti komerčních křemíkových solárních článků 33,7 %, což je zásadním průlomem ve vývoji solárních technologií. [13]

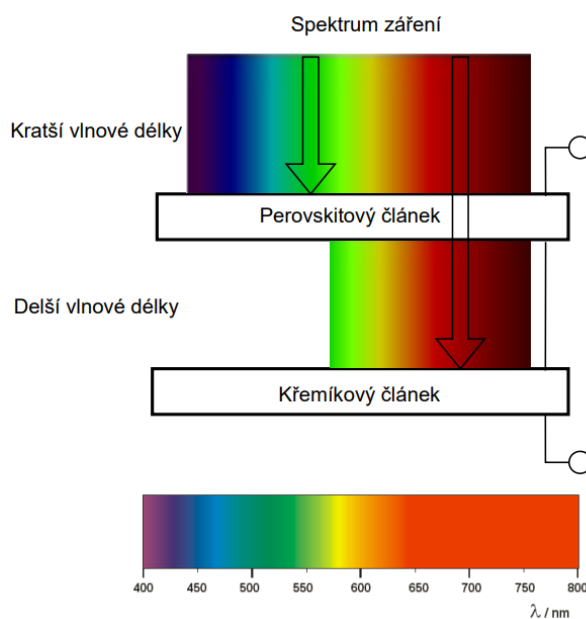
2.3.1 Princip a struktura tandemového článku

Tandemový článek je složen ze dvou či více struktur polovodičových materiálů umístěných na sebe. Typické polovodičové materiály, používané pro tandemové články mohou být např. křemík či perovskit. Princip tandemu spočívá v tom, že dílčí články mají rozdílnou šířku zakázaného pásu. Fotony dopadající na polovodič musí mít větší energii, než je šířka zakázaného pásu, aby byly absorbovány. Absorbované fotony předávají svou energii elektronům ve valenčním pásu, které jsou tak excitovány do pásu vodivostního viz Obrázek 2.4. Excitovaný elektron za sebou nechává volné místo (díru), na jejíž místo se přesouvají sousední elektron. Elektron i díra jsou volnými nosiči náboje, díky tomu se tvoří páry elektron-díra a je generována elektrická energie. [14]



Obrázek 2.4 Pásový model polovodiče

Princip tandemového článku je znázorněn viz Obrázek 2.5. Horní perovskitový článek absorbuje sluneční záření s kratší vlnovou délkou, což mohou být např. paprsky viditelného spektra s vlnovou délkou $\lambda < 550$ nm. Tyto fotony mají větší energii, současně však musí překonat větší šířku zakázaného pásu, aby mohly být absorbovány. Spodní křemíkový článek absorbuje světlo propuštěné prvním článkem. Takové světlo je charakteristické delšími vlnovými délkami, a tedy i menší energií. Křemíkový článek má proto menší šířku zakázaného pásu a absorbuje vlnové délky $\lambda > 550$ nm.



Obrázek 2.5 Princip tandemového článku, zdroje [14] [15]

V naší práci se zaměříme na tandemový článek, který kombinuje křemíkovou a perovskitovou technologii v konfiguraci 2 T. Označení 2 T (2 Terminal) znázorňuje 2 použité články, které jsou zapojeny do série. Často se můžeme setkat se značením 4 T, tedy čtyřvrstevným tandemovým článkem.

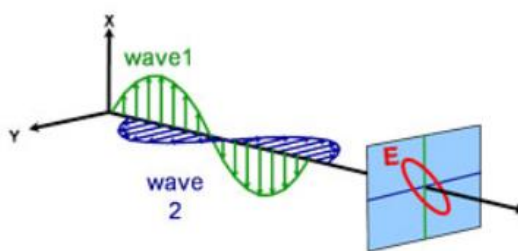
[16]

3 Elipsometrie

Elipsometrie je metoda optické analýzy tenkých vrstev, která umožňuje určení optických konstant a tloušťky jednotlivých vrstev vzorku. Elipsometrie pracuje se změnou polarizačního stavu světla odraženého nebo prošlého vzorkem. Změna polarizace je vyjádřena jako poměr amplitudy ψ a fázového rozdílu Δ . Naměřená data může použít pro charakterizaci složení, drsnosti a dalších optických parametrů. [17]

3.1 Princip elipsometrie

Světlo je elektromagnetická vlna pohybující se prostorem viz Obrázek 3.1. V elipsometrii se zaměřujeme na chování elektrického pole této vlny, nazývané polarizace. Elektrické pole vždy stojí kolmo ke směru šíření, a proto se vlna ve směru osy z popisuje pomocí složek x a y (wave 1,2). Pro elipsometrii je klíčové polarizované světlo, které sleduje určitou cestu a tvar. Polarizační stav světla je popsán eliptickou polarizační elipsou (E), což je grafické znázornění směru a intenzity polarizace světla. Kromě nejběžnější eliptické polarizace známe také lineární a kruhovou polarizaci. [17]



Obrázek 3.1 Eliptická polarizace [17]

3.2 Optické konstanty n a k

Mezi klíčové parametry, které elipsometrie zkoumá patří optické konstanty. Jak již název napovídá, tyto konstanty charakterizují optické vlastnosti materiálu.

n – index lomu

Index lomu popisuje, jak rychle se světlo šíří v materiálu v porovnání s rychlostí světla ve vakuu. V elipsometrii vypovídá n o fázi odrazivosti a lomu světla při průchodu materiálem. Změna indexu může indikovat změnu fyzikálního stavu materiálu nebo změnu chemického složení.

k – index absorpce

Index absorpce měří absorpci světla materiálem. Jedná se o tu část světla, která je pohlcena materiálem. Další část světla je od materiálu odražena nebo přenesena. Pro elipsometrii tento parametr ovlivňuje intenzitu odrazu a pronikání světla do materiálu. Čím vyšší hodnoty k nabývá, tím více materiál pohlcuje světlo. [17]

3.3 Absorpční koeficient α

Absorpční koeficient popisuje, jak daleko do materiálu může světlo určité vlnové délky proniknout, než bude absorbováno. Pro materiály s nízkým absorpčním koeficientem je světlo špatně absorbováno a pokud je materiál dostatečně tenký, bude se jevit průhledný pro danou vlnovou délku. Absorpční koeficient silně závisí na vlnové délce a můžeme ho vyjádřit pomocí vzorce:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$

kde α je absorpční koeficient, λ je vlnová délka a k index absorpce. [18]

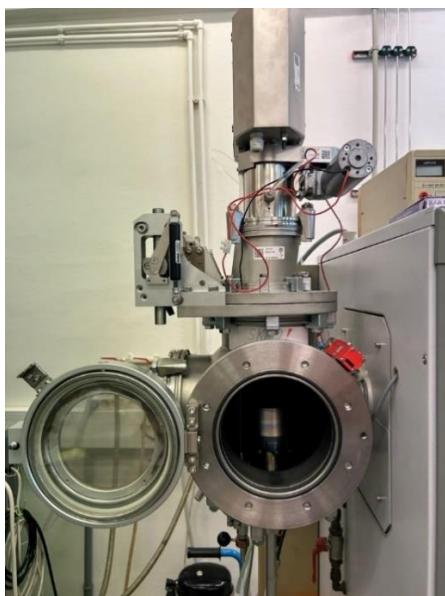
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4 Příprava vrstev transparentních vodivých oxidů

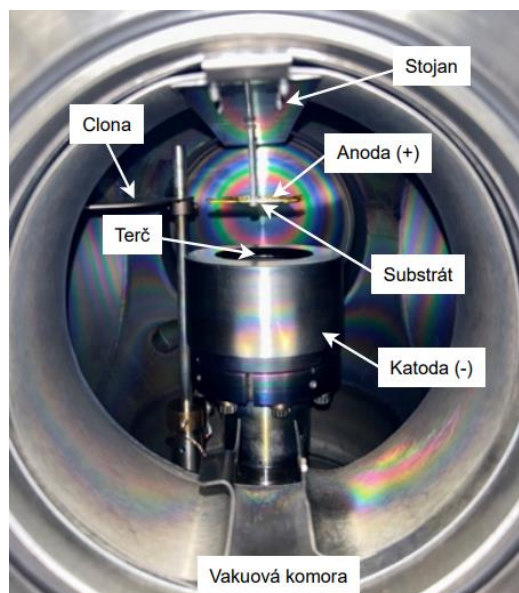
Tato část práce bude věnována přípravě vrstev TVO. Bude popsán postup a podmínky experimentální přípravy vzorků v laboratoři tenkých vrstev katedry elektrotechnologie. Vzorky budou zhotoveny z materiálu ITO = směs oxidu india a cínu, který bude deponován na skleněný substrát. Bude zhotoveno několik vzorků, které budou následně proměřeny z hlediska kvality a optických parametrů. Vytvořené vzorky budou porovnány s komerčně připravovaným ITO. Očekávaná tloušťka vrstvy by se měla pohybovat v rozmezí 100–200 nm.

4.1 Zařízení

Vzorky ITO byly připraveny na magnetronové naprašovačce v laboratoři tenkých vrstev katedry elektrotechnologie. Princip magnetronového naprašování je popsán viz kapitola 1.3.4. Použité zařízení je znázorněno na následujících obrázcích.



Obrázek 4.1 Vakuová komora



Obrázek 4.2 Upevnění vzorku ve vakuové komoře

4.2 Postup

Prvním krokem byla příprava substrátu. Jako substrát bylo použito sklo o rozměru 2x2 cm čištěné v acetonu pomocí ultrazvuku. Substrát byl upevněn do stojanu a umístěn do vakuové komory magnetronové naprašovačky viz Obrázek 4.2. Vzdálenost mezi substrátem a terčem byla 4 cm. Vakuová komora byla po uzavření čerpána na tlak $2 - 3 \cdot 10^{-5}$ mPa. Po dosažení požadovaného tlaku byl ventilem napuštěn do komory inertní plyn. Jako inertní plyn byl použit argon, ve vakuové komoře jsme se dostali na tlak $2 \cdot 10^{-2}$ mPa.

V tomto okamžiku bylo vše připraveno pro depozici ITO. Depozice probíhala 2, 3, 4, nebo 5 minut, při výkonu 20, 50 či 80 W. Jednotlivé parametry byly kombinovány s cílem najít optimální čas a výkon depozice, při kterém bychom dostali požadovanou tloušťku vrstvy ITO 100-200 nm.

Po ukončení depozice byla vypnuta vývěva, po chvíli byl uzavřen ventil s argonem a následovalo otevření vzduchového ventilu, aby došlo k vyrovnání tlaků v komoře a v okolí. Následně bylo možné vyndat hotový vzorek z vakuové komory. Posledním krokem experimentu bylo zhotovené vzorky proměřit na elipsometru a na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM).

4.3 Naměřené hodnoty

Celkem bylo zhotoveno 7 vzorků za následujících podmínek. Podmínky depozice, které jsou rozdílné pro jednotlivé vzorky, jsou zobrazeny v Tabulka 4.1.

Tabulka 4.1 Naměřené hodnoty vzorků

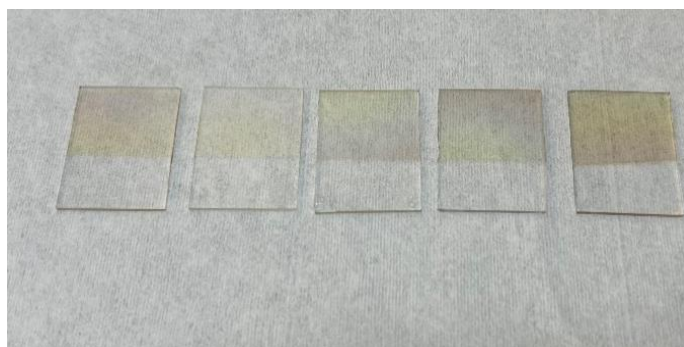
Číslo vzorku	Tloušťka [nm]	Drsnost [nm]	Čas depozice [min]	Výkon [W]
1	12,95	20,77	2	20
2	67,32	3,59	2	50
3	122,45	2,86	2	80
4	71,61	7,88	5	20
5	178,46	4,91	5	50
6	289,47	7,23	5	80
7	161,00	5,16	3	50

Vzorky 1 a 4 po proměření nespĺnily požadovanou tloušťku vrstvy. Výkon 20 W vyhodnotíme tedy jako příliš nízký pro tvorbu vrstvy ITO, protože ani delší čas depozice nevyhověl požadované tloušťce. Vzorek 6 měl naopak tloušťkou téměř 300 nm, tedy podstatně větší, než bylo požadováno. Vzorky, které vyhovely požadované tloušťce byly vzorky č. 3, 5 a 7. Optimální nastavení parametrů depozice proto stanovíme při výkonu 50 W a času depozice 3-5 minut.

Na základě naměřených hodnot lze pozorovat závislost tloušťky nanesené vrstvy na době depozice a na výkonu. Z hodnot je zřejmé, že se zvyšujícím se výkonem roste i tloušťka vrstvy. Dalším parametrem, který by ovlivnil tloušťku vrstvy je vzdálenost substrátu a terče. Tento parametry nebyl v rámci experimentu testován.

Drsnost jednotlivých vzorků je vyšší pro vzorky připravované při nižším výkonu. Při tvorbě vrstvy dochází na substrátu nejprve k tvorbě nukleí a následnému slévání do souvislé hustší vrstvy. Vrstvy

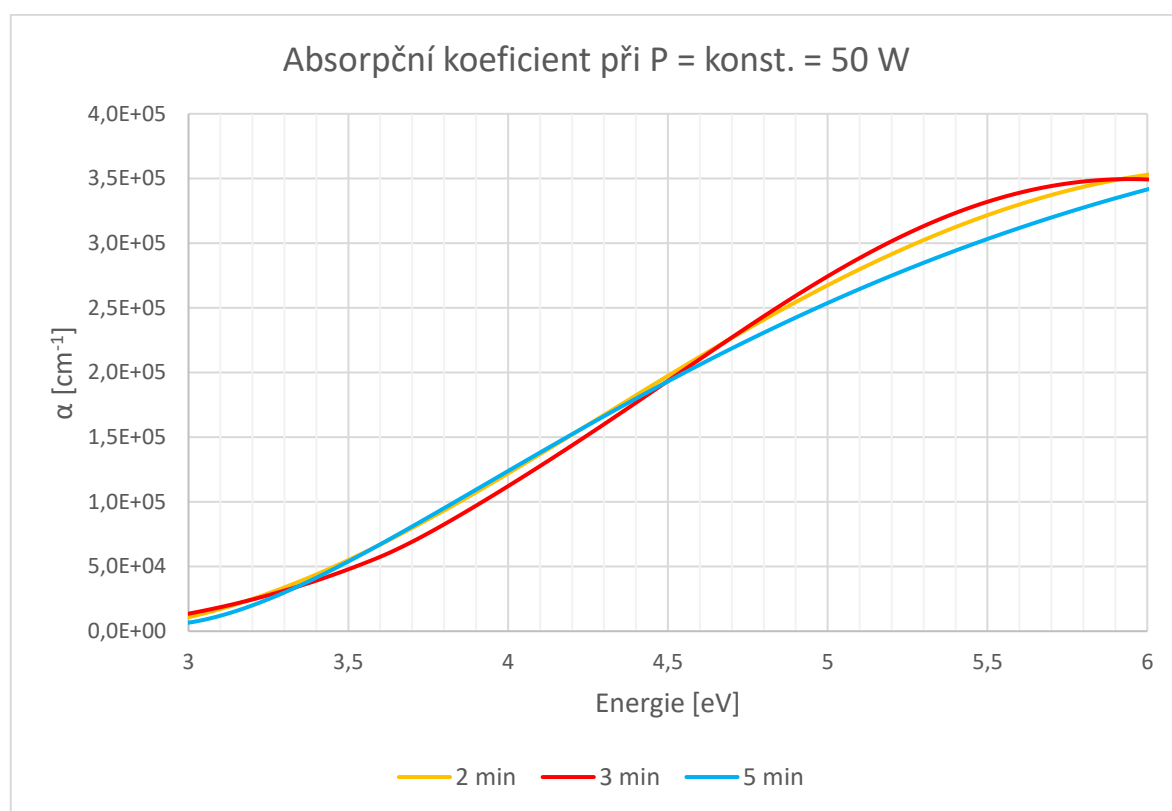
připravené při nižším výkonu jsou tenčí, proto jsou i méně husté a míra nerovnosti povrchu (drsnost) je tak vyšší.



Obrázek 4.3 Ukázka vzorků ITO

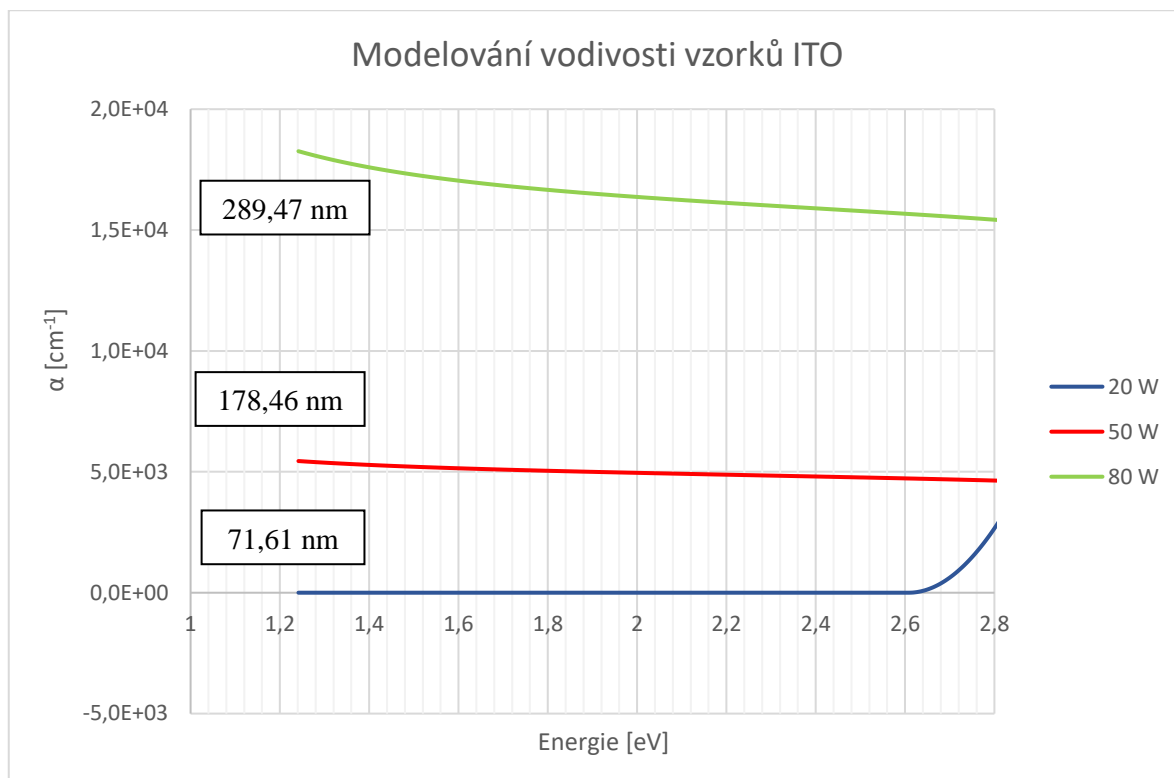
4.3.1 Výsledky elipsometrie

Po proměření vzorků metodou elipsometrie byly získány následující grafy.



Graf 4.1 Absorpční koeficient vzorků ITO

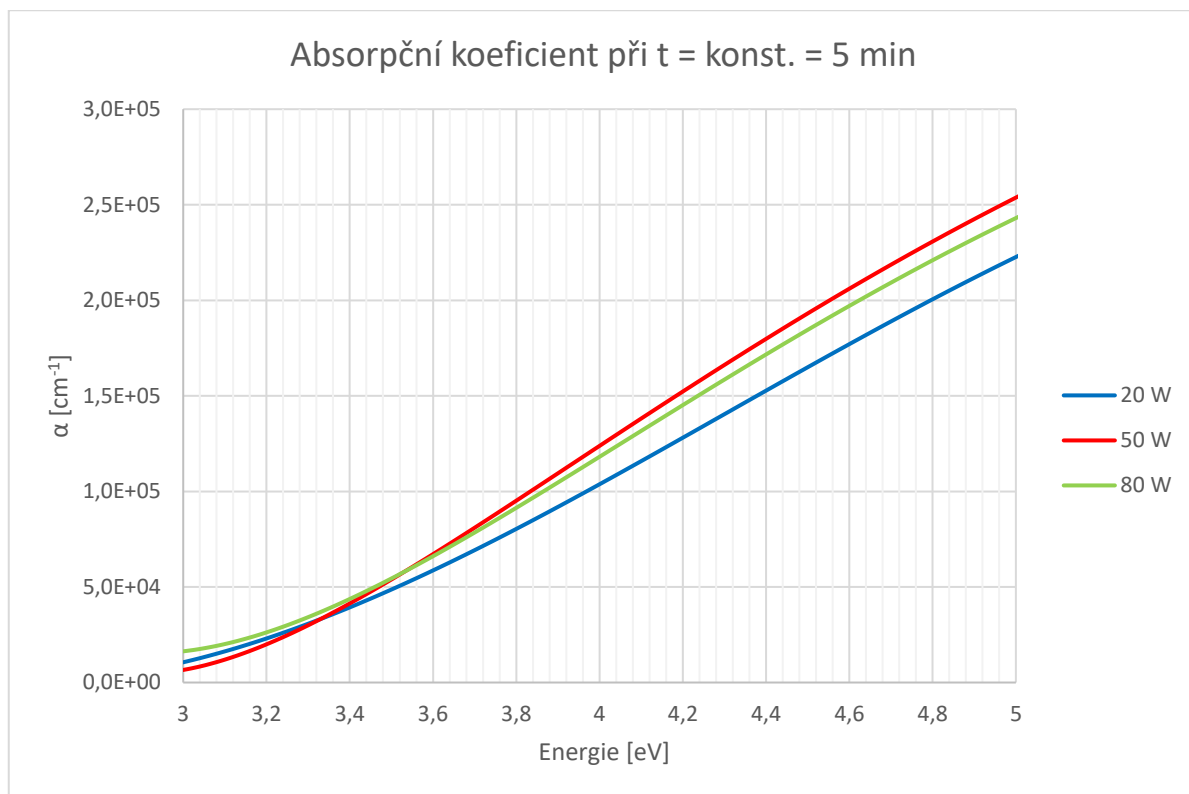
Z grafu můžeme vidět závislost absorpčního koeficientu na energii pro konstantní výkon 50 W a proměnné časy depozice. Z vykreslených charakteristik je zřejmé, že čas depozice neovlivní zásadním způsobem absorpční koeficient.



Graf 4.2 Modelování vodivosti vzorků ITO

Graf 4.2 zobrazuje první část naměřených hodnot absorpčního koeficientu α v závislosti na energii. Vyneseny křivkami jsou vzorky 4, 5 a 6 při konstantním čase depozice 5 minut a rozdílném výkonu. K měření byla využita metoda elipsometrie, konkrétně kombinace modelů Drude a Tauc-Lorentz. V grafu je zobrazena část využívající Drude model, který se používá pro určení hustoty volných nosičů náboje v materiálu. Elektrická vodivost je schopnost materiálu vést elektrický proud a mimo jiné závisí na koncentraci volných nosičů náboje. Proto z grafu můžeme vyhodnotit, že vzorek připravený při výkonu 20 W je vodivý nejméně. Naopak vzorky zhotovené při vyšším výkonu vykazují lepší známky vodivosti.

Pro ověření vodivosti vrstvy, lze využít také změření hodnoty odporu na čtverec. Čím vyšší hodnotu odporu na čtverec materiál má, tím se snižuje jeho vodivost. Hodnoty pro komerční ITO se pohybují mezi 10-20 Ω/cm^2 . Naměřená hodnota vzorku zhotoveného při 20 W vyšla 28 Ω/cm^2 . Jedná se tedy o lehce vyšší hodnotu odporu než u komerčního.

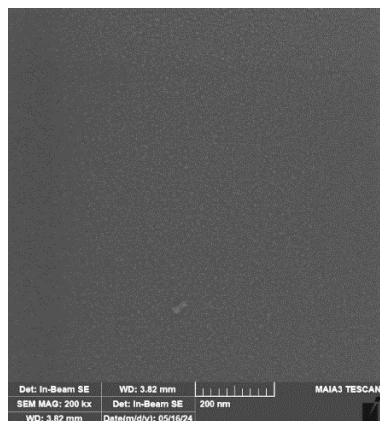


Graf 4.3 Absorpční koeficient při konstantní době depozice

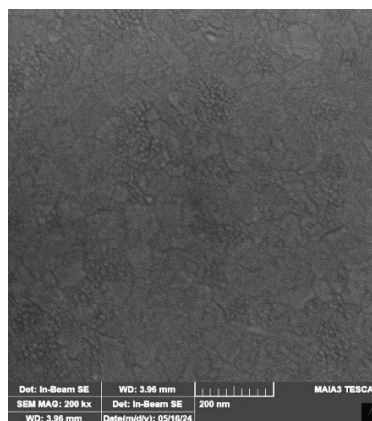
V návaznosti na předchozí graf, lze vykreslit pro stejné vzorky závislost absorpčního koeficientu α na energii v rozmezí 3–5 eV. V této části grafu je využit model Tauc-Lorentz, který se pomáhá získat informace o absorpčním koeficientu a optických konstantách. Nejnižší hodnotu α má vzorek zhotovený při nejnižším výkonu depozice. U ostatních dvou vzorků bychom očekávali vyšší hodnotu absorpčního koeficientu pro 80 W. Ačkoli se jedná o malý rozdíl oproti vzorku při výkonu 50 W, pravděpodobně se bude jednat o chybu způsobenou měřením.

4.3.2 Výsledky SEM

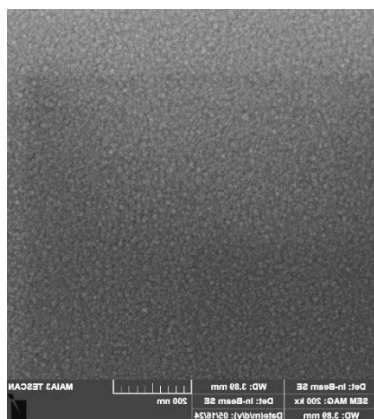
Následující obrázky zobrazují snímky vrstev pod skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM). SEM je hojně využívaný v oblasti nanotechnologií. SEM používá pro zkoumání povrchu vzorku pohyblivý svazek elektronů. Svazek elektronů skenuje povrch zkoumané vrstvy a interaguje tak s jejími atomy. Při interakci svazku elektronů s povrchem jsou emitovány sekundární elektrony. Tyto elektrony jsou zachycovány detektorem, který je přemění na světelný signál a vytvoří tak výsledný detailní obraz zkoumaného povrchu.



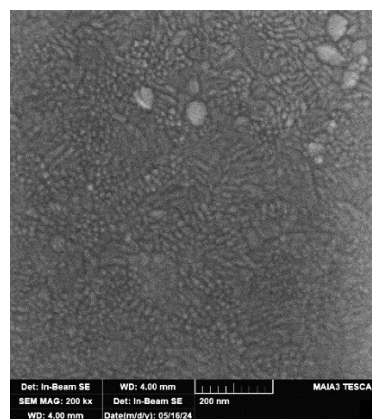
Vzorek 1



Vzorek 3



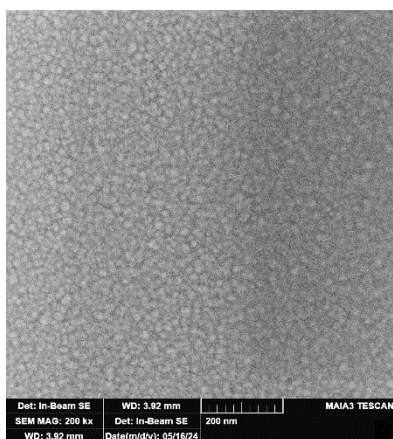
Vzorek 4



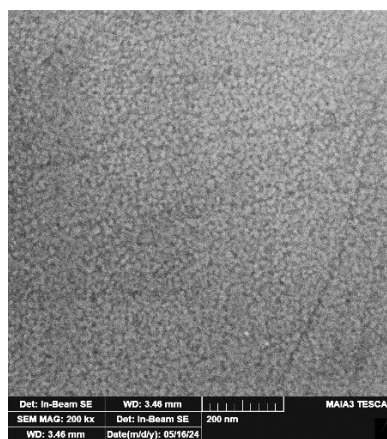
Vzorek 6

Obrázek 4.4 Optické porovnání vzorků SEM

Obrázek 4.4 porovnává čtyři ze zhotovených vzorků ITO. Snímky byly pro lepší znázornění struktury povrchu upraveny pomocí zvýšení kontrastu. Vzorky 1 a 4 byly připraveny při výkonu 20 W a ze snímků vidíme, že velikost zrn je v porovnání se vzorky 3 a 6 menší a sktruktura vzorků více konzistentní. Vzorky 3 a 6 mají širší zrna a menší pravidelnost ve struktuře. Tyto vzorky byly připraveny při výkonu 80 W. Větší výkon způsobí silnější ionizace argonu, díky tomu dochází k vyrážení částic z materiálu terče větší silou. Vyrážený materiál je současně i větší rychlostí zachycován na substrátu a díky tomu je struktura vrstvy více nepravidelná.



Vzorek 5



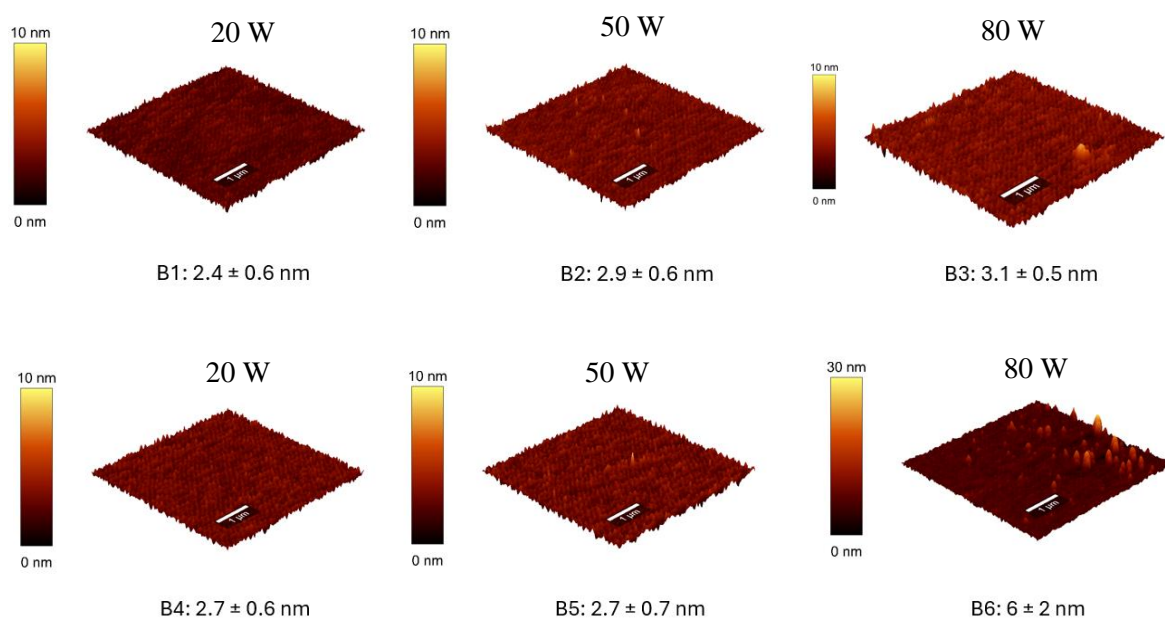
Komerční ITO

Obrázek 4.5 Porovnání komerčního a laboratorního ITO

Pro nalezení optimálních podmínek depozice jsme se rozhodovali na základě co nejbližší podobnosti experimentálně vytvořeného vzorku s komerčním ITO. Obrázek 4.5 porovnává strukturu těchto dvou vzorků. Vybraný vzorek 5 je dle optického vyhodnocení nejvíce podobný komerčnímu ITO. Podobnost najdeme jak ve velikosti zrn, tak i v naměřené tloušťce. Proto bylo nastavení parametrů přípravy vzorku 5 tj. výkon 50 W a čas depozice 5 minut, vybráno pro depozici ITO v rámci přípravy perovskitového článku, která bude popsána v následující kapitole.

4.3.3 Výsledky AFM

Pro další měření vzorků jsme využili metody Atomic Force Microscopy (AFM). Jedná se o pokročilou mikroskopickou techniku umožňující zobrazení povrchů materiálů na atomární úrovni. Princip fungování AFM spočívá v použití velmi ostrého hrotu připevněného k pružnému raménku, které se pohybuje po povrchu vzorku. Když se hrot přiblíží k povrchu, dochází k interakci mezi hrotem a atomy povrchu, což způsobuje ohnutí nebo vychýlení raménka. Vychýlení je měřeno pomocí laserového paprsku, který je odražen z horní části raménka na fotodetektor. Výsledkem tohoto procesu je velmi detailní obraz povrchu.

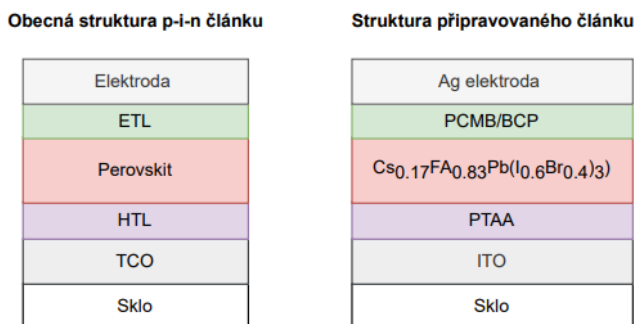


Obrázek 4.6 Porovnání vzorků AFM

Z naměřených topografických obrázků je vidět závislost větší drsnosti na velikosti výkonu. Vzorky 3 a 6, připravené při výkonu 80 W, mají větší drsnost povrchu než vzorky ostatní. Tímto měřením se zároveň potvrzují i optické výsledky ze SEM, kde tyto vzorky mají více nepravidelnou strukturu.

5 Příprava perovskitového článku

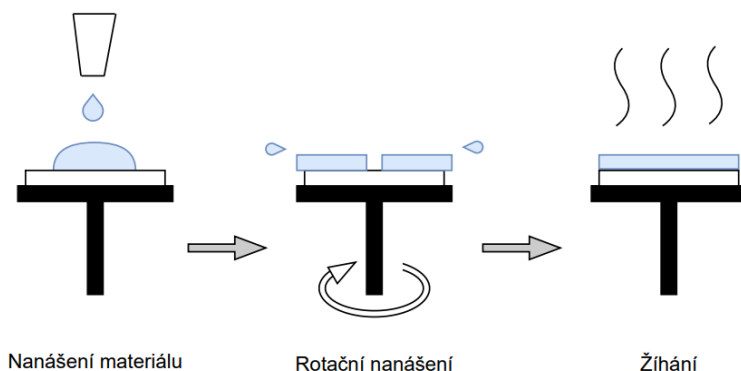
Perovskitový článek byl připraven jak na vzorky laboratorně zhotoveného ITO, tak na komerčně připravené vrstvy. Připravovaný článek byl typu p-i-n, s konkrétními zvolenými materiály pro jednotlivé vrstvy viz Obrázek 5.1. Cílem měření bylo připravit perovskitový článek. Po proměření VA charakteristiky článků bude možné vyhodnotit, jestli je laboratorně připravované ITO dostatečně stabilní transparentní vodivou vrstvou, která by se dala používat pro další experimenty.



Obrázek 5.1 Struktura připravovaného perovskitového článku

5.1 Zařízení

Jednotlivé vrstvy článku byly nanášeny v prostředí rukavicového dusíkového boxu. Byla použita technologie rotačního nanášení. Princip technologie viz Obrázek 5.2 spočívá v umístění substrátu do středu zařízení na podstavec a následné zafixování pomocí podtlaku. Do středu substrátu je nanesen roztok a poté je pomocí roztočení podstavce rovnoměrně rozprostřen po celé ploše substrátu. Navazujícím procesem může být žíhání, tj. zahřátí substrátu s naneseným materiálem na teplotu, při které dojde k rekrytalizaci jeho struktury. V našem experimentu byla využita elektrická plotýnka.



Obrázek 5.2 Princip rotačního nanášení

Stříbrné vrchní kontakty článku byly připraveny technologií napařování, jehož princip je popsán viz kapitola 1.3.2.

5.2 Postup

Příprava roztoků

Příprava vzorků perovskitových článků probíhala v několika dnech. Nejprve bylo třeba připravit roztoky pro použité vrstvy. První den byl připraven roztok PTAA, který byl přes noc míchán při pokojové teplotě. Dále byl připraven roztok perovskitu se složením $\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.6}\text{Br}_{0.4})_3$. Roztok byl míchán při 60 °C po dobu 1 hod a poté přes noc při pokojové teplotě. Dále byl připraven roztok PCBM a BCP. Další den byl roztok perovskitu zfiltrován přes stříkačkový filtr.

Příprava substrátů

Substrátem bylo sklo s komerčním nebo laboratorním ITO. Laboratorně připravená vrstva byla deponována při 50 W pod dobu 5 min v magnetronové naprašovačce. Substráty byly čištěny ultrazvukem v acetonové lázni po dobu 10 min, dále v izopropylalkoholu po dobu 10 min, poté ve demivodě a na závěr byly usušeny pomocí proudu dusíku. Těsně před provedením experimentu byly vzorky ošetřeny expozicí v UV-ozonu po dobu 15 min.

Průběh experimentu

Samotný experiment probíhal v uzavřeném dusíkovém rukavicovém boxu. Perovskitové články při kontaktu se vzduchem rychle degradují, proto bylo využito ochranné atmosféry. První deponovanou vrstvou bylo PTAA. Množství 75 μl bylo na substrát s ITO nanášeno rotačním nanášením při rychlosti 5 000 ot/min po dobu 30 s. Po dokončení byl vzorek žíhán při 100 °C 10 min. Zhotovená vrstva byla hydrofobní, proto bylo třeba nanést 50 μl DMF rychlostí 5 000 ot/min po dobu 30 s, a upravit tak hydrofilitu vrstvy. Ihned poté bylo na vzorek nanášeno 100 μl roztoku perovskitu rychlostí 1 000 ot/min po dobu 10 s následované plynulým přechodem na rychlost 5 000 ot/min po dobu 30 s. Vzorek byl poté žíhán při 100 °C po dobu 10 min. Další deponovanou vrstvou v pořadí bylo 100 μl PCBM při rychlosti rotačního nanášení 2 000 ot/min po dobu 30 s. Ihned poté následovala vrstva BCP v množství 60 μl s rychlostí nanášení 4 000 ot/min po dobu 30 s.

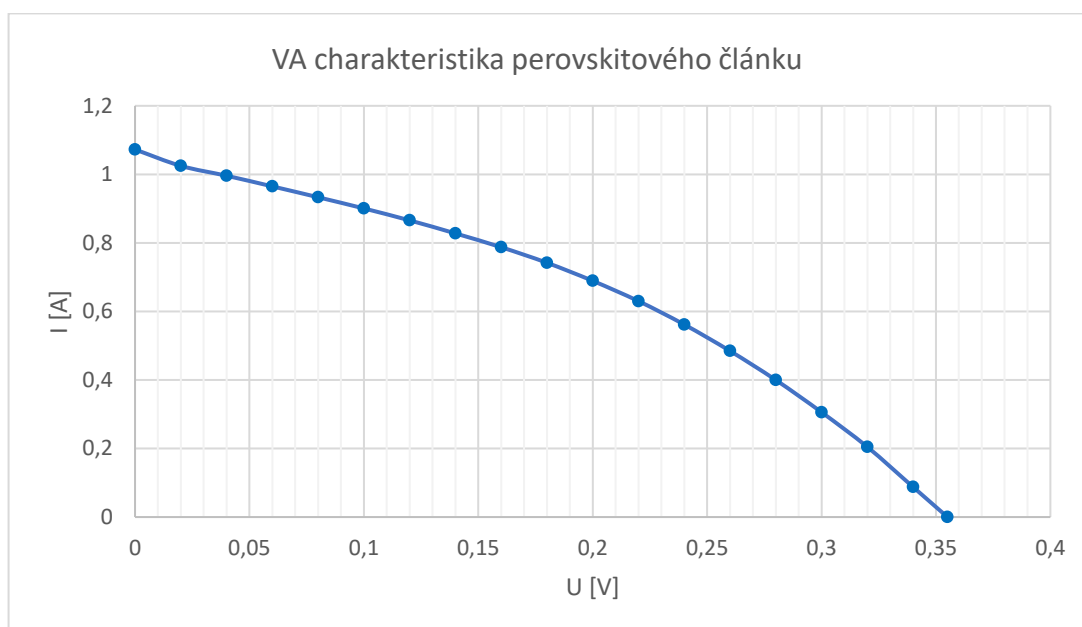
Posledním krokem při tvorbě článku je tvorba kontaktů. Kontakty se na článku zhotovují čtyři, z toho jsou tři umístěny na nanášených vrstvách a čtvrtý kontakt je umístěn na spodní vrstvě ITO, která je odhalena pomocí odstranění svrchních vrstev (seškrábání). Výsledný článek je znázorněn viz Obrázek 5.3.



Obrázek 5.3 Ukázka perovskitového článku

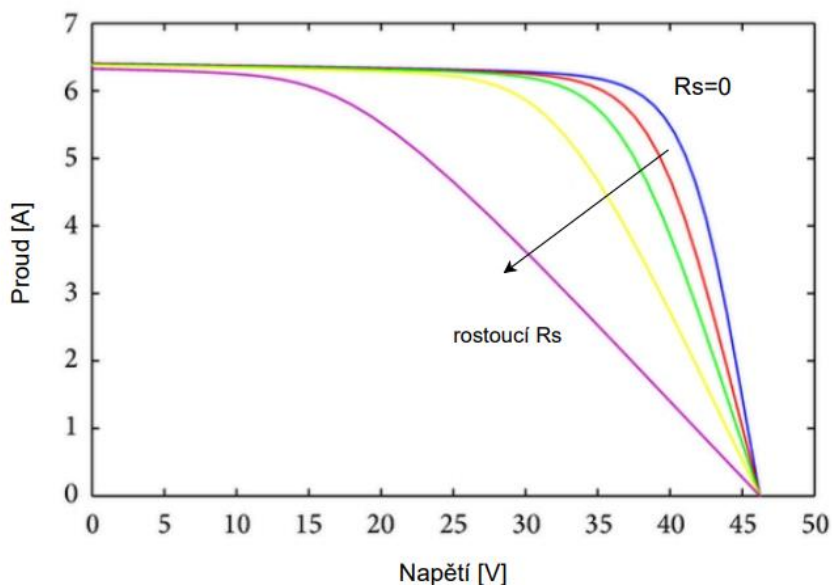
5.3 Naměřené hodnoty

U zhotovených vzorků bylo cílem naměřit VA charakteristiky. Po proměření vzorků s komerčním ITO vidíme, že charakteristika neodpovídá standardnímu průběhu charakteristiky FV článku (Graf 5.2). Napětí naprázdno článku bylo naměřeno $U_0 = 0,355$ V a proud nakrátko $I_{SC} = 1,07$ A.



Graf 5.1 Naměřená VA charakteristika

Tvar charakteristiky i parametry fotovoltaického článku budou pravděpodobně výrazně ovlivněny sériovým odporem. Z tohoto důvodu se naměřená charakteristika článků jeví více plochá. Sériový odpor článku může být složený z předního či zadního kontaktu kovu s polovodičem, odporu vrstvy typu N nebo odporu horního kontaktu. V našem případě se může jednat o velký odpor mezi vrstvou ITO a PTAA, neboť připravený roztok PTAA bylo nutné v procesu přípravy domíchat, protože jeho původní připravené množství nestačilo. Současně je vidět, že plocha kontaktů je v porovnání k celkové ploše článku poměrně velká, díky tomu je aktivní plocha článku menší. Charakteristiky pro články s laboratorně připraveným ITO se nezadařilo změřit. Možným důvodem by mohl být příliš velký odpor na čtverec připravené vrstvy ITO, což mohlo způsobit snížení vodivosti a ovlivnit tak funkčnost celého článku.



Graf 5.2 Vliv sériového odporu na FV články [19]

5.4 Shrnutí výsledků experimentální části

Optimální nastavení parametrů pro vytvoření vrstvy ITO o tloušťce 100-200 nm, což je tloušťka komerčně připraveného ITO, je výkon 50 W a čas depozice 5 min. Z naměřených hodnot je vidět výrazná závislost tloušťky vrstvy na výkonu a čase depozice. Další parametr, který by tloušťku vrstvy ovlivnil je vzdálenost substrátu a terče. Tento parametr nebyl v rámci experimentu testován.

Struktura vrstev vzorků připravovaných při vyšším výkonu není podle snímků tolik rovnoměrná, avšak splňuje lépe požadavky na tloušťku. Oproti tomu vrstvy připravené při nižším výkonu mají menší absorpční koeficient a zároveň i menší vodivost.

Celkově je možné shrnout studium přípravy vrstev transparentních vodivých oxidů jako poměrně obtížnou disciplínu, která vyžaduje dostatek času pro odladění parametrů experimentu, aby splnil požadovaná očekávání.

V druhé části experimentu jsme nebyli schopni změřit VA charakteristiky pro perovskitový článek na laboratorním ITO. Charakteristika pro využití komerčního ITO, které považujeme za stabilnější, vyšla plošší pravděpodobně vlivem velkého sériového odporu. Z experimentu je vidět, že připravované články zatím nejsou dostatečně stabilní, aby bylo možné vytvořit vysoce účinný článek.

EKONOMICKÁ ČÁST

6 Případová studie

V ekonomické části práce bude provedeno zhodnocení ekonomické efektivity technologií solárních článků. Porovnáme křemíkovou technologii s perspektivní tandemovou.

Porovnání technologií provedeme v rámci případové studie. Vezmeme v úvahu zájemce o pořízení fotovoltaické elektrárny (dále FVE) na rodinný dům, který porovnává různé typy technologií a na základě analýzy se rozhoduje, do které technologie investuje. V rámci analýzy bude schopen zájemce vyhodnotit, jestli bude z ekonomického hlediska výhodnější investovat do moderní tandemové technologie nebo setrvat u současné křemíkové.

První část kapitoly se zabývá metodikou a určením dat, která budou využita k analýze. Ve druhé části této kapitoly budou zavedeny předpoklady analýzy, bude proveden výpočet a citlivostní analýza.

6.1 Dlouhodobé měrné náklady LCOE

Pro porovnání technologií jsme zvolili ekonomický ukazatel LCOE (Levelised Cost of Energy). LCOE vyjadřuje údaj o jednotkových nákladech na výrobu elektrické energie z určitého energetického zdroje. Díky přepočtu na jednotkové množství (nejčastěji Kč na 1 MWh/kWh vyrobené energie) je tento ukazatel často využíváný pro porovnání jednotlivých technologií nebo zdrojů energie mezi sebou. V ukazateli je zahrnuta čistá současná hodnota celkových peněžních nákladů NPV_{CN} a čistá současná hodnota produkce elektrické energie za dobu životnosti investice NPV_W . Do celkových nákladů se promítnou náklady investiční, provozní i náklady na údržbu. [20] Pro výpočet v této práci nás budou zajímat celkové měrné náklady LCOE za dobu životnosti investice pro které využijeme vztah 6.1.

$$LCOE = \frac{NPV_{CN}}{NPV_W} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{W_t}{(1+r)^t}} \quad (6.1)$$

LCOE... měrné náklady na vyrobenou energii [Kč/MWh]

CAPEX... celkové investiční náklady v roce t [Kč]

OPEX... provozní náklady v roce t [Kč]

W... vyrobená elektřina v roce t [MWh]

r ... diskontní míra [%]

n ... doba životnosti

Pro provedení analýzy je třeba definovat a následně vyčíslit tyto položky.

Celkové investiční náklady

Případová studie se zabývá potenciální instalací FVE na rodinný dům, proto se do celkových investičních nákladů promítnou jednotlivé položky instalace FVE (viz Tabulka 6.1)

Provozní náklady

Jednou z největších výhod technologie FVE je její levná údržba a provoz. Do provozních nákladů FVE se promítnou náklady na povinnou revizi systému a náklady na obměnu používaných zařízení. Revize systému je dle normy ČSN 33 2000-7-712 ed.2, platné od roku 2016, povinná pro majitele FVE na rezidenčních objektech minimálně jednou za 2 roky.

Tabulka 6.1 Náklady FVE

Investiční náklady	FV moduly	Mechanická konstrukce na střeche
	Střídač	Přepět'ové ochrany
	Baterie	Bleskojistky
	BMS	Elektroměr
	Pomocný elektroinstalační materiál	Hlavní rozvaděč
	Odpojovače	Administrativa a realizace
	DC kabeláž	Výchozí revize
Provozní náklady	Periodická revize systému	Opravy
	Obměna zařízení	

Vyrobena elektrina

Celkové množství vyrobené elektriny se bude odvíjet od konkrétního počtu nainstalovaných fotovoltaických modulů, jejich výkonu, geografických a klimatických podmínek a systémových ztrát.

6.2 Předpoklady modelu

Pro výchozí výpočet modelu byly zvoleny předpoklady, popsány v následující části práce. Jako první předpoklad stanovíme, že tandemová technologie bude v době realizace investice již zavedena na trhu, což v tuto chvíli není. Na některé vybrané předpoklady bude provedena citlivostní analýza.

1. Inflace

Inflaci chápeme jako všeobecný růst cenové hladiny v čase. Protože se hodnota peněz se v čase mění, budou upraveny provozní náklady v průběhu let životnosti o faktor zdražení. Faktor zdražení volíme jako 2 %, což je dlouhodobý cíl ČNB pro udržení nízké a stabilní inflace. Ačkoli má inflace v posledních několika letech dynamický vývoj, budeme volit nižší hodnotu korespondující s cílem ČNB.

2. Diskont

Hodnota diskontu bude určena na základě modelu CAPM (Capital Asset Pricing Model), který je nástrojem používaným k oceňování kapitálových aktiv a udává vztah mezi očekávaným výnosem a rizikem investice do cenného papíru. Do výpočtu vstupuje bezrizikový výnos r_f , což je jistý výnos reprezentován např. státními dluhopisy ČNB. Dále očekávaný výnos kapitálového trhu r_m a beta koeficient β , který vyjadřuje měřítko systémového rizika. [21]

$$r_E = r_f + (r_m - r_f) \cdot \beta \quad (6.2)$$

Možnou variantou vzorce je vztah

$$r_E = r_f + RMP \cdot \beta \quad (6.3)$$

kde RMP (Risk Market Premium) je prémie za systematické tržní riziko, udávaná jako procento pro trh v dané zemi. [22]

Stanovení bezrizikového výnosu r_f

Bezrizikový výnos budeme volit jako investici do státních dluhopisů. Zvolíme investici s datem splatnosti co nejbližší životnosti naší investice. Volíme investici se splatností za 33 let a výnosem 4,49 % za dobu splatnosti. [23]

$$r_f = 4,49 \%$$

Stanovení koeficientu β

Koeficient β reprezentuje citlivost na změny tržního portfolia. Hodnoty koeficientu se liší pro různá odvětví. V našem případě využijeme hodnotu z odvětví Green & Renewable energy na evropském trhu. [22]

$$\beta = 0,53$$

RMP

Pro stanovení diskontu zbývá určit systematické tržní riziko RMP. Danou hodnotu vyhledáme pro trh v České republice. [22]

$$RMP = 5,48 \%$$

Po dosazení do vzorce 6.3 dostáváme hodnotu diskontu 7,56 %.

$$r_E = 4,49 + 5,48 \cdot 0,56 = 7,56 \%$$

3. Cena systému

Cena systému bude zahrnovat veškeré komponenty potřebné k instalaci FVE. Pro vyčíslení jednotlivých položek využijeme jak data z internetových obchodů v ČR, tak dostupný položkový rozpočet FVE z vlastních zdrojů. Cena systému kromě položky „Cena FV modulů“ bude pro obě technologie uvažována jako stejná.

4. Účinnost

Účinnost tandemových článků je jedním z klíčových parametrů, které významně ovlivní náš model. Pro výchozí výpočet budeme uvažovat účinnost tandemových článků 24 %. Tento parametr bude předmětem citlivostní analýzy. Pro články křemíkové je účinnost určena na základě rešerše 21,5 %.

5. Životnost

Předpokládaná doba životnosti celého systému pro obě technologie bude 25 let. Na tuto dobu většina výrobců fotovoltaických modulů udává záruku na výkon. Na základě výsledků studií se tandemová technologie neustále zlepšuje a v příštích letech by měla být konkurenceschopná z hlediska životnosti. Proto zavedeme stejnou dobu životnosti obou typů instalace jako výchozí předpoklad.

6. Počet použitých modulů

Na základě stanovení instalovaného výkonu pro řešený objekt bylo pro výpočet použito 18 modulů (výpočet viz Kapitola 6.3). Počet použitých modulů bude stejný pro obě porovnávané technologie.

7. Systémová ztráta

V modelu budeme uvažovat systémovou ztrátu 14 %. V této hodnotě jsou zahrnuty ztráty na vedení, v měničích, ztráty způsobené znečištěním panelů nebo sněhem.

6.3 Vstupní parametry modelu

V této části práce budou blíže definovány vstupní parametry případové studie. Řešený objekt je samostatně stojící rodinný dům nacházející se ve Středočeském kraji západně od Prahy v nadmořské výšce 436 m n.m. Střecha, na kterou budou umístěny FV moduly je orientována jihojihozápadně se sklonem 40° od vodorovné linie, není zastíněna sousedním objektem ani jinými součástmi střechy. Tento dům je použit jako pomocná entita pro srovnání obou technologií. Cílem práce není provést detailní analýzu spotřeby domu ani její optimalizaci, proto jsou některé výpočty zjednodušeny.

Cena křemíkového FV modulu

Volba vhodného modulu byla provedena na základě náhodného výběru z několika z internetových obchodů. Bylo vybráno 10 modulů se jmenovitým výkonem v rozmezí 420-450 Wp za STC (Standard Test Condition). Standardní testovací podmínky pro FV moduly jsou intenzita záření 1000 W/m², spektrum AM 1,5 a teplota panelu 25 °C. [24] Vybrané moduly byly zprůměrovány v parametrech – jmenovitý výkon, účinnost, rozměr a cena. Pro naši modelovou úlohu jsme zvolili fotovoltaický křemíkový modul se zprůměrovanými hodnotami viz Tabulka 6.2. (více v příloze BP)

Tabulka 6.2 Použitý Si modul

Křemíkový modul	Výkon [Wp]	Účinnost [%]	Plocha [m ²]	Cena za m ² [Kč/m ²]	Cena modulu [Kč]
	435	21,5	2	1 804	3 608

Cena a technické parametry tandemového FV modulu

Perovskitové moduly jsou zatím vyráběny v laboratorních podmínkách, proto byla jejich cena určena na základě zprůměrovaných hodnot z publikovaných studií. Cena tandemového modulu (P_{Tan}) byla vyjádřena jako součet ceny vybraného křemíkového (P_{Si}) a perovskitového modulu (P_{Per}) o ploše 1 m². Vybrané hodnoty byly dále přepočteny na plochu 2 m², účinnost článku byla stanovena na 24 % a jmenovitý výkon modulu na 480 Wp.

$$P_{Si} = 1\,803,9 \text{ Kč/m}^2$$

$$P_{Per} = 596,6 \text{ Kč/m}^2$$

$$P_{Tan} = 1\,803,9 + 596,6 = 2\,400,5 \text{ Kč/m}^2 \quad \text{Cena za 1 m}^2$$

$$P_{Tan} = 2 \cdot 2\,400 = 4\,801 \text{ Kč} \quad \text{Cena za 2 m}^2$$

Tabulka 6.3 Použitý tandemový modul

Tandemový modul	Výkon [Wp]	Účinnost [%]	Plocha [m ²]	Cena za m ² [Kč/m ²]	Cena modulu [Kč]
	480	24	2	2 400,5	4 801

Výpočet instalovaného výkonu pomocí PVGIS

Roční spotřeba elektřiny (E_{RS}) řešeného objektu se pohybuje mezi 7–8 MWh. Budeme volit vyšší hodnotu spotřeby tedy 8 MWh, neboť je elektřina používána i k vytápění. Průměrný výkon křemíkového fotovoltaického modulu byl stanoven na 435 Wp. Vhodný počet křemíkových fotovoltaických modulů bude určen dle následujícího postupu.

Zadáním geografické polohy řešeného objektu do programu PVGIS byly získány následující hodnoty. Z instalovaného výkonu 1 kWp je hodnota roční produkce elektřiny $E_r = 1\,031,26$ kWh v dané lokalitě. Výpočet instalovaného výkonu (P_{inst}) dle [25] bude pro zjednodušení proveden takto:

$$P_{inst} = \frac{E_{RS}}{E_r} \quad (6.4)$$

$$P_{inst} = \frac{8\,000}{1\,031,26} = 7,76 \doteq 7,8 \text{ kWp}$$

Počet potřebných modulů bude vypočten jako poměr instalovaného výkonu a výkonu zvoleného modulu. Výsledný počet n_{Si} zaokrouhlíme nahoru.

$$n_{Si} = \frac{7\,800}{435} = 17,93 \doteq 18$$

Množství vyrobené energie

Na základě předchozích výpočtů byly stanoveny potřebné veličiny pro výpočet vyrobené energie. Stanovíme hodnotu vyrobené energie W_{Si} , kterou systém vyrobí za rok. Vyjdeme z předpokladu, že 1 instalovaný kWp vyrobí přibližně $E_r = 1\,031$ kWh energie, počet instalovaných panelů $n_{Si} = 18$, jmenovitý výkon panelu je 435 W, budeme uvažovat systémovou ztrátu 14 %, takže koeficient reálné výroby k bude 0,86. Výpočet pro tandemové moduly viz příložený excel.

$$W_{Si} = P_n \cdot E_r \cdot n \cdot k \quad (6.5)$$

$$W_{Si} = 0,435 \cdot 1\,031 \cdot 18 \cdot 0,86 = 6\,942 \text{ kWh}$$

Cena systému

Cena systému je vyčíslena v následující tabulce. Vyčíslení bylo provedeno pro obě varianty identicky, jediná proměnlivá položka je cena FV modulů. Detailní rozepsání jednotlivých položek instalace viz příložený excel.

Tabulka 6.4 Cena FVE

Položky	Křemíkové moduly		Tandemové moduly	
	Cena bez DPH [Kč]	Cena s DPH [Kč]	Cena bez DPH [Kč]	Cena s DPH [Kč]
FV moduly	53 670	60 110	71 420	79 990
Instalace modulů	56 000	62 720	56 000	62 720
Střídač a baterie	130 000	145 600	130 000	145 600
DC vedení a ochrany	30 000	33 600	30 000	33 600
AC elektro	75 000	84 000	75 000	84 000
Administrativní náklady	20 000	22 400	20 000	22 400
Celková cena	364 670	408 430	382 420	428 310
Cena s DPH 12 %	408 430		428 310	

Provozní náklady

Cena revize se pohybuje kolem 4 000 Kč pro elektrárny s výkonem v rozmezí 5-10 kWp, kam spadá většina FVE instalovaných na rodinných domech. Do provozních nákladů budou započteny náklady na výměnu baterie, střídače a BMS, neboť výrobci udávají životnost 10-15 let, což je kratší doba, než je předpokladem stanovená životnost investice.

6.4 Výsledky

V předchozí kapitole byly vypočteny nebo stanoveny veškeré potřebné vstupy pro analýzu LCOE. Postup výpočtu je podrobně uveden v příloženém excelu. Po provedení analýzy jsme dospěli k následujícím výsledkům.

Tabulka 6.5 Výsledky analýzy LCOE na základě stanovených předpokladů

LCOE Si [Kč/kWh]	LCOE Tandem [Kč/kWh]
3,01	2,84

Pro stanovené předpoklady vyšly měrné náklady na elektřinu po dobu životnosti instalace nižší pro tandemový modul. Znamená to tedy, že za stanovených předpokladů zájemci o pořízení FVE doporučíme investici do moderní tandemové technologie, protože náklady jsou nižší než na křemíkové moduly.

Výrazný vliv na hodnotu LCOE má systémová ztráta. Pokud bychom uvažovali, že panely využijí svůj maximální potenciál a ztráta bude 0 %, snížili by se hodnoty LCOE viz Tabulka 6.6. Podle studie [26] se hodnota LCOE pro malou FVE v Německu, které má srovnatelné podmínky s našim případem, pohybuje v přepočtu kolem 2,78 Kč/kWh, což by odpovídalo ztrátě 7 % v našem modelu.

Tabulka 6.6 Výsledky analýzy LCOE při 0 % systémové ztrátě

LCOE Si [Kč/kWh]	LCOE Tandem [Kč/kWh]
2,59	2,44

V našem modelu je cena tandemových modulů vyšší než cena křemíkových. Vzhledem k použitému ukazateli LCOE vstupuje do výpočtu nejen cena instalace včetně provozních nákladů, ale i množství vyrobené energie po dobu životnosti instalace. Díky vyšší účinnosti tandemových článků je konverze slunečního záření na elektrickou energii lepší, tedy je produkováno větší množství energie.

Jedním z klíčových řešených parametrů našeho modelu je nastavení správného poměru mezi cenou a účinností článku. Vliv změny těchto parametrů na výsledky analýzy budou rozebrány v rámci citlivostní analýzy v následující kapitole.

6.5 Citlivostní analýza

Dále byla provedena citlivostní analýza. Cílem bylo zjistit, jak se změní měrné dlouhodobé náklady LCOE, pokud by došlo ke změně parametrů pořizovací náklady a účinnost tandemové článku. Po provedení citlivostní analýzy jsme došli k následujícím výsledkům.

Tabulka 6.7 Vliv zvýšení účinnosti článků

Vliv zvýšení účinnosti tandemových článků na LCOE	
Účinnost [%]	LCOE [Kč/kWh]
24	2,84
28	2,44
30	2,27

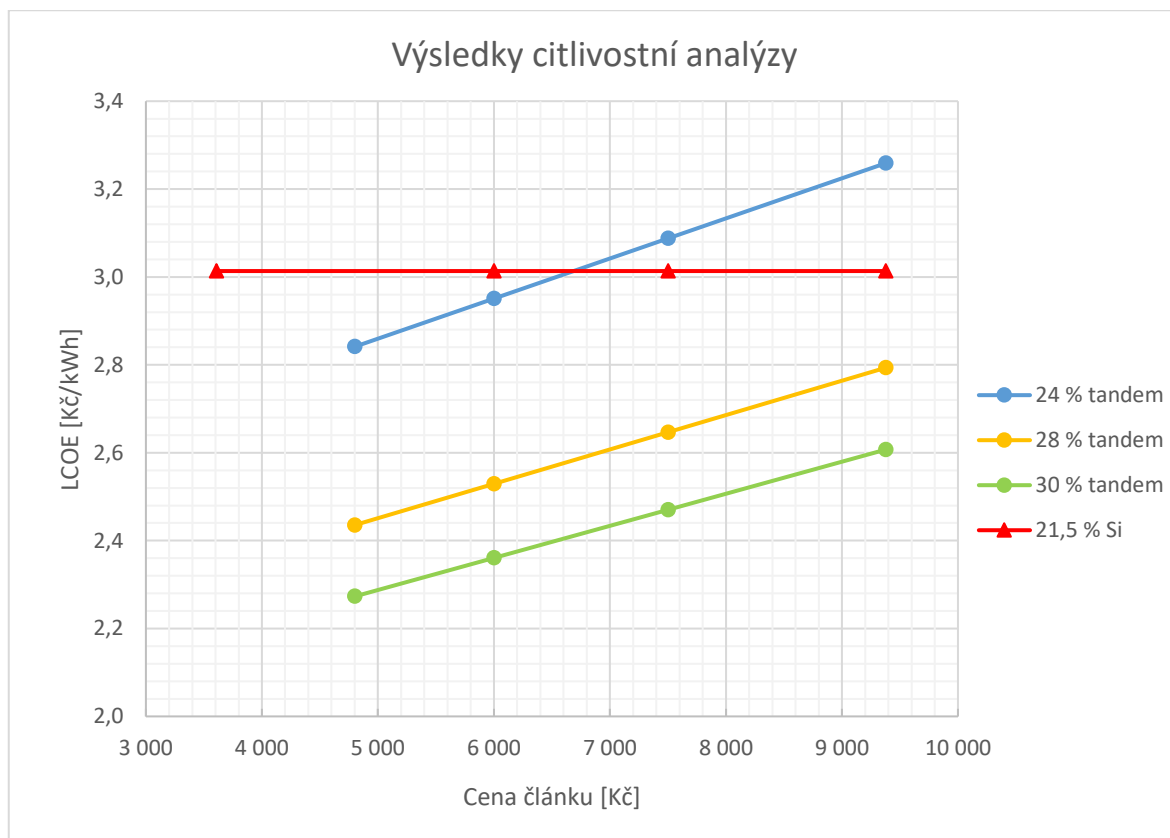
Pro cenu tandemového článku zavedenou v předpokladech by zvýšení účinnosti znamenalo výrazné snížení nákladů na vyrobenou energii. Výzkumy tandemových článků predikují dosažení účinnosti 30 % a zároveň srovnatelnou délku životnosti s křemíkovými moduly v nejbližších letech. Tandemová technologie by díky využívaným materiálům a technologickým postupům neměla být výrobně tolik náročná. Studie udávají odhad hodnoty LCOE kolem 1,3 Kč/kWh pro články s účinností 30 % a životností 30 let. [27]

Dalším zkoumaným parametrem byl vývoj ceny článků. Byly analyzovány zvýšení ceny tandemových článků o 25, 50 a 100 % a jeho vliv na LCOE. Při zvýšení ceny o 50 % by se LCOE tandemových článků dostal na vyšší hodnotu než LCOE pro článek křemíkový. Taková situace by mohla velmi pravděpodobně nastat, protože technologie zatím na trhu není zavedena a uvažované hodnoty jsou založeny na hodnotách z experimentálních studií, které se vzájemně často liší.

Tabulka 6.8 Vliv nárůstu ceny článků

Vliv nárůstu ceny tandemových článků na LCOE			
Účinnost [%]	Nárůst [%]	Cena [Kč]	LCOE [Kč/kWh]
24	25	6 001,26	2,95
	50	7 501,58	3,09
	100	9 376,97	3,26

Mezi další parametr, který by mohl být předmětem zkoumání citlivostní analýzy je diskont. Dále by mohl výrazně ovlivnit ceny komponentů vývoj inflace. Výraznou finanční úsporou by bylo využití dotace na FVE, např. v rámci dotačního programu Nová zelená úsporám Ministerstva životního prostředí.



Graf 6.1 Výsledky citlivostní analýzy

Tento graf shrnuje výsledky citlivostní analýzy, která zkoumala vliv zvýšení účinnosti tandemových článků při zachování konstantní ceny a dále vliv nárůstu ceny článku při zachování stanovené účinnosti. Oba tyto vlivy jsou vztaženy ke zkoumanému parametru LCOE. Křemíkové moduly, které jsou v grafu reprezentovány červenou křivkou, mají neměnnou účinnost 21,5 % a hodnotu LCOE = 3 Kč/kWh. Z grafu vidíme, že pokud by se účinnost tandemových článků pohybovala nad 28 % tak náklady na vyrobenou energii budou podstatně nižší než pro křemíkové moduly, a to i v případě dvojnásobného nárůstu ceny tandemů.

Situace, kdy by vycházely křemíkové moduly jako výhodnější a levnější technologie, by nastala pro cenu tandemového článku vyšší než 6 700 Kč. Tato cena je dána průsečíkem křivek v grafu.

6.6 Diskuze

Výsledkem případové studie za stanovených předpokladů byla nižší hodnota LCOE pro tandemové moduly než pro křemíkové. V dnešní době tato technologie není zavedena na trhu a je proto obtížné stanovit vhodný poměr ceny a účinnosti. Podle predikcí má technologie potenciál do budoucna, dokonce se píše o tzv. low cost technologii, díky nízké ceně komponentů výroby perovskitových článků. V současnosti je jedním z limitů technologie její poměrně rychlá míra degradace vlivem kontaktu s vodou, vzduchem a dále působením UV záření.

Výsledky případové studie mohou být ovlivněny sledem událostí posledních několika let na trhu s energiemi a solárními technologiemi. Počátkem roku 2022 Evropa zaznamenala výrazný nárůst cen energií, zapříčiněné krizí po pandemii Covid-19 a snížením dodávek ropy a plynu od dosavadního hlavního dodavatele – Ruska. Současně začala válka na Ukrajině, která ještě více podnítila výkyvy na trhu s energiemi. Lidé jako důsledek začali mít větší zájem o úspornější řešení pro jejich domácnosti. Byl zájem o instalace tepelných čerpadel, FVE a instalační firmy nebyly schopny na zvýšení poptávky zareagovat včas. Čekací lhůty byly dlouhé a zboží bylo málo. V tomto období nejrychleji zareagovaly čínské továrny a během krátkého časového horizontu výrazně navýšily výrobní kapacity. Distributoři se zásobili tímto zbožím, neboť předpokládali stejný nárůst poptávky i nadále. Taková situace ovšem nenastala, naopak se situace na trhu s energiemi v roce 2023 výrazně uklidnila, poptávka po FVE stagnovala a distributoři měli a stále mají plné sklady zboží. Toto je příčina současných velmi nízkých cen solárních modulů, baterií, střídačů a dalších komponentů FVE, protože se distributoři snaží doprodat zboží za ceny, které jsou často pod cenou nákupní. [28] [29]

Solární technologie jsou zejména v posledních letech velice dynamické odvětví. Podle predikcí FV velkoobchodů v ČR by se situace na trhu měla stabilizovat během letošního roku. Na základě dění ve světě je očekáván nárůst cen komponentů pro koncové uživatele kvůli dražší dopravě zboží z Asie. [29]

7 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala novými technologiemi ve výrobě solárních článků, zejména využití perovskitových materiálů a tandemových struktur kombinujících křemík a perovskit. V teoretické části práce byly popsány základní principy a struktury solárních článků, včetně technologií tenkovrstvých depozic. Experimentální část práce byla zaměřena na přípravu transparentních vodivých oxidů (ITO) pomocí magnetronového naprašování, přičemž byly analyzovány parametry a kvalita vytvořených vrstev. Ekonomická část práce vyhodnocovala vhodnost použití tandemové a konvenční křemíkové technologie na základě vyhodnocení ukazatele LCOE a citlivostní analýzy.

Z naměřených výsledků vyplynulo, že optimální podmínky pro depozici ITO, které splňují požadovanou kvalitu a tloušťku vrstvy (100-200 nm), jsou výkon 50 W a čas depozice 5 minut. Dále bylo zjištěno, že vyšší výkon depozice zvyšuje tloušťku vrstvy, ale zároveň může ovlivnit rovnoměrnost její struktury. Vytvořené vrstvy byly dále použity pro přípravu perovskitových solárních článků.

Ekonomická analýza ukázala, že technologie tandemových solárních modulů má potenciál do budoucna snížit dlouhodobé měrné náklady na elektřinu (LCOE) ve srovnání s konvenčními křemíkovými moduly. Citlivostní analýza zkoumala vliv ceny a účinnosti článku na sledovaný ukazatel LCOE. Výsledkem bylo stanovení zlomové ceny, tj. cena do které jsou výhodnější tandemové moduly než křemíkové, na 6 700 Kč za modul o ploše 2 m². Zároveň byl diskutován širší kontext současného vývoje cen komponentů FVE v Evropě.

Poznatky vycházející z této práce mohou být dále využity v rámci dalšího výzkumu na katedře elektrotechnologie a zároveň poskytují náhled do situace případného zavedení tandemových solárních modulů na trh.

Solární technologie jsou perspektivní varianta pro budoucnost, protože nabízejí čistou, obnovitelnou a široce dostupnou energii. Výzkum nových technologií v této oblasti může pomoci zvýšit jejich účinnost a snížit náklady, což by mohlo přispět k větší udržitelnosti a energetické efektivitě. Proto je technologický výzkum i ekonomická analýza nových možností v této oblasti velmi podstatná.

8 Použitá literatura

- [1] MACH, Pavel. *Tenké vrstvy: Prezentace k předmětu Technologické procesy pro elektrotechniku*. [Prezentováno březen 2023]. 2015.
- [2] ECKERTOVIČ, Ludmila. *Fyzika tenkých vrstev*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1973.
- [3] MACH, Pavel. *Napařování tenkých vrstev: Prezentace k předmětu Technologické procesy pro elektrotechniku*. [Prezentováno březen 2023].
- [4] WASA, Kiyotaka. *Thin film materials technology: sputtering of compound materials*. Norwich: Andrew, 2004. ISBN 08-155-1483-2.
- [5] SATO, Mitsunobu. *Lithium-ion Batteries - Thin Film for Energy Materials and Devices*. 2020. ISBN 978-1-78985-463-3.
- [6] MUDRUŇKOVÁ, Anna. *Elektrotechnické materiály I*. [online]. 2016. VOŠ a SPŠ elektrotechnická Františka Křižíka [cit. 2024-01-07]. ISBN 978-80-88058-90-8.
- [7] REDDY, P. Jayarama. *Science and Technology of Photovoltaics*. 2. Book Syndicate, 2009. ISBN 0415573637.
- [8] Perovskites and Perovskite Solar Cells: An Introduction. In: *Ossila enabling science* [online]. [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/perovskites-and-perovskite-solar-cells-an-introduction>
- [9] Perovskite Materials. In: *Scholarly Community Encyclopedia* [online]. [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://encyclopedia.pub/entry/228>
- [10] Electron Transport Layer. In: *Scholarly Community Encyclopedia* [online]. [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://encyclopedia.pub/entry/42834>
- [11] Hole-Transporting Layer in Perovskite Solar Cells. In: *Scholarly Community Encyclopedia* [online]. [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://encyclopedia.pub/entry/25954>

- [12] FORTUNATO, Elvira, David GINLEY, David C. PAINE a Hideo HOSONO. Transparent Conducting Oxides for Photovoltaics. *MRS Bulletin* [online]. **32**, 242-247 [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1557/mrs2007.29>
- [13] World Record Smashed in Major Breakthrough for Solar Panel Efficiency. In: *The Renewable Energy Institute* [online]. 2024 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.renewableinstitute.org/world-record-smashed-in-major-breakthrough-for-solar-panel-efficiency/>
- [14] HONSBURG, C.B. a S.G. BOWDEN. *Photovoltaics Education Website* [online]. 2019 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/>
- [15] *Laboratorní průvodce - informace pro oblast laboratorní praxe* [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://www.labo.cz/mft/rad_pasma.htm
- [16] BENEŠOVÁ, H. a J. ŠKORPIL. Tandemové fotovoltaické články – jeden ze směrů výzkumu a vývoje v oblasti fotovoltaiky III. generace. *ElectrOscope* [online]. Plzeň, 2012, **2012**(), 1-6 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/12209974-Tandemove-fotovoltaicke-clanky-jeden-ze-smeru-vyzkumu-a-vyvoje-v-oblasti-fotovoltaiky-iii-generace-h-benesova-1-j-skorpil-1-1.html>
- [17] WOOLLAM, J.A. J.A. WOOLLAM CO. *Ellipsometry tutorial* [online]. [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://www.jawoollam.com/>
- [18] HONSBURG, Christiana a Stuart BOWDEN. *A collection of resources for the photovoltaic educator: Absorption Coefficient* [online]. 2019 [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/>
- [19] PARISI, Antonino, Luciano CURCIO, Vincenzo ROCCA a Salvatore STIVALA. Thin Film CIGS Solar Cells, Photovoltaic Modules, and the Problems of Modeling. *International Journal for Photoenergy* [online]. 2013, **2013**, 1 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2013/817424/>
- [20] SHORT, Walter, Daniel J. PACKKEY a Thomas HOLT. *A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies*. National Renewable Energy Laboratory, 1995.
- [21] STARÝ, Oldřich. *Diskont, zadlužení a WACC*. Presentováno: [Základy finančního managementu, duben 2024, Praha]. 2024.

- [22] DAMODARAN, Aswath. *Damodaran online* [online]. 2008 [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/>
- [23] *Patria.cz* [online]. 1997, 2024 [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.patria.cz/>
- [24] *TZB info* [online]. 2001 [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/>
- [25] MUJGOŠ, Michal. Jaký výkon a kolik solárních panelů potřebuji?. In: *Evolty* [online]. 2022, 2023 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://evolty.cz/solarni-panely/kolik-solarnich-panelu/>
- [26] KOST, Christoph. *Levelized Cost of Electricity- Renewable Energy Technologies*. Freiburg, 2021. Studie. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
- [27] LI, Zongqi, Yingzhi ZHAO, Xi WANG a Yuchao SUN. Cost Analysis of Perovskite Tandem Photovoltaics. *Joule* [online]. 2018, 2(8), 1559-1572 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435118301910?via%3Dihub>
- [28] POTOČNÁ, Klára. V Evropě se hromadí čínské fotovoltaické panely. Jejich hodnota přesahuje 180 miliard korun. *Solární magazín* [online]. 2024, 1 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://solarnimagazin.cz/v-evrope-se-hromadi-cinske-fotovoltaicke-panely-jejich-hodnota-presahuje-180-miliard-korun/>
- [29] Čeká nás ještě zlevňování solárních panelů nebo půjdou ceny naopak nahoru?. In: *Solární novinky.cz* [online]. 2009, 2024 [cit. 2024-05-18]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/ceka-nas-jeste-zlevnovani-solarnich-panelu-nebo-pujdou-ceny-naopak-nahoru/>

Seznam příloh

Excel experimentální část

Excel ekonomická část

Cenová nabídka FVE

Výstup PVGIS

Nabídka na fotovoltaickou elektrárnu (FVE)

Zákazník: XY

Adresa instalace: XY

Naše nabídka je připravena „na klíč“, zahrnuje tedy vše potřebné od instalace po připojení k distribuční soustavě (DS) a vyřízení dotace programu Nová zelená úsporám Ministerstva životního prostředí administrovaného Státním fondem životního prostředí ČR, který patří k nejefektivnějším programům v České republice zaměřeným na úspory energií v rodinných a bytových domech.

nová

zelená

úsporám

Parametry elektrárny

Výkon panelů	16,2	kWp
Kapacita baterie	21,3	kWh

Oblast	Obsahuje	Počet	Cena (Kč bez DPH)
Fotovoltaické panely	FVE panely Phono Solar 450	36	222 300 Kč
	Instalační materiál na střechu	36	
	Instalace panelů	36	
	Tigo TS4-A-O - optimizér a požární odpojovač panelů	36	
	DC kabeláž ke střídačům	1	
Střídač a baterie	Střídač Goodwe 8KN-ET	2	141 250 Kč
	Baterie Dyness Tower	1	
	Datalogger a měření	1	
	FVE rozvaděče a jištění pro střídač	1	
	Pomocný elektroinstalační materiál	1	
DC vedení a ochrany	Bleskojistky Saltec T1+T2	4	39 719 Kč
	DC kabeláž ke střídačům, zemění a pomocný materiál	1	
Elektro AC	Instalace střídače	1	145 981 Kč
	Instalace AC ochran	1	
	Instalace ER pro přímé měření	1	
	Hlavní rozvaděč AC pro FVE	1	
	Pomocný materiál, kabeláž a podružné rozvaděče	1	
	Úprava hromosvodu	0	
	Požárně-bezpečnostní řešení	1	30 750 Kč

Administrativa a vedlejší realizační náklady	Elektroprojekt	1	
	Elektrorevize	1	
	Administrace s distributorem	1	
	Průvodní dokumentace dle zákona č. 250/2021 Sb. pro vyhrazená technická zařízení	1	
	Statický posudek	0	
CELKEM Kč bez DPH			580 000 Kč

Cena

Celková cena vč. 12% DPH	580 000 Kč
Dotace NZÚ	200 000 Kč
Cena po dotaci NZÚ	280 000 Kč

Performance of grid-connected PV

PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

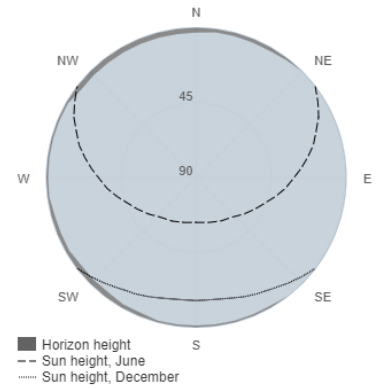
Provided inputs:

Latitude/Longitude: 50.100,14.090
 Horizon: Calculated
 Database used: PVGIS-SARAH2
 PV technology: Crystalline silicon
 PV installed: 1 kWp
 System loss: 14 %

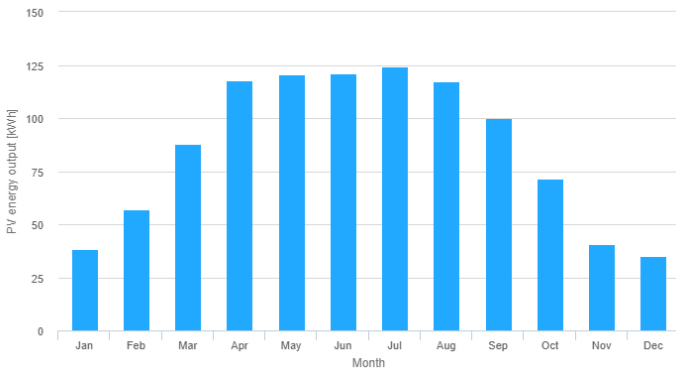
Simulation outputs

Slope angle: 38 (opt) °
 Azimuth angle: 0 °
 Yearly PV energy production: 1031.26 kWh
 Yearly in-plane irradiation: 1337.92 kWh/m²
 Year-to-year variability: 51.68 kWh
 Changes in output due to:
 Angle of incidence: -3.02 %
 Spectral effects: 1.75 %
 Temperature and low irradiance: -9.17 %
 Total loss: -22.92 %

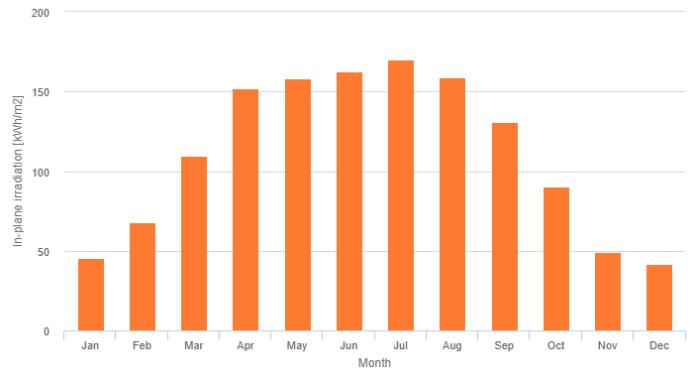
Outline of horizon at chosen location:



Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



Monthly PV energy and solar irradiation

Month	E_m	H(i)_m	SD_m
January	38.3	45.2	8.2
February	57.2	68.0	13.0
March	87.9	109.7	15.4
April	117.6	152.2	19.1
May	120.8	158.3	15.9
June	121.0	162.7	10.3
July	124.3	169.9	11.1
August	117.2	159.0	11.2
September	99.9	131.0	12.6
October	71.5	90.5	15.2
November	40.5	49.4	7.3
December	35.1	41.9	6.1

E_m: Average monthly electricity production from the defined system [kWh].

H(i)_m: Average monthly sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system [kWh/m²].

SD_m: Standard deviation of the monthly electricity production due to year-to-year variation [kWh].