

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**MARTIN
ŠVESTKA**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Švestka** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **501325**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Inovativní fotovoltaické technologie - perovskitové, „dye sensitized“, a průhledné články

Název bakalářské práce anglicky:

Innovative photovoltaic technologies - perovskites, dye sensitized and transparent cells

Pokyny pro vypracování:

Práce se bude zaměřovat na vybrané inovativní fotovoltaické technologie. Obsahem bude:

- Rešerše technologií fotovoltaických článků z hlediska fyzikálních principů, účinnosti, životnosti, (výhledu) ceny, metod výroby. Zhodnocení možností nasazení. Zhodnocení možností masové výroby v prostředí EU (hlavně z hlediska dostupnosti surovin).
- Výběr vhodných typů článků pro laboratorní experimentální ověření. Příprava experimentu (výrobní postup, potřebné suroviny, vybavení).
- Laboratorní výroba vybraných článků. Experimentální analýza dosažených parametrů.
- Závěrečná shrnutí a doporučení.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Václav Novotný, Ph.D. ústav energetiky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.06.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

Ing. Václav Novotný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Inovativní fotovoltaické technologie – perovskitové, „dye sensitized“, a průhledné články“ vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a odborných konzultací.

V Praze dne

.....

Martin Švestka

Anotační list

Jméno autora:	Martin Švestka
Název BP:	Inovativní fotovoltaické technologie – perovskitové, „dye sensitized“, a průhledné články
Anglický název:	Innovative photovoltaic technologies – perovskites, dye sensitized and transparent cells
Akademický rok:	2022/2023
Studijní obor:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	Ing. Václav Novotný, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: - 64 Počet obrázků: - 31 Počet tabulek: - 8 Počet příloh: - 2
Klíčová slova:	Solární článek, perovskit, barvivo, průhlednost, účinnost, stabilita
Keywords:	Solar cell, perovskit, dye, transparency, efficiency, stability
Abstrakt:	<p>Tato bakalářská práce se věnuje inovativním fotovoltaickým technologiím 3. generace, jmenovitě perovskitovým, dye sensitized a průhledným solárním článkům. V práci jsou popsány základní fyzikální principy fungování, účinnost, životnost, výhledová cena a metody výroby. Dále bylo provedeno zhodnocení možnosti masové výroby v Evropské unii.</p> <p>V rámci praktické části bakalářské práce byla provedena experimentální výroba vybraných solárních článků, u kterých byla provedena následně experimentální analýza dosažených parametrů.</p>
Abstrakt:	<p>This bachelor thesis is devoted to innovative 3rd generation photovoltaics, namely perovskite, dye sensitized and transparent solar cells. The thesis describes the basic physical principles of operation, efficiency, lifetime, future price and fabrication methods. Furthermore, an evaluation of the possibility of mass production in the European Union was carried out.</p> <p>As part of the practical part of the bachelor thesis, an experimental production of selected solar cells was carried out, for which an experimental analysis of the achieved parameters was carried out.</p>

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Václavu Novotnému, Ph.D. za odborné vedení a cenné poznámky a rady ke zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat Fyzikálnímu ústavu A.V., jmenovitě Ing. Karlu Hruškovi, za poskytnutí prostor a odborné pomoci při výrobě solárních článků.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Perovskitové solární články	10
2.1. Historie.....	10
2.2. Perovskitové materiály	11
2.3. Princip technologie	12
2.3.1. Rovinné rozložení	13
2.3.2. Tandemové rozložení	13
2.3.3. Mezoporézní struktura.....	14
2.4. Aktuální stav technologie	14
2.4.1. Stabilita.....	14
2.4.2. Účinnost	15
2.5. Předpokládaná cena PSCs.....	15
2.6. Komerční využití	16
3. Dye sensitized solární panely	18
3.1. Historie.....	18
3.2. Princip technologie	19
3.3. Aktuální stav technologie	20
3.3.1. Stabilita.....	20
3.3.2. Účinnost	20
3.4. Barviva.....	21
3.4.1. Anorganická barviva	21
3.4.2. Organická barviva	21
3.4.3. Přírodní barviva.....	21
3.5. Perspektiva.....	21
3.6. Překážky pro nasazení	22
3.7. Komerční využití	22
4. Průhledné solární panely	24
4.1. Tenkovrstvé fotovoltaiky	24
4.2. Solární článek s luminiscentním solárním kolektorem.....	25
4.3. Částečně průsvitné solární panely.....	26
4.4. Překážky pro uvedení na trh	26
5. Výroba solárních článků.....	28
5.1. Laboratorní výroba PSCs – Spin coating.....	28

5.2.	Průmyslová výroba solárních článků	28
5.2.1.	Inkjet printing	29
5.2.1.	Blade coating	30
5.2.1.	Slot-die coating	30
5.2.2.	Spray coating	31
6.	Testování vlastností solárních článků	32
6.1.	Testování účinnosti solárních článků	32
6.2.	Testování životnosti solárních článků	33
7.	Zhodnocení možnosti masové výroby inovativních solárních článků článků v EU	34
8.	Experimentální výroba solárních článků	36
8.1.	Úvod do praktické části	36
8.2.	Vybavení laboratoře	36
8.3.	Nákup chemikálií a materiálů	37
8.4.	Bezpečnost práce	38
9.	Experimentální výroba PSC	39
9.1.	Příprava FTO skla	39
9.2.	Příprava roztoků	40
9.3.	Nanášení vrstev – Spin coating	41
10.	Experimentální výroba DSSCs	42
10.1.	Příprava barviv	42
10.2.	Nanášení vrstev metodou spin coating	43
10.3.	Nanášení vrstev metodou blade coating	44
11.	Experimentální testování solárních článků	45
11.1.	Měření účinnosti solárních článků	48
12.	Výsledky testování a diskuse	50
13.	Závěr	53
	Seznam příloh	54
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek	56
	Použitá literatura	57
	Příloha 1: Manuál pro výrobu PSCs	60
	Příloha 2: Manuál pro výrobu DSSCs	63

Seznam zkratek

PSCs	Perovskitové solární články (perovskite solar cells)
TCO	Transparentní vodivý oxid (transparent conducting metal oxid)
FTO	Oxid cíničitý dopovaný fluorem (Fluorine-doped Tin Oxide)
ITO-PET	Polyethylentetrefalátový film potažený oxidem india a cínu
ETL	Elektronová transportní vrstva (electron transport layer)
HTL	Děrové transportní vrstva (hole transport layer)
TSCs	Tandemové solární články (tandem solar cells)
DSSCs	Barvivem sensibilizované solární články (dye sensitized solar cels)
NIR	Blízko infračervené (near-infrared)
TPVs	Průhledné solární panely (transparent solar phtovoltaic)
LSC	Luminiscentní solární kolektor (luminescent solar concentrator).
TFPVs	Tenkovrstvé solární články (thin film photovoltaics)
OPE	Optický výkon (optical power efficiency)
VA	Voltampérová
UV	Ultra fialové

Seznam symbolů

I_{SC}	[A]	Zkratový proud
V_{OC}	[V]	Napětí naprázdno
FF	[%]	Faktor plnění
V_{MP}	[V]	Maximální odebírané napětí
I_{MP}	[I]	Maximální odebíraný proud
P_{out}	[W]	Vstupní výkon
P_{in}	[W]	Výstupní výkon
η	[%]	Účinnost přeměny energie

1. Úvod

Se stále se zvyšující se spotřebou elektrické energie, která se za posledních 30 let zvedla z 12 222,7 TWh na 28 466,3 TWh, a snižujícími se zásobami fosilních paliv, se odhaduje, že při současné spotřebě máme zásoby ropy na 40 let, plynu na 60 let a uhlí na 200 let. Je stále více patrné, že je třeba více využívat obnovitelné zdroje energie. Přejít na čistou energii je též stále více zmiňován v souvislosti s globálně rostoucí uhlíkovou stopou lidstva, která má negativní vliv na klimatické změny. Třetím aspektem pro nutnost náhrady fosilních paliv v energetice je dosažení energetické nezávislosti na mimoevropských státech. Po událostech z jara minulého roku je patrné, že není dobré být v takhle strategickém a klíčovém odvětví ekonomiky závislí na ostatních státech. [1, 2]

Čím dál tím více světových států včetně České republiky si tento fakt uvědomuje a podniká kroky k nahrazení fosilní energetiky energetikou obnovitelnou. Evropská unie si stanovila cíl využívat do roku 2030 alespoň 27 % elektrické energie z obnovitelných zdrojů.[2]

Významné zastoupení v této transformaci budou mít bezpochyby solární elektrárny, které mají oproti ostatním obnovitelným zdrojům výhodu v tom, že je lze umístit téměř kdekoli. Pro výstavbu větrné elektrárny je třeba, aby rychlost větru dosahovala alespoň 3,5 m/s, pro výstavbu vodních elektráren je zase potřeba vhodná lokalita u vodního toku, avšak ve vyspělých částech světa je již většinou v těchto lokalitách elektrárna vystavěna.

V posledním roce pozorujeme zvyšující se poptávku po solárních panelech, které jsou v současné době z 90 % vyráběny z křemíkových polovodičů, které mají jednu velkou nevýhodu: cenu. Výroba křemíkových solárních panelů je velmi energeticky náročná, k jejich výrobě je třeba křemíku, jehož čistota přesahuje 99,99 %.

V této bakalářské práci jsou popsány tři inovativní fotovoltaické technologie, jež mají perspektivu konkurovat konvenčním solárním panelům, či rozšířit možnosti nasazení. Jedná se o Perovskitové solární panely, Dye sensitized solární panely a transparentní solární panely. V této práci je uvedena jejich charakteristika, princip fungování, aktuální pokrok, stručná historie, překážky pro nasazení na trh a také jejich dosavadní úspěchy v komercializaci. Praktická část práce je zaměřena na experimentální výrobu vybraných typů perspektivních solárních článků a následné experimentální testování jejich vlastností.

2. Perovskitové solární články

Perovskitové solární články (perovskite solar cells, PSCs) představují perspektivní fotovoltaickou technologii. Do povědomí se dostávají díky zvyšující se účinnosti (z 3,8 % v roce 2009 se jejich účinnost navýšila na 25,5 % v roce 2021), nízké výrobní ceně, což je umožněno zejména nízkou cenou využívaných materiálů, a jednoduchostí výroby. Křemíkové alternativě mohou konkurovat také díky flexibilitě a nízké hmotnosti. To přináší nové možnosti pro jejich využití. [3]

V následující kapitole je uveden, princip fungování, překážky, které je třeba vyřešit pro úspěšnou komercializaci této technologie, a jsou zde zmíněny firmy, které se pokouší perovskitové solární panely uvést na trh.

2.1. Historie

První PSC byl sestaven japonským inženýrem Tsutomou Miyasakem v roce 2009. Miyasaka využil perovskity MAPbI_3 a MAPbBr_3 jako sensitizéry v dye sensitized solárním článku a dosáhl účinnosti 3,8 % a 3,2 %. Tyto solární články měly však problémy se stabilitou. Jejich životnost dosahovala několika minut. Nestabilita článku byla způsobena využitím tekutého elektrolytu, ve kterém se perovskit rozpouštěl. [4]

Na podobném principu sestrojil Nam-Gyu Park v roce 2011 článek, který dosahoval účinnosti 6,5 %. Tento článek fungoval po dobu 10 minut, poté se využitý perovskit rozpustil v elektrolytu. [4, 5]

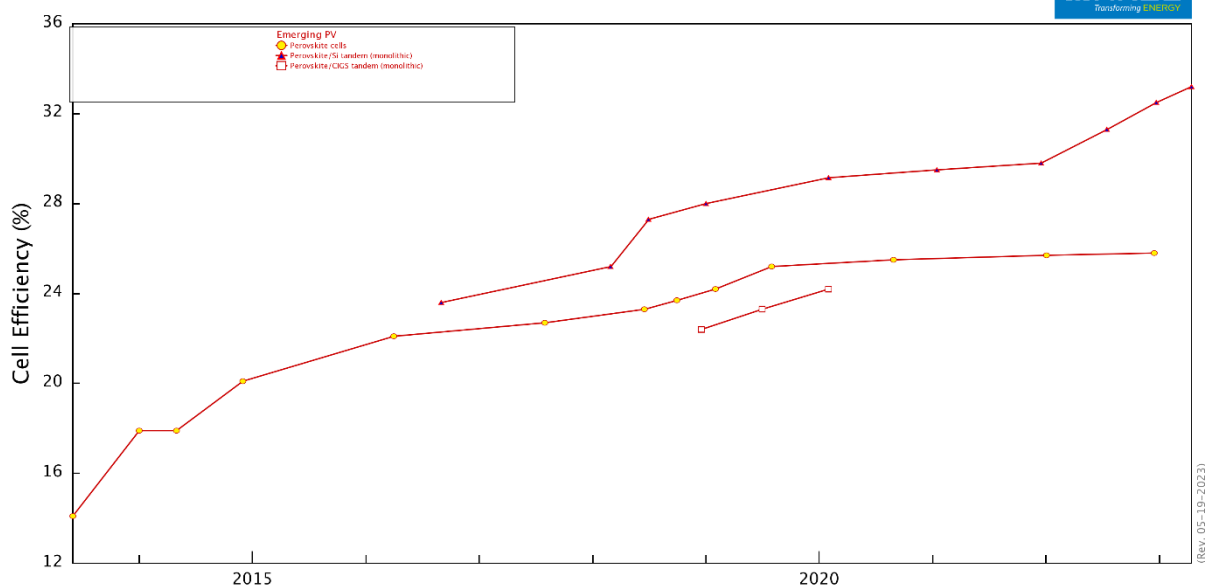
Přelomu na poli perovskitových solárních článků dosáhli Mike Lee a Henry Snaith v roce 2012, kdy nahradili tekutý elektrolyt za polovodič v pevném skupenství Spiro-OMeTAD. Docílili tak uspokojivé 9,7% účinnosti. Využití Spiro-OMeTAD nevedlo pouze k zvýšení účinnosti, ale výrazně zvýšilo stabilitu solárního článku. Tento článek prošel 500hodinovým testem na dlouhotrvající životnost. [4, 5]

V roce 2013 sestavil Burschka a kolektiv solární článek pomocí dvou-krokového nanášení perovskitové vrstvy. Místo nanesení obou částí perovskitu najednou, nanесли nejprve vrstvu PbI_3 a následně vrstvu $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$, čímž vytvořili uniformní perovskitovou vrstvu. Jímí vytvořený článek dosáhl účinnosti 15 %. [4]

Giordano a kolektiv v roce 2015 využili k výrobě PSCs mezoporézní vrstvu m-TiO_2 s přidaným lithiem. Přidané lithium zlepšilo elektrické vlastnosti článku. Výsledná účinnost tohoto článku dosáhla účinnosti 19,3 %. [4]

V roce 2018 zkonstruovala společnost Oxford PV perovskit křemíkový tandemový solární článek, který dosáhl účinnosti 28 %. Poprvé v historii tak článek vyrobený s využitím perovskitu překonal účinnost jednopřechodového křemíkového solárního článku. [4]

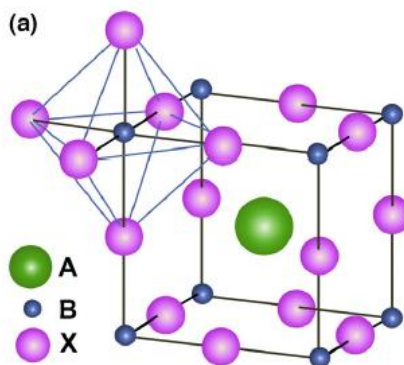
Doposud nejvyšší účinnosti dosáhl článek sestavený korejskými vědci. Jímí sestavený článek měl účinnost 25,8 %. Na obrázku 1 je zobrazen vývoj účinnosti PSCs v průběhu let. [4]



Obrázek 1: vývoj účinnosti PSCs v letech 2014-2023 [14]

2.2. Perovskitové materiály

Perovskit je krystalický minerál, objevený na Urale v roce 1839 německý mineralogem Gustavem Rosem. Jeho chemický vzorec je CaTiO_3 (oxid vápenato-titaničitý). Pro výrobu perovskitových solárních článků se využívají materiály odpovídající struktuře přírodního perovskitu. Struktura perovskitových materiálů odpovídá rovnici ABX_3 . Jedná se o organicko-anorganický halogenid kovu, kde A a B jsou kationty a X je aniont, nejčastěji oxid nebo halogenid. Struktura těchto materiálů je zobrazena na obrázku 2.



Obrázek 2: Struktura ABX_3 perovskitového materiálu [5]

Perovskitové materiály mají několik zásadních vlastností, které z nich činí ideální materiály pro výrobu solárních panelů. Tyto materiály mají velmi dobré opticko-elektrické vlastnosti, jako je nízká excitační energie elektronu a vysoký absorpční koeficient. Absorpční vrstva vytvořená z perovskitu dokáže absorbovat solární energii s vysokou účinností. Dále mají tyto materiály velkou dielektrickou konstantu. Elektrony a díry jsou tedy efektivně přenášeny

a sbírány. Elektrony a díry mohou být přemísťovány zároveň a mohou se pohybovat až v řádech mikrometrů. [6]

2.3.Princip technologie

Perovskitové solární články mají vrstvenou strukturu. Skládají se ze skleněného podkladu, potaženého transparentním vodivým oxidem, polovodiče typu n, který slouží k přenosu elektronů a polovodiče typu p, jehož účelem je přenos děr. Mezi těmito dvěma polovodiči se nachází perovskitový absorber mající za úkol pohlcovat sluneční záření. [7]

Vrstva transparentního vodivého oxidu (transparent conducting metal oxid, TCO) je nejčastěji vyrobena z oxidu cíničitého dopovaného fluorem (Fluorine-doped Tin Oxide, FTO), oxidu cíničitého dopovaného indiem (indium doped thin oxid, ITO) nebo flexibilního polyethylentetreftalátového filmu potaženého oxidem india a cínu (indium tin oxide coated flexible polyethylene tere-phthalate film, ITO-PET). Aby bylo zajištěno správné fungování solárního článku, musí být tato vrstva transparentní a vysoce vodivá. Její rezistivita by se měla pohybovat v rozmezí 5-20 Ω . [7]

Elektronová transportní vrstva (electron transport layer, ETL) je tvořena polovodičem typu n, vyrobeného nejčastěji z TiO_2 , ZnO , SnO_2 nebo WO_3 . Materiály pro výrobu ETL musí dosahovat velké mobility náboje, širokého zakázaného pásu, nízké teploty zpracování a nízké ceny. [7]

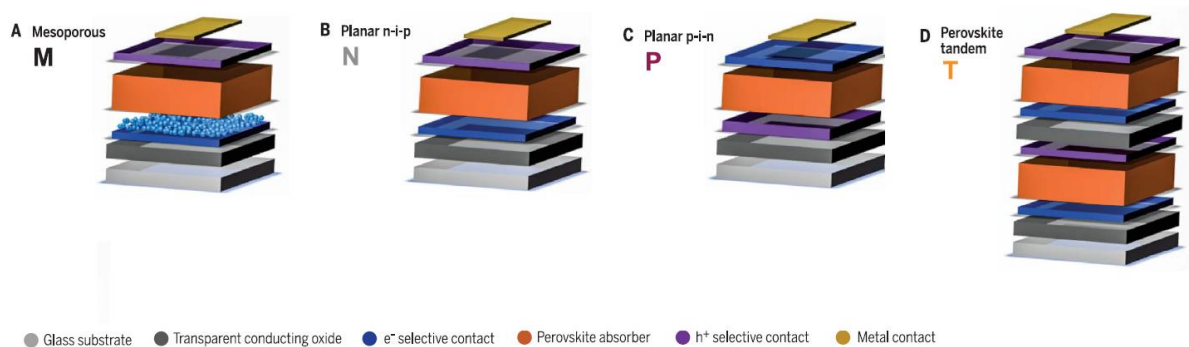
Pro perovskitovou vrstvu je důležité zvolit vhodné materiály A, B a X. Materiál X je z pravidla halogenid, kationt A je nejčastěji tvořen organických materiály na bázi methylammonia, ethylammonia a formamidinia, a kationt B je tvořen materiály na bázi olova, cínu nebo mědi. [7]

Nejčastěji využívaným materiálem pro výrobu děrové transportní vrstvy (hole transport layer, HTL) je spiro-OMeTAD. [7]

PSCs fungují na principu fotoelektrického jevu. Perovskitová vrstva absorbuje dopadající fotony, což má za následek produkci excitonů. Exciton je vázaný stav elektronu a kladně nabitě díry. Excitony vlivem rozdílné excitační vazebné energie perovskitových materiálů vytváří volné elektrony a díry (nosiče), které mohou generovat proud, nebo se přeskupí a vytvoří nové excitony. Jelikož mají perovskitové materiály nízkou pravděpodobnost přeskupení a vysokou mobilitu nosičů, je životnost volných nosičů dlouhá. [6]

V následujícím kroku jsou volné elektrony transportovány elektronovou transportní vrstvou a shromážděny na FTO skle. Volné díry jsou transportovány děrovou transportní vrstvou a jsou shromážděny na kovové elektrodě. Propojením FTO a kovové elektrody je generován proud ve vnějším obvodu.

Perovskitové solární články mají několik druhů konstrukce. Na obrázku 3 je zobrazeno několik tipů PSCs: mezoporézní, rovinný n-i-p, rovinný p-i-n a perovskitový tandem. [6]



Obrázek 3: schématické zobrazení konstrukce PSCs [8]

Světle šedou barvou je zobrazen skleněný podklad, tmavě šedou průhledný vodivý oxid, tmavě modrou elektronový kontakt, oranžovou perovskitový absorbér, fialovou děrový kontakt a žlutou kovový kontakt.

2.3.1. Rovinné rozložení

V rovinném rozložení je perovskitová vrstva uložena mezi elektronovou transportní vrstvou zobrazenou na obrázku 3 modrou barvou, a děrovou transportní vrstvou, zobrazenou na obrázku 3 fialovou barvou. ETL je tvořena např. TiO_2 , SnO_2 nebo C_{60} a HTL nejčastěji tvoří spiro-OMeTAD, poly(triarlyamine) (PTAA), poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrene-sulfonate) (PEDOT:PSS). [7]

V závislosti na umístění HTL a ETL vrstev rozlišujeme rovinné rozložení na rovinné n-i-p (konvenční) a rovinné p-i-n (invertní). Tyto dva typy se neliší jen umístěním HTL a ETL, ale i využíváním odlišných materiálů a výrobními postupy. [7]

Mezi polovodičem typu p tvořícím anodu a polovodičem typu n tvořícím katodu se nachází intrinsická vrstva i , která má pouze vlastní vodivost.

2.3.2. Tandemové rozložení

Vícepřechodové neboli tandemové solární články (tandem solar cells, TSCs) se skládají z několika vrstev solárních článků, které jsou schopny pohlcovat světelné záření v odlišných vlnových délkách. Tandemová struktura umožňuje solárním článkům přesáhnout Shockley-Queisserův limit. Shockley-Queisserův limit udává maximální teoretickou účinnost pro jedno-přechodové solární články, která je stanovena na 33,16 % při zakázaném pásu 1,34 eV. [3]

PSCs jsou vhodným typem solárních článků pro TSCs. Vděčí za to své vysoké účinnosti a levné výrobě. Levná a jednoduchá výroba článku je pro TSCs důležitá, jelikož jednotlivé články se vrství na sebe a narůstá tak konečná cena článku.

2.3.3. Mezoporézní struktura

Mezoporézní materiály se v solárních článcích využívají především pro jejich porozitu a s ní souvisejícím velkým povrchem. Mezoporézní materiály přilnou k perovskitovému absorberu, čímž zvětšují jeho povrch. Výsledkem této kombinace je zvýšení pohlcování dopadajícího záření, což vede k nárůstu účinnosti článku.[2]

Typicky se mezoporézní solární článek skládá z FTO elektrody, vrstvy ETL, vrstvy mezoporézních oxidů, perovskitové vrstvy a vrstvy HTL.

2.4. Aktuální stav technologie

2.4.1. Stabilita

Životnost PSCs je omezena nestabilitou perovskitových polovodičů, jelikož vazby mezi jednotlivými atomy jsou slabé. Tyto vazby jsou tvořeny van der Waalsovými silami, vodíkovými můstky a iontovými interakcemi. [3]

Perovskitový polovodič je nevratně rozkládán působením vlhkosti, nepřetržitým působením světla, změnami teplot a působením vnějšího elektrického pole. Dalším zdrojem nestability je přenašeč náboje TiO_2 . Důvodem této nestability je degradace vlivem UV záření. Řešením by mohlo být nahrazení tohoto materiálu materiály, které jsou odolné UV záření. Příkladem takové látky je BaSnO_3 . [7]

Působením UV záření dochází k fotoaktivaci kyslíku, který následně vytváří superoxidy a peroxidy vodíku, které degradují perovskitové polovodiče. Neblahé účinky na životnost PSCs má i působení vody, perovskitové materiály podléhají hydrolyze. Pro zlepšení stability článků je třeba zapouzdřit, čímž se zamezí vniknutí vody a kyslíku do solárního článku. [9]

Nemalým problémem u testování stability PSCs je velké množství nestandardizovaných testů. Neexistuje žádný jednotný protokol stanovující podmínky, které je nutno dodržet. Při testování stability ve tmě mohou být články zapouzdřené, ale i nezapouzdřené. V průběhu testování jsou články vystaveny odlišným vlivům prostředí, např. různé teplotě a vlhkosti prostředí. [7]

Při testování panelů ve vnitřním prostředí se využívají různé zdroje osvětlení. Nejčastěji se jedná o AM1.5 xenonovou lampu s UV filtrem i bez UV filtru, halogenidovou lampu, sirnou lampu nebo LED diodu bez UV zářní. [7]

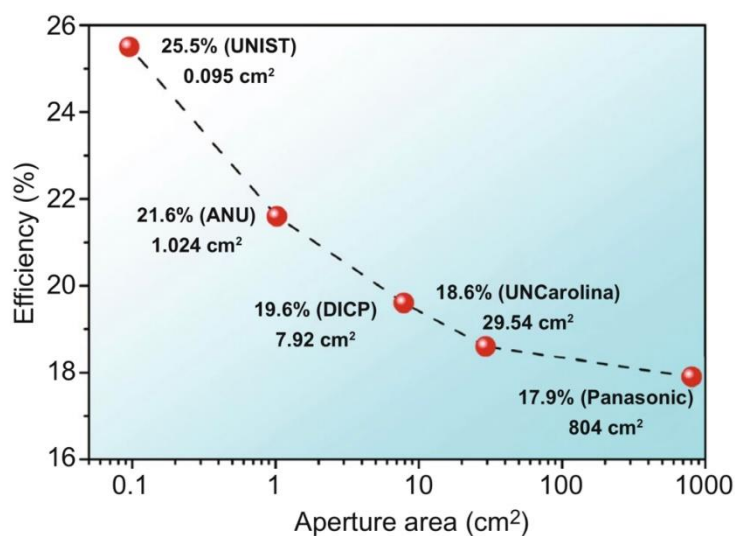
V současnosti je velká snaha o vytvoření standardizovaného testu stability PSCs a motivování výzkumníků k měření životnosti u autorizované třetí strany. Výsledkem by byla větší kredibilita výsledků a bylo by snazší porovnávat životnost jednotlivých článků. [3]

V posledních letech lze zaznamenat pozitivní zprávy o dlouhodobé stabilitě perovskitových solárních článků. Životnost těchto článků dosáhla 10 000 hodin pod působením záření odpovídajícím Slunci (1 kW/m^2). Měření životnosti probíhalo při stabilní teplotě $55 \text{ }^\circ\text{C}$ a byl využit ultrafialový filtr. Toto množství záření odpovídá celkovému záření v Evropě.

2.4.2. Účinnost

V posledních letech účinnost PSCs zaznamenává konstantní růst. V laboratorních podmínkách byla doposud naměřena nejvyšší účinnost 25,8 %. Účinnost PSCs však s rostoucími rozměry aktivní plochy článku klesá. Příkladem je výsledek experimentu, kdy byl vyroben článek malých rozměrů z materiálu se zakázaným pásmem 1,48 eV. Výsledná účinnost článku dosahovala 25 %, při zvýšení rozměrů na 200 mm² účinnost klesla pod 5 %.

Na obrázku 4 je zobrazen pokles účinnosti vlivem zvětšování plochy článků. Při zvětšení plochy z 0,095 cm² na 1,024 cm² klesá účinnost z 25,5 % na 21,6 %. Při dalším zvětšování plochy, která je již vhodná pro komerční využití, účinnost klesá až k 17,9 %. Pokles účinnosti je způsoben zejména nárůstem výrobních vad vlivem větší plochy článku. Z tohoto důvodu je třeba dbát na uniformitu krystalizace u perovskitových filmů větších rozměrů. [3]



Obrázek 4: Závislost účinnosti PSCs na ploše [3]

2.5. Předpokládaná cena PSCs

Perovskitové solární panely mají potenciál stát se levnější alternativou většiny doposud využívaným typům fotovoltaik. Vděčí za to nižším výrobním nákladům, nižší ceně využívaných materiálů a menší spotřebě energií v průběhu výroby než u klasických křemíkových panelů. PSCs je předpokládaná rychlá návratnost investice a nízké výrobní náklady na jeden watt. [10]

Studie publikovaná v periodiku ACS Energy Letters udává příklady nákladů při výrobě PSCs na automatizované výrobní lince, designované pro středně velký výrobní závod.

Minimální udržitelná cena perovskitových panelů se podle odhadů autorů této studie pohybuje v rozmezí 0,25 \$/Wp až 0,79 \$/Wp. Očekává se, že s nasazením výroby ve velkém měřítku by tato cena mohla klesnout až na 0,18 \$/Wp. Pro lepší představu uvedu minimální ceny křemíkových solárních panelů, které se pohybují od 0,34 \$/Wp u panelů vyrobených v Číně po 0,54 \$/Wp u panelů vyrobených v Německu. [10]

2.6. Komerční využití

V současné době se několik firem po celém světě pokouší o nasazení perovskitových solárních panelů na trh. Čínská společnost Microguanta Semiconductor vytvořila pilotní výrobní závod na výrobu PSCs solárních panelů, který má roční kapacitu 5GW. Tím se stala první společností na světě provozující výrobní linku na PSCs panely. Jími vyvinutý článek o velikosti 20 cm², určený pro masovou výrobu, splnil v roce 2020 IEC test Mezinárodní elektro-technické komise. Při tomto testu je článek vystaven po dobu 3 000 hodin vlhku a vysoké teplotě. Článek tento test přešel bez degradace a vykázal ztrátu účinnosti pod 2 %. Výsledky testu predikují životnost tohoto článku na více než 25 let. [3]

Další čínská společnost, GCL New Energy, staví výrobní linku o celkové roční kapacitě 100 MW, kde plánuje vyrábět fotovoltaické panely s 18% účinností. Tato společnost predikuje u svých produktů pokles ceny oproti klasickým křemíkovým solárním panelům o 70 %. [5] Začátkem roku 2022 tato firma oznámila, že začíná s výstavbou solárního parku v provincii Zhejiang o celkovém instalovaném výkonu 12 MW. Jde o první solární elektrárnu užívající perovskitové solární panely v Číně. [11]

V Evropě se výrobě PSCs panelů věnuje polská firma Saule Technologies. V roce 2021 zprovoznila vlastní výrobní linku, na které vyrábí solární panely pomocí tisknutí na flexibilní podklady. [7]

První pilotní využití perovskitových solárních panelů této společnosti se realizovalo ve Slovinské metropoli Lublani v roce 2021. Na kancelářskou budovu byly instalovány sluneční clony s perovskitovými solárními panely. Celková plocha fotovoltaiky činí 32 m². Na obrázku 5 jsou tyto clony zobrazeny.



Obrázek 5: První instalace perovskitových solárních panelů

Další evropskou společností zabývající se výrobou PSCs je Oxford PV. Ta se zabývá vývojem perovskito-křemíkových tandemových panelů, jejichž účinnost dosahuje 29,52 %. Tato společnost oznámila, že započala v Berlíně výstavbu výrobní linky s kapacitou 125 MW, na které bude vyrábět solární panely s využitím na střechách obytných budov. Předpokládané dokončení výstavby se očekává v roce 2023. [3]

PSCs mají velký potenciál k úspěšnému zavedení na trh. S rostoucími tlaky na uhlíkově neutrální ekonomiku roste potřeba obnovitelných zdrojů energie, které mají nahradit fosilní paliva. Mnoho studií uvádí, že k úspěšnému nahrazení elektráren spalujících fosilní paliva je třeba dosáhnout nákladů na 1 W pod 0,32 dolaru.

3. Dye sensitized solární panely

Barvívem sensibilizované solární články (DSSCs, dye sensitized solar cels) jsou další alternativní technologií. Své křemíkové alternativě mohou konkurovat především nižší výrobní cenou a levnějšími materiály. Účinností se těmto konvenčním panelům přibližují. V roce 2020 přesáhla účinnost těchto článků 15,26 %.[12]

Pozornost přitahují také díky dobrým vlastnostem při vystavení světelnému záření s nižší intenzitou, což umožní využití v interiérech, ale také zvýší výrobu při oblačném počasí. Dále jsou DSSCs vhodné pro výrobu flexibilních, barevných a průhledných solárních panelů.

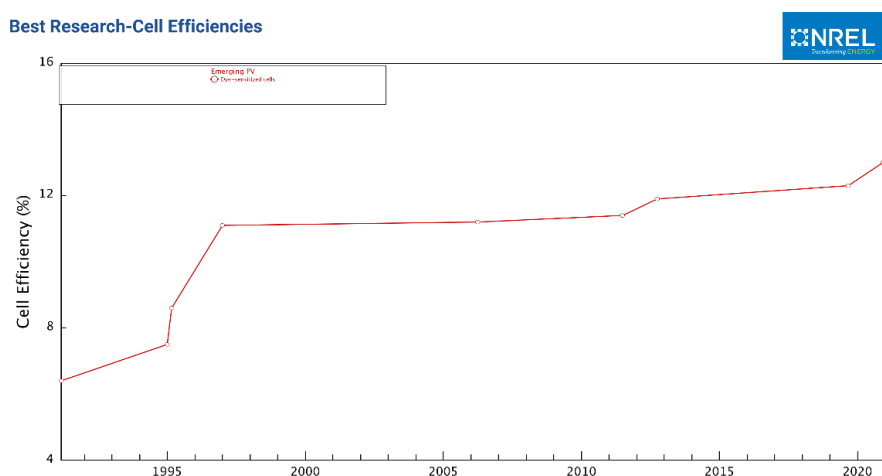
3.1.Historie

Historie DSSCs začala koncem 60. let 20. století, kdy bylo objeveno, že je možné generovat elektrinu ozářením organických barviv v elektrochemických člancích. První pokus o sestavení DSSCs proběhl v roce 1972 na Kalifornské univerzitě v Berkeley. Jako elektroda byl použit oxid zinečnatý. Absorpce záření využitým barvívem však byla velmi nízká a nepřekročila 1 %.[2]

Přelom na poli DSSCs se s udál v roce 1991, kdy Michael Grätzel a Brian O'Regan poprvé použili elektrodu z oxidu titaničitého. Výsledný článek dosahoval účinnosti 7 % a byl pojmenován po jeho vynálezci Grätzelův článek. [2]

V roce 1993 Grätzel a jeho tým dosáhli 9,6% a o čtyři roky později 10% účinnosti. Předpokládá se, že teoretická účinnost DSSCs článků by mohla dosahovat až 20 %. V současnosti probíhá intenzivní výzkum za účelem přiblížení této účinnosti a spuštění komercializace této technologie. [2]

S cílem vylepšit vlastnosti DSSCs bylo v roce 2003 poprvé využito rutheniové barvivo jako senzibilizátor. Bylo dosaženo 6% účinnosti a tímto experimentem započal vývoj rutheniové barvivo. V roce 2008 začal být využíván jodový redoxní elektrolyt, čímž bylo dosaženo zvýšené stability a účinnosti článků, které v tomto období dosahovali účinností až 11,5 % Na obrázku 6 je zobrazen vývoj nejvyšší dosažené účinnosti DSSCs mezi lety 1991 až 2022.[13]



Obrázek 6 Nejvyšší dosažené účinnosti DSSCs článků v průběhu let [14]

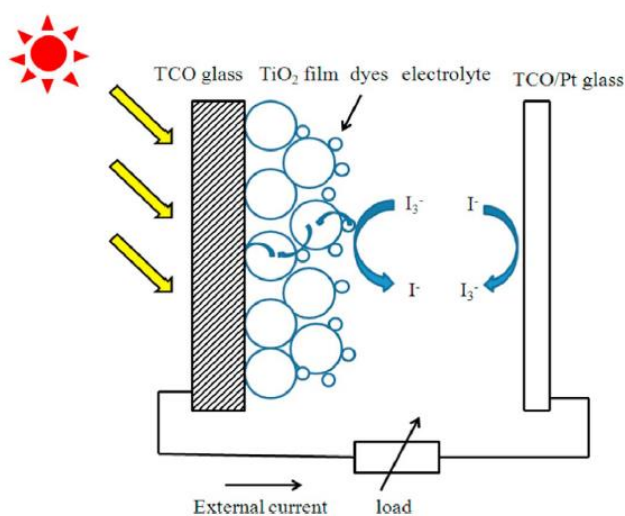
3.2.Princip technologie

DSSCs solární články se skládá ze čtyř hlavních částí. První z nich je fotoanoda, která je tvořena tenkou vrstvou mezoporézního oxidu. Tato fotoanoda je nanášena na skleněný, vodivý a průhledný podklad. Nejčastěji využívaným materiálem pro výrobu fotoanod je TiO_2 . Výhodou tohoto materiálu je jeho dostupnost, cena a fakt, že není toxický. [13, 2]

Druhá část je tvořena monovrstvou senzibilizačního barviva, které je k vrstvě mezoporézního oxidu vázané kovalentní vazbou. Barvivo má za účel pohlcovat světelné záření a generovat fotony excitované elektrony. Aby mohl článek správně fungovat, musí být barvivo schopné absorbovat ultrafialové záření a záření blízké infračervené oblasti spektra. Za účelem dosažení lepší stability článků je vhodné, aby bylo barvivo hydrofobní, čímž minimalizujeme přímý kontakt mezi barvivem a anodou.[2, 15]

Třetí částí je elektrolyt (nejčastěji tvořen redoxním párem I^-/I_3^-) nacházející se v anorganickém rozpouštědle. Elektrolyt by měl splňovat několik vlastností. Redoxní pár má za úkol regenerovat barvivové senzibilizátory, které oxidují. Měl by dosahovat dlouhodobé chemické, termické a elektrochemické stability. Neměl by způsobovat korozi komponent solárního článku. Další důležitou úlohou elektrolytu je přenos náboje. Elektrolyt tedy musí být schopen rychle přenášet náboj a umožňovat kontakt mezi pracovní elektrodou a protielektrodou. [2, 15]

Čtvrtou částí je protielektróda tvořená platinou potaženým skleněným podkladem. Princip technologie DSSCs je zobrazen na obrázku 7. [2]



Obrázek 7: schématické zobrazení DSSCs článku [2]

Nejprve je senzibilizátor excitován energií dopadajících fotonů z nejvyššího obsazeného molekulového orbitalu do nejnižšího neobsazeného molekulového orbitalu, čímž se tvoří páry děr a molekul. Excitovaný senzibilizátor zoxiduje a elektron přejde do vodivého pásma polovodiče, který je nejčastěji tvořen TiO_2 . Následně elektrony přejdou z tenké vrstvy TiO_2 přes průhledné vodivé sklo na katodu. Z katody přejdou elektrony přes externí okruh na anodu a vytvoří proud. [12]

Aby mohl článek správně fungovat, je třeba, aby zoxidované senzibilizátory zregenerovali. Redoxní páry (jodid a tri-jodid I^- , I_3^-), které jsou obsažené v elektrolytu, darují elektron zoxidovanému senzibilizátoru. Následně elektrolyt a v něm obsažený redoxní mediátor regenerují na katodě. [12]

3.3. Aktuální stav technologie

3.3.1. Stabilita

Stabilita je společně s účinností nejdůležitější vlastností solárního článku. V porovnání s křemíkovými solárními články dochází u DSSCs k rychlejší degradaci. Nejvýznamnějšími faktory způsobující jejich nestabilitu je působení tepla, vlhkosti a UV záření. Všem těmto vlivům jsou solární panely vystaveny.

Velký vliv na pokles účinnosti DSSCs mají úniky elektrolytu, který je postupně z článku odpařován. V současné době jsou snahy o nahrazení tekutého elektrolytu HTL v pevném skupenství. Využití HTL zabrání únikům elektrolytu, ale snižuje účinnost článků.

Využitím vhodného zapouzdření, kterého je zpravidla dosaženo utěsněním okrajů článku lze zabránit únikům elektrolytům z článku ven a zároveň vniknutí vlhkosti a kyslíku do článku. Nejčastějšími těsnícími materiály jsou Surlynové a Bynelové fólie, které jsou využívány zejména kvůli jejich nízké ceně a jednoduchému využívání. Jejich nevýhodou je pokles těsnící schopnosti vlivem vystavení cyklicky se měnícím teplotám. [15]

V roce 2019 provedl Venkatesan a kol. test životnosti DSSCs zapouzdřeného pomocí Surlynu. Solární články využívající barvivo N-719 a Z-907 si při vystavení záření 200 lux a teplotě 35 °C po dobu 1000 hodin udržely 95 %, respektive 97 %, původní účinnosti. V roce 2020 H. Jiang a kol. provedl light-soaking test článku zapouzdřeného pomocí lepidla vytvrzovaného UV zářením. Článek vystavený teplotě 60 °C po dobu 500 hodin si udržel 92 % své původní účinnosti. [16]

3.3.2. Účinnost

V porovnání s ostatními začínajícími inovativními technologiemi solárních článků účinnost DSSCs dosahuje nadprůměrných hodnot. Hodnoty účinnosti těchto článků však nedosahují účinností klasických křemíkových solárních článků ani PSCs.

V dostupné literatuře, která se věnuje DSSCs je patrné, že většina článků vyrobených v laboratořích dosahuje účinnosti v rozmezí 7-12 %. Nejvyšší účinnosti přeměny solární energie na elektrickou bylo dosaženo v roce 2020 a to 15,26 %. Je však otázkou, zdali je u DSSCs účinnost hlavním parametrem. Vzhledem k částečné transparentnosti a možné flexibilitě je možné instalovat tyto články na místa, kam není možné instalovat klasické křemíkové solární panely, jako jsou fasády staveb, stínidla oken atd., mohou tedy již zaběhlým solárním technologiím konkurovat i jinými způsoby než vyšší účinností. [12]

Výborných hodnot účinnosti dosahují DSSCs v horších světelných podmínkách. Jsou schopné s dostatečnou účinností pracovat i při difusním a tlumeném světle. V těchto podmínkách dalece převyšují účinnosti křemíkových solárních panelů. [12]

3.4.Barviva

3.4.1. Anorganická barviva

Anorganická barviva obsahující komplexní sloučeniny těžkých přechodných kovů, jakou jsou ruthenium, osmium a iridium, jsou doposud nejvyužívanější barviva. Anorganická barviva mají vynikající vlastnosti pro využití v DSSCs. Mají dlouhotrvající životnost excitonů a dobré redoxní vlastnosti. Pro výrobu anorganických barviv se často využívá ruthenium polypyridyl, který má dobrou tepelnou a chemickou stabilitu. Je schopný absorbovat široké spektrum záření ve viditelném a blízkém infračerveném (NIR, near-infrared) spektru. DSSCs využívající ruthenium polypyridylová barviva vykazují nejvyšší účinnosti.[17]

3.4.2. Organická barviva

V posledních letech se pozornost vědců ubírá směrem k vývoji organických barviv pro DSSCs. Anorganická barviva mají sice vynikající vlastnosti, ale využívají vzácné a drahé kovy, které mohou být škodlivé pro životní prostředí. Organická barviva mohou být vhodnou alternativou. Hlavními výhodami organických barviv je jejich cena, jednoduchost výroby a jejich absorpční koeficient je řádově větší než u anorganických barviv[17]

Aby však mohla organická barviva nahradit ta anorganická, je třeba vylepšit jejich vlastnosti. V porovnání s anorganickými barvivami dosahují články obsahující organická barviva nižší účinnosti a horší stability.[17]

3.4.3. Přírodní barviva

Nejnovějším trendem je využívání přírodních barviv, jako jsou betalainy, karotenoidy, chlorofyl a flavonoidy, které jsou extrahované z rostlin. Pro výrobu těchto barviv lze využít plody, kořeny, stonky a listy rostlin. [18, 19]

Hlavní motivací k využívání přírodních barviv je zejména jejich šetrnost k životnímu prostředí. Tato barviva jsou netoxická a bio-rozložitelná. Dalším důvodem pro vývoj přírodních barviv je jednoduchost extrakce a dostupnost vstupních surovin. Barviva obsažená v rostlinách často absorbují světelné záření ve velkém rozsahu vlnových délek a vykazují tak výborné vlastnosti v difusním a vícebarevném světle.[18, 19]

Velkým nedostatkem je účinnost solárních článků využívajících tento typ barviv. Jejich účinnost nepřesahuje 3 %. Vědci se nyní uchylují k výzkumu přírodních barviv extrahovaných z mikroorganismů. Jejich pozornost se ubírá zejména k bakteriím z Antarktidy, které mají vysokou odolnost proti UV záření a nízkým teplotám. [18, 19]

3.5.Perspektiva

DSSCs mají potenciál zaujmout důležitou roli v energetice 21. století. Je čím dál tím jasnější, že energetické zdroje využívající fosilní paliva budou dříve či později nahrazeny zdroji obnovitelnými. Solární energie bude mít v této transformaci významnou úlohu. DSSCs mají

oproti ostatním technologiím solárních článků nespočet výhod. K výrobě DSSCs nejsou využívány vzácné toxické materiály, jejich výrobní cena je poměrně nízká, v porovnání s křemíkovými solárními panely jsou jejich výrobní náklady třetinové. Nižší ceny je dosaženo zejména nízkou energetickou spotřebou při výrobě, nenáročností výroby a využitím dostupných materiálů.[20]

Uplatnění mohou DSSCs najít například v odlehlých venkovských oblastech. V zemích třetího světa jsou doposud miliony domácností bez přístupu k elektrické energii. Pro tyto oblasti je důležité nalézt levný zdroj elektrické energie, který bude spolehlivý.[20]

Dalším možným způsobem aplikace DSSCs je integrace těchto solárních článků do elektrotechniky, jako jsou solární nabíječky, kalkulačky, mobilní telefony, hodinky, ale i elektromobily s integrovaným solárním panelem a záložní zdroje pro armádní využití.[20]

3.6. Překážky pro nasazení

Pro úspěšné nasazení na trh je třeba vyřešit několik překážek týkajících se DSSCs. Jednou z nich je účinnost. Aby tyto solární panely mohly konkurovat již zavedeným alternativám, je třeba dosáhnout vyšší účinnosti, nebo kompenzovat nižší účinnost nízkou cenou panelu.

Dále je třeba zlepšit dlouhodobou stabilitu těchto panelů. Jejich nestabilita pramení především z úniků kapalného elektrolytu a degradace olověného katalyzátoru. Vhodným řešením je nahrazení tekutého elektrolytu vrstvou děrového transportního materiálu v pevném skupenství. Olověný katalyzátor lze nahradit uhlíkem, který má lepší elektrochemickou stabilitu než olovo. Životnost DSSCs se po vyřešení těchto překážek odhaduje až na 20 let.

Neméně důležité je snížit množství potřebného materiálu a výrobní cenu panelu. Velký potenciál pro snížení ceny je u syntetických barviv, pro jejichž výrobu se využívají vzácné a toxické materiály. Možným řešením je nahrazení syntetických barviv barvivy vyrobenými z rostlin

Další prostor pro snižování ceny je u vodivých FTO a ITO skel, které lze nahradit levnějšími průhlednými vodiči na bázi uhlíku, jenž mohou nahradit jak FTO a ITO skla, tak i katalyzátor.

3.7. Komerční využití

Podle studie provedené analytickou společností P&S Intelligence dosáhne v roce 2023 trh s DSSCs 60,5 milionů dolarů (přibližně 1,4 miliardy korun). Nejčastější instalace těchto fotovoltaických elektráren jsou na komerčních a residenčních budovách. Nejvýznamnější společnosti, které se výrobou DSSCs zbývají jsou G24 Power, 3G Solar Photovoltaic, Solaronix,

Britská společnost G24 Power na svých internetových stránkách uvádí, že jsou leaderem v komercializaci DSSCs. Ve městě Newport v jižním Walesu mají továrnu na výrobu DSSCs o celkové rozloze 89 000 m². K výrobě solárních článků využívají roll-to-roll technologii na principu inkjet printing. Jejich výrobní linka dokáže ročně vyprodukovat solární moduly o rozloze 75 000 m² v podobě 500 m dlouhých a 150 mm širokých fólií, které následně upravují do rozměrů požadovaných zákazníkem. [21]

Společnost G24 uvádí, že životnost jejich článků dosahuje 3 let, články jsou flexibilní, lehké, ekologické a dokážou vyrábět elektrickou energii i při nízko intenzivním a difusním záření. V jejich e-shopu lze zakoupit klávesnici s integrovaným DSSCs článkem, batoh s integrovaným DSSCs článkem a vzorek DSSCs modulu o rozměrech 200x150 mm o výkonu ½ watt za 50 liber. [21]

Další společností zabývající se výrobou DSSCs je izraelská společnost 3G Solar Photovoltaic. 3G Solar se věnuje výrobě DSSCs, které jsou určeny k integraci do elektrických spotřebičů, jako jsou bezpečnostní kamery, detektory kouře a termostaty. Životnost jejich solárních článků by měla dosahovat minimálně 10 let, což je dostačující pro jejich nasazení, jelikož převyšuje očekávanou životnost produktů, na kterých jsou umístěny. [22]

Články jsou vyráběny pomocí screen printing technologie. Výrobce udává, že je možné objednat panely různých barev nebo transparentní panely. Panely jsou vhodné pro vnitřní i venkovní využití a jejich účinnost se pohybuje mezi 12 % - 18 % při osvětlení 2700k LED.[22]

Švýcarská společnost Solarnix dodává transparentní barevné DSSCs panely od roku 2011. Na svých internetových stránkách deklaruje, že jimi vyrobené panely jsou šetrné k přírodnímu prostředí, na objednávku vyrobí solární panely různých barev, tvarů a rozměrů.[23]

Drží prvenství v komerční aplikaci DSSCs panelů. V roce 2013 byly jejich panely instalovány na fasádě konferenčního centra SwissTech Convention Center ve švýcarském městě Lausanne. Tato aplikace DSSCs solárního článku je zobrazena na obrázku 8.[23]



Obrázek 8: Konferenční centrum SwissTech Convecion Center s instalovanými DSSCs solárními panely [24]

Tato společnost se nevěnuje jen výrobě DSSCs panelů, ale vyrábí a dodává také širokou škálu materiálů a příslušenství pro výrobu DSSCs a PSCs a zařízení na testování solárních článků. [23]

4. Průhledné solární panely

Průhledné solární panely (TPVs, transparent solar photovoltaic) odpovídají na poptávku po solárních panelech, které lze snadno integrovat do budov. V posledních letech lze pozorovat trend realizace solárních elektráren na střeších rodinných domů, ale i na střeších větších budov, jako jsou výrobní haly, supermarkety, administrativní budovy atd. S rostoucí popularitou výškových budov s prosklenou fasádou však klesá procento plochy, kam lze solární panely umístit.

Řešením mohou být průhledné solární panely, které lze umístit na okna i skleněné fasády budov. Kdyby tak bylo učiněno u výškových budov, jejichž fasáda je tvořena z 90 a více procent skleněným povrchem, bylo by možné pokrýt až 40 % jejich celkové spotřeby elektrické energie. Dalším potenciálním využitím průhledných solárních panelů mohou být skla automobilů nebo na displeje elektrických zařízení, jako jsou mobilní telefony nebo tablety. [9, 25]

Průhledné a částečně průhledné solární články jsou poměrně nové technologie s přijatelnou účinností, která se však nemůže rovnat účinností klasických křemíkových solárních panelů. Zatímco hlavním principem fungování solárních panelů je pohlcování energie fotonů a přeměnění této energie na energii elektrickou, tak definicí průhlednosti je umožnění fotonům projít skrz.

Průhlednosti solárních článků lze dosáhnout dvěma způsoby. Prvním způsobem je absorpce části viditelného světla, zatímco zbytek je propuštěn dál, pro tento způsob se využívají tenko-filmové technologie a selektivně průsvitné technologie. Druhým způsobem je využití luminiscentního solárního kolektoru (LSC, luminescent solar concentrator). V následujících třech podkapitolách vysvětlím jednotlivé technologie. [9]

4.1. Tenkovrstvé fotovoltaiky

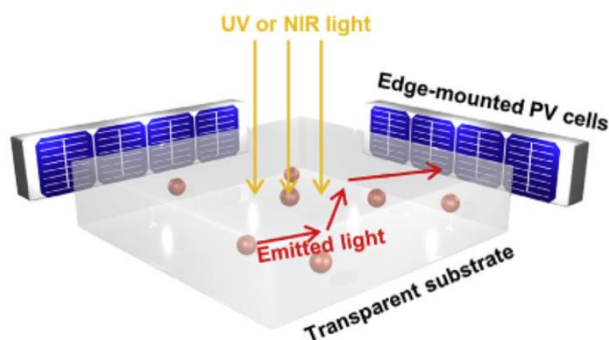
U tenkovrstvých solárních článků (TFPVs, thin film photovoltaics) je transparentnosti dosaženo zredukováním tloušťky jednotlivých vrstev. Tloušťka vrstev se u této technologie TSCs pohybuje v řádech několika nanometrů až 10 mikrometrů, což umožňuje záření viditelného spektra částečně prostoupit solárním článkem. [25]

Při optimalizaci vrstvy materiálu absorbujícího záření je nutné zvolit vhodnou tloušťku, která bude zaručovat požadovanou průsvitnost a zároveň je dostatečná pro správné fungování článku, jelikož se snižující se tloušťkou roste průsvitnost, ale klesá účinnost článku. Kromě částečné transparentnosti TFPVs snížením tloušťky dochází zejména ke snížení nákladů, kterého je dosaženo úsporou materiálu. [9, 25]

Jelikož je průhlednosti dosaženo velmi tenkou vrstvou světelného absorbéru, je možné k výrobě transparentních solárních článků využít konstrukci založenou na základě velké škály využívaných i vyvíjených typů solárních článků, jako jsou perovskitové, dye sensitized, polymerové i křemíkové solární články. [25]

4.2. Solární článek s luminiscentním solárním kolektorem

Luminiscentní solární kolektory využívají luminiscentní materiály. Principem technologie je přenášení záření luminiscentními materiály, které emitují přijaté záření do neprůhledných okrajů článku, ve kterém se nachází konvenční solární články v podobě pásů, jimiž je generována elektrická energie. Luminiscentní materiály jsou umístěné v průhledné vrstvě polymerového podkladu. Solární článek se tedy skládá ze dvou částí. Průhledné luminiscentní vrstvy zabírající většinu plochy článku a konvenčního solárního článku po jeho okrajích. Konstrukce tohoto solárního článku je zobrazena na obrázku 9. [9]



Obrázek 9: Luminescentní solární kolektor [9]

LSCs se soustředí na pohlcování ultrafialového a NIR záření, zatímco viditelné záření nechává v co největší míře prostoupit. Tyto články dosahují vysoké propustnosti dosahující až 74 % a mají podobně jako čiré sklo neutrální zabarvení. [25]

Jako okraje článků se nejčastěji využívají panely vyrobené z křemíku nebo arsenidu galia. Nejčastěji využívané luminiscentní materiály jsou organická barviva.

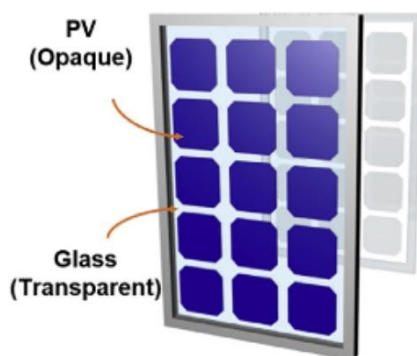
Přes velmi příznivé optické vlastnosti LSCs můžeme pozorovat velký nedostatek této technologie. TSCs mají oproti ostatním technologiím velmi malou účinnost, která se pohybuje v řádech desetin až nižších jednotek procent. Nízká účinnost je způsobena nízkou úrovní optického výkonu (OPE, optical power efficiency), která se pohybuje okolo 2,1 %. Dosavadní nejvyšší účinnost LSCs TPV dosahuje 1,24 % při 74% průsvitnosti. Nízké OPE je způsobeno nízkou absorpcí UV a NIR spektra Luminiscentními materiály. Pro zvýšení účinnosti článku je tedy nutné soustředit výzkum na vývoj luminiscentních materiálů s lepší absorpcí UV a NIR záření. [9, 25]

Životnost LSC solárního článku je nejvíce limitovaná stabilitou luminiscentního kolektoru. Ostatní komponenty článku, jako je polymerový podklad a solární články na okrajích jsou již komerčně využívány a zaznamenávají životnost v řádech desítek let. Luminiscentní materiály jsou velmi náchylné na působení vlhkosti a kyslíku v atmosféře, jejich stabilita je působením těchto vlivů narušovaná, což způsobuje pokles OPE. [25]

Řešením je izolace luminiscentních materiálů od okolních vlivů. Stabilita těchto materiálů se nyní pohybuje v řádech nižších jednotek let, a to především díky polymerovému podkladu, který luminiscentní materiály chrání před působením okolních atmosférických vlivů. [25]

4.3. Částečně průsvitné solární panely

Třetí technologií transparentních solárních článků, které se budu věnovat, jsou částečně průsvitné solární panely. Solární panel se skládá z neprůhledných solárních článků, které jsou s určitým odstupem rozmístěny na průhledném podkladu, vyrobeném např. ze skla. Mezery mezi jednotlivými články umožňují průchod světelného záření. Konstrukce tohoto solárního panelu je zobrazena na obrázku 10. [9]



Obrázek 10: Částečně průsvitný solární panel [9]

Jelikož je využití tohoto panelu zamýšleno hlavně na obytných budovách, nesmí být rozměry jednotlivých článků příliš velké, aby nenarušovali vzhled panelu. Řešením tohoto problému byl vývoj křemíkového solárního článku o délce 1,55 mm, šířce 50 μm a tloušťce 15 μm . V závislosti na rozmístění článků na průhledném podkladu lze dosáhnout průsvitnosti v rozmezí 35 % až 70 %. Přestože má tento článek velmi malé rozměry, je stále viditelný pro lidské oko. [9]

Tento problém se rozhodli vyřešit Korejští výzkumníci z The Seo Group, kteří vyvinuli neutrálně zbarvený průhledný solární panel. Využit byl konvenční Si-c solární článek, u kterého bylo dosaženo průsvitnosti pomocí úpravy výroby, u které se změnil způsob leptání. Pomocí vhodně navrženého rozestupu a naklopení článků bylo dosaženo neviditelnosti jednotlivých článků pro lidské oko. Výsledkem je průhledný solární panel, který dosahuje účinnosti 12,2 %, u kterého se předpokládá dlouhá životnost, jelikož struktura Si-c solárního článku je velmi podobná již komercializovaným Si-c článkům. Tato technologie TSCs má velký potenciál pro komerční využití. Výsledná cena produktu se očekává v podobné výši, jako tomu je u klasických Si-c solárních panelů, jelikož výrobní postup i využití materiály jsou v podstatě totožné. [9]

4.4. Překážky pro uvedení na trh

Pro využití těchto technologií ke komerčním účelům je třeba vyřešit několik nedostatků, které rozvoj této technologie v současné době brzdí.

Je třeba zvolit nebo vyvinout vhodné materiály pro výrobu TSC, které umožní průchodnost viditelného spektra a zároveň umožní absorpci fotonů, jejichž vlnové délky se nachází mimo

viditelné spektrum. Pro využití těchto panelů na oknech budov je třeba dosáhnout průhlednosti alespoň 50 %, u obrazovek elektrospotřebičů dokonce průhlednosti minimálně 80 %. Zároveň tyto panely musí dosahovat dostatečné účinnosti, aby toto využití dávalo ekonomický smysl. [25]

Dále je třeba zdokonalit výrobu a přípravu těchto materiálů pro využití v průhledných solárních panelech. Neméně důležité je vylepšení konstrukce těchto panelů a vlastností jejich ochranných vrstev. Mimo jiné je třeba snížit cenu výroby a vstupních materiálů do takové míry, aby průhledné solární panely byly konkurenceschopné již zaběhlým křemíkovým panelům.

V současné době stále probíhá výzkum a vývoj TSC panelů snažící se tyto překážky vyřešit a umožnit uvedení této technologie na trh. Výzkum se ubírá několika směry. Někteří vědci se snaží nalézt a vyvinout alternativní materiály, které by měly přijatelnou transparentnost a zároveň měly potřebné vlastnosti pro výrobu TSCs. Další se zaměřují na vývoj článků pohlcujících UV a NIR záření, zatímco viditelné spektrum nechají projít. [25]

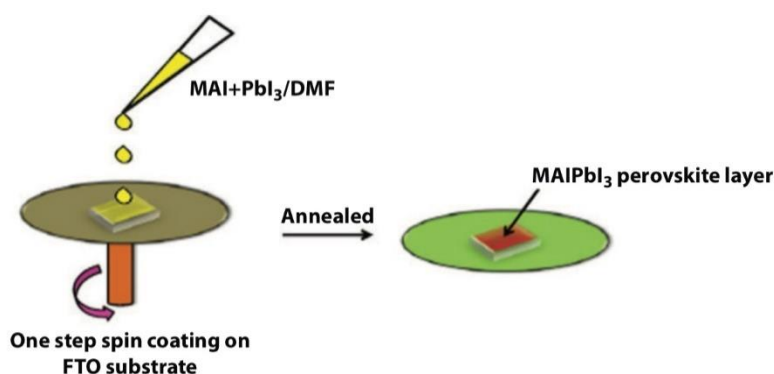
5. Výroba solárních článků

V této kapitole jsou popsány metody nanášení jednotlivých vrstev perspektivních solárních článků. Jsou zde zmíněny nejčastěji využívané metody pro laboratorní i průmyslovou výrobu této technologie.

5.1. Laboratorní výroba PSCs – Spin coating

Spin coating je efektivní a levná metoda nejčastěji využívaná pro nanášení vrstev v laboratorních podmínkách. Na podklad se nanese nadměrné množství roztoku obsahujícího rozpuštěný materiál. Roztok se pomocí vysokých otáček působením odstředivých sil rovnoměrně roznese po povrchu podkladu. Čím vyšší otáčky, tím tenčí je výsledná vrstva. Princip této technologie je zobrazen na obrázku 11. [26]

Pro využití v průmyslu je však tato metoda nevhodná. Při nanášení vrstev pomocí spin coating dochází k velkému plýtvání materiálem, až 90 % roztoku perovskitu je odstředivými silami odneseno z podkladu. Nanesená vrstva nemá jednotnou tloušťku a morfologii. Velikost vyráběného článku je omezena a výrobní proces je pomalý. [26]

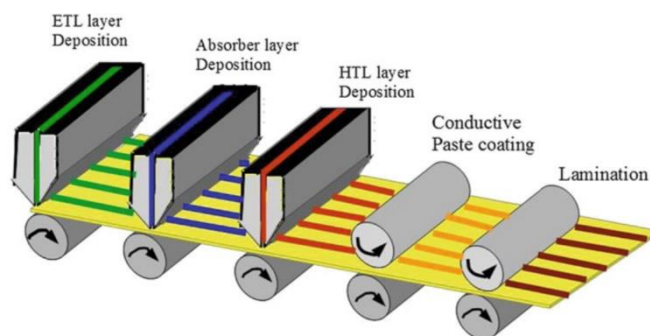


Obrázek 11: Nanášení perovskitové vrstvy pomocí metody spin coating [26]

5.2. Průmyslová výroba solárních článků

V průmyslové velkokapacitní výrobě se nejčastěji využívá takzvaný Roll-to-roll proces. Tato technologie spočívá v nanášení jednotlivých vrstev na pohybující se flexibilní podklad. Při roll-to-roll procesu se využívá několik způsobů nanášení, jako je inkjet printing, screen printing, slot dye nanášení.

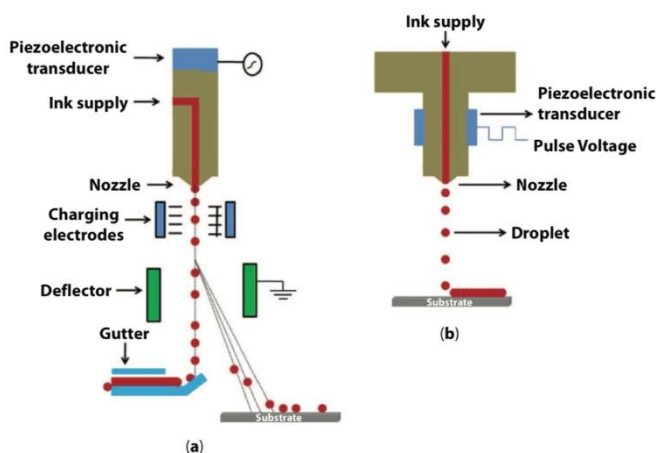
Roll-to-roll proces je pro velkokapacitní výrobu vhodný zejména pro vysokou efektivitu a rychlost nanášení jednotlivých vrstev, vysokou míru automatizace výroby a příznivé výrobní náklady. Tento proces je zobrazen na obrázku 12. [26, 27]



Obrázek 12: Roll-to-roll proces výroby solárních článků[27]

5.2.1. Inkjet printing

Inkjet tisknutí je jedna z nejvíce využívaných metod výroby inovativních fotovoltaických článků. Tato technologie funguje na principu tisknutí tekutiny na bázi koloidního inkoustu. Inkoustová tekutina je z trysky po kapkách vstřikována na podklad s velkou přesností. Rozlišují se dvě metody inkjet tisknutí, a to kontinuální inkjet tisknutí a drop-on-demand tisknutí. Na obrázku 13 jsou tyto metody vyobrazeny. [26]



Obrázek 13: Inkjet tisknutí (a) kontinuální (b) drop-on-demand[26]

Při kontinuálním inkjetovém tisknutí je přes trysku vstřikován kontrolovatelný proud tekutiny. Tento proud je působením gravitace rovnoměrně rozprášen na malé kapičky stejné velikosti. Během pádu kapičky proletí kolem elektrody a získají elektrický náboj. Nabité kapičky tekutiny jsou deflektorem usměřovány směrem k cílovému podkladu. [26]

Touto metodou lze tisknout z jakéhokoliv druhu materiálu, který lze přivést do kapalného skupenství a je schopen vést elektrický proud. Výhodou je možnost tisku na povrchy všech typických drsností a zakřivení. Dále nedochází k plýtvání tekutiny, přebytečné kapičky lze nasměrovat k zásobníku.[26]

Při drop-on-demand tisknutí je průtok nanášeného materiálu tryskou regulován a řízen mikroprocesorem, čímž je dosahováno významné úspory materiálu oproti kontinuálnímu

tisknutí a také vysoké přesnosti tisku. Velikost kapiček je díky kontrolovanému tisknutí rovnoměrná a je možno jednoduše regulovat množství nanášeného materiálu. [26]

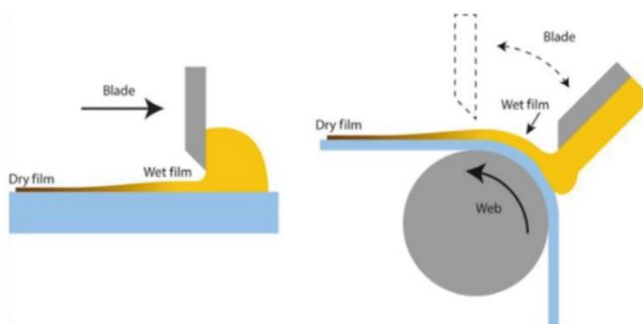
Přestože inkjet tisknutí vykazuje potenciál pro využití ve velkokapacitní průmyslové výrobě, není zcela jisté, že tato technologie splní požadavky na rychlost nanášení a kvalitu nanášených vrstev. [28]

5.2.1. Blade coating

Technologie blade coating využívá k nanášení vrstev břitvu, která po podkladu roznáší předem nanesenou vrstvu materiálu a vytváří tak tenký film v tekutém skupenství. Následně se tato vrstva sušením přivede do skupenství pevného. Princip této technologie je zobrazen na obrázku 14. [11]

Výsledná tloušťka naneseného filmu je závislá především na množství a koncentraci prekurzorového inkoustu, rychlosti nanášení vrstvy a mezerou mezi břitvou a podkladem. Pro vznik kvalitní celistvé vrstvy nanášeného materiálu je důležité kontrolovat proces krystalizace naneseného filmu. Odpařování rozpouštědla probíhá pomaleji než u technologie spin coating, což může mít za následek chemické změny v inkoustu, které vedou k nerovnoměrné krystalizaci. [28]

Účinnost solárních článků vyrobených pomocí technologie blade coating se u článků s plochou v řádech desetin centimetru čtverečního pohybuje okolo 18-20 %, při vyšších rozměrech účinnost klesá k 15 %. [28]

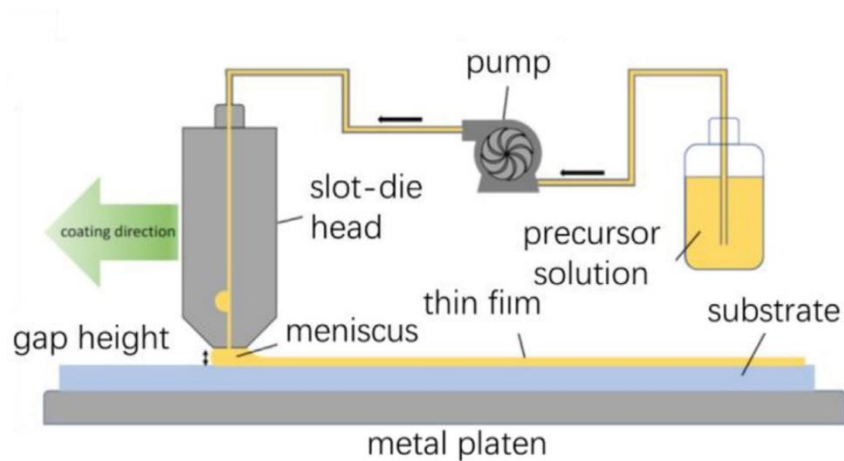


Obrázek 14: Princip technologie blade coating [28]

5.2.1. Slot-die coating

Technologie slot-die coating funguje na principu kontinuálního nanášení roztoku, který je přiváděn skrz tenkou štěrbinu. Tloušťka naneseného filmu přímo závisí na koncentraci nanášené látky v roztoku, průtoku roztoku štěrbinou a rychlosti posuvu podkladu. Princip této technologie je zobrazen na obrázku 15. [28]

Tato technologie je vhodná pro velkokapacitní průmyslovou výrobu perovskitových solárních článků. Potvrzují to výsledky experimentu, při kterém byly vyrobeny dva články. Při rozměrech $149,5 \text{ cm}^2$ a 168 cm^2 dosáhly účinnosti 11,8 % a 11,2 %. [28]



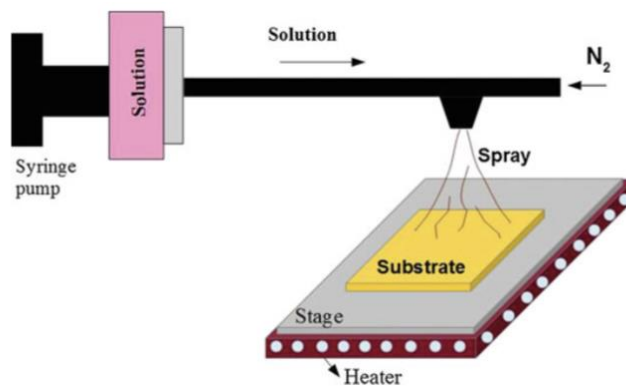
Obrázek 15: Princip technologie Slot-die coating[28]

5.2.2. Spray coating

Při nanášení vrstev pomocí technologie spray coating je nanášený inkoust vstříkován na podklad přes trysku, která ho rozprašuje na malé kapičky. Kapičky, které dopadly na podklad, se následně spojí do celistvé vrstvy a vytvářejí tenký film. Po vypaření rozpouštědla vzniká vrstva filmu v pevném skupenství. Princip této technologie je zobrazen na obrázku 16. [28]

Spray coating je možné rozdělit na několik druhů podle způsobu rozprašování. Inkoust je rozprašován pomocí hnacího plynu, ultrazvukových vln, elektrického odporu nebo kavitací inkoustu.[28]

Tato technologie je vhodnou technologií pro velkokapacitní výrobu perovskitových solárních článků. Výroba je levná a poměrně rychlá. V současné době však články vyrobené touto technologií dosahují horších parametrů než ty vyrobené pomocí metod blade coating a slot-die coating. [28]

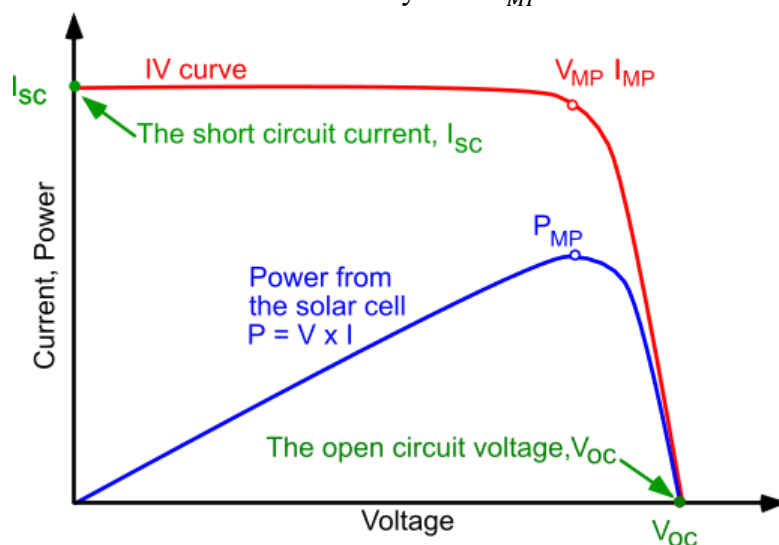


Obrázek 16: Princip technologie Spray coating[26]

6. Testování vlastností solárních článků

6.1. Testování účinnosti solárních článků

Solární článek lze charakterizovat voltampérovou charakteristikou, která zobrazuje základní charakteristiky solárního článku. Významnými body této charakteristiky jsou její krajní body, které vyznačují zkratový proud I_{SC} a napětí naprázdno V_{OC} . Tato charakteristika je zobrazena na obrázku 17 červeně. Dalšími důležitými parametry, které lze z VA charakteristiky získat je výkonová křivka (na obrázku 17 modře) zobrazující průběh výkonu na odebíraném proudu. Z té je možné určit bod maximálního výkonu P_{MP} .



Obrázek 17: Voltampérová charakteristika solárního článku [29]

Z výše uvedených veličin lze vypočítat faktor plnění (FF, fill factor), který je definován jako poměr maximálního odebíraného výkonu ku násobku zkratového proudu a napětí na prázdko. Vztah pro výpočet faktoru plnění je

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

(rovnice 1)

Nejčastěji využívaným parametrem pro porovnávání vlastností solárního článku je jeho účinnost přeměny energie, kterou lze vypočítat jako poměr vstupní a výstupní energie, vztah pro výpočet účinnosti solárního článku je

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{in}}$$

(rovnice 2)

Standardní měření je prováděno pod simulovaným slunečním zářením AM 1,5G a teplotě 25°C. Záření AM 1,5G odpovídá záření slunce které je 41° nad horizontem dopadající na solární panel, který je vůči horizontu nakloněn o 37°.[29]

6.2. Testování životnosti solárních článků

Ideální životnost solárního článku by měla dosahovat 25 let. Jelikož není reálné po tak dlouhou dobu testovat solární články byly vyvinuty takzvané zrychlené testy stárnutí. Mezinárodní elektrotechnická komise navrhla testovací protokol 61646, který byl původně určen pro testování křemíkových článků. V současnosti se čím dál tím více využívá k testování a certifikaci solárních panelů 3. generací, jako jsou PSCs a DSSCs.

Během testování podle IEC 61646 je solární článek vystaven UV záření, opakovaným změnám teploty v rozmezí -40 °C až 80°C a relativní vlhkosti 85 %.

7. Zhodnocení možnosti masové výroby inovativních solárních článků článků v EU

K provedení studie možnosti masové výroby solárních článků v Evropské unii byl vybrán modelový perovskitový solární článek. Nejpravděpodobnějším způsobem masové výroby perovskitových solárních článků bude roll-to-roll proces. Při sestavování modelového článku byl kladen důraz na možnost výroby tímto způsobem. Z tohoto důvodu byl vybrán průhledný flexibilní vodivý podklad ITO-PET, který je dostatečně flexibilní pro tento způsob výroby. Jelikož je poměrně složité komplexně posoudit možnost masové výroby, zaměřím se v této části zejména na dostupnost materiálů pro výrobu obou článků. Dalším klíčovým faktorem pro možnost masové výroby této technologie je dostupnost technologického vybavení. Ostatní faktory, jako je cena práce, cena elektrické energie, pozemků pro výstavbu výrobních zařízení atd. budou zanedbány.

Pro elektronovou transportní vrstvu perovskitového solárního panelu byl vybrán materiál TiO_2 , perovskitovou absorpční vrstvu perovskit $MAPbI_3$, děrovou transportní vrstvu Spiro-Ometad a pro protielektrodu uhlík. Jako způsob nanášení jednotlivých vrstev byla zvolena technologie slot-die coating. Jedna výrobní linka se skládá celkem z 5 modulů. V prvním modul slouží k čištění flexibilního podkladu, zbylé čtyři muly se skládají ze slot-die coateru a žihací pece. Na trhu existuje několik společností, které se touto technologií zabývají, a ve svém portfoliu nabízí plně automatické výrobní linky s možností konfigurace dle potřeb objednavatele. Mezi firmy zabývající se návrhem a výrobou slot-die výrobních linek patří například čínská společnost Xiamen Simy Equipment Limited nebo dánská společnost FOM technologies. Bohužel se nepodařilo dohledat ani řádově ceny výrobních linek. Jelikož se podařilo dohledat několik výrobců a jedná se o modulové výrobní linky, lze očekávat, že jejich pořizovací cena nebude bránit zahájení masové výroby v Evropské unii. [10]

TiO_2 je běžně dostupnou látkou, v průmyslu se běžně využívá k výrobě barviv a kosmetiky. V evropské unii se vyrábí 20 % světové produkce tohoto materiálu. Mezi největší evropské producenty patří slovinská společnost Cinkarna a česká společnost Precheza. [30, 31]

Spiro-OMeTAD ($C_{81}H_{68}N_4O_8$) je nejčastěji využívaná látka pro výrobu HTL vrstev v perovskitových solárních člancích. Jedná se o látku s velmi složitým složením a postupem výroby. K její výrobě se nevyužívají žádné vzácné ani drahé materiály. Hlavní nevýhodou Spiro-OMeTAD je jeho cena, která se v současnosti pohybuje v rozmezí 13 až 15 tisíc Kč za 1 g. I přes takto vysokou cenu je Spiro-OMeTAD využit ve většině laboratorně vyrobených vzorcích, a to převážně pro jeho výborné vlastnosti. Tento materiál je poměrně nový a lze počítat pokles jeho ceny po optimalizaci výrobního postupu, ve článku publikovaném v periodiku ACS Sustainable Chemistry and Engineering byl navržen inovativní výrobní postup, který by mohl tento materiál zlevnit až o 80 %, což by umožnilo využívat Spiro-Ometad pro průmyslovou výrobu PSC. [32]

Perovskit $MAPbI_3$ lze připravit smícháním methylamonium jodidu (CH_3NH_3I) a jodidu olovnatého (PbI_2). Obě tyto látky jsou v Evropské unii dostupné. Jodid olovnatý je běžně dostupná chemikálie, kterou v EU vyrábí německá společnost Merck a Thermo scientific.

Methylamonium jodid je amonná sůl, v Evropské unii se nepodařil dohledat žádný větší producent. Tento materiál však lze jednoduše vyrobit reakcí roztoku methyloaminu v ethanolu a roztoku kyseliny chlorovodíkové s vodou. [[33]

Všechny výše zmíněné látky jsou v prostředí EU dostupné. Ethanol je běžně dostupná látka, které se v Evropské unii ročně vyprodukuje 50 milionů litru v 55 rafineriích. HCL je v evropské unii běžně produkovanou chemikálií, největším evropským producentem kyseliny chlorovodíkové v je společnost Kuhlman Europe, dalším evropským výrobcem je například PCC grupe. Methylamin v evropské unii vyrábí např. penta chemicals či německá společnost Carl Roth.

Pro výrobu protielektrody byla zvolena vrstva vyrobená z grafitu. Oproti kovovým elektrodám vyrobených ze zlata, stříbra nebo platiny má uhlík výhodu zejména v jednodušším nanášení, nižší ceně a nehrozí zde koroze této vrstvy. Uhlík byl vybrán také pro jeho dostupnost. Většina grafitu dostupného na globálním trhu pochází z Číny. V posledních letech se však uvažuje o obnovení těžby na území EU nebo o možnosti syntetické výroby grafitu, které se v současnosti věnují německé a francouzské společnosti. Do budoucna tak lze předpokládat dostupnost grafitu pro výrobu protielektrody perovskitových solárních článků ze zdrojů vytěžených nebo vyrobených na území Evropské unie.

ITO-PET flexibilní průhledný podklad je pro masovou výrobu PSCs vhodnější než FTO sklo. Hlavním kritériem je flexibilita tohoto podkladu a také nižší cena. Jak je již z názvu patrné, ITO-PET tvoří dvě vrstvy. A to polyethylene terephthalát, který je např. využíván k výrobě potravinářských obalů. PET je v EU běžně vyráběn. Mezi největší evropské producenty patří SABIC, Indorama Ventures Public Company Limited a BASF SE. Druhá vrstva je složena z vrstvy oxidu inditého a oxidu cíničitého. V evropské unii produkuje tuto látku například společnost ROTH.

Z výše popsaných informací je patrné, že z materiálového hlediska je v Evropské unii masová výroba perovskitových solárních článků teoreticky možná. K výrobě PSCs se nepoužívají žádné vzácné kovy ani jiné vzácné materiály. Pro výrobu většiny vstupních chemikálií lze v Evropské unii nalézt potenciální dodavatele.

V prostředí Evropské unie a jejího nejbližšího okolí již nyní existuje několik společností zabývajících se výrobou PSCs i DSSCs článků v menším měřítku. Je tedy patrné, že výchozí podmínky pro zahájení masové výroby v EU jsou. Hlavním kritériem, pro úspěšné zahájení masové výroby je cena výsledného produktu. Výroba PSCs začíná i v jiných světových státech. V budoucnu lze očekávat konkurenci zejména z Asijských zemí, které zaznamenávají veliký pokrok ve vývoji a komercializaci této technologie.

8. Experimentální výroba solárních článků

8.1. Úvod do praktické části

Cílem praktické části bakalářské práce je experimentální výroba inovativních solárních článků a následné otestování jejich vlastností. Byla provedena experimentu, během kterého byly vyrobeny dye sensitized a perovskitové solární články. Perovskitovou solární technologii zde reprezentuje rovinný n-i-p PSC, jehož výrobu je možné uskutečnit i v neprofesionálních podmínkách a v neposlední řadě je nejméně nákladná. ETL tohoto článku je tvořena vrstvou TiO_2 , pro výrobu perovskitové vrstvy byl zvolen perovskit $MAPbCl_3$, vrstva HTL je tvořena Spiro-OMeTAD a jako materiál proti elektrody byl zvolen grafit.

DSSCs články jsou specifické velkou variabilitou dostupných barviv pro jejich výrobu. Tento experiment měl za cíl nejenom výrobu DSSC, ale také komparaci komerčně využívaných anorganických a organických barviv s přírodními barvivy. Jako anorganické barvivo bylo zvoleno barvivo Ruthenizer 535, organické barvivo Sensidizer SQ2 a dvěma zástupci přírodních barviv byly extrakty z ibišku a z Červené řepy a špenátu. Pro všechny výše zmíněné články bylo jako průhledný vodivý podklad zvoleno FTO sklo.

Experiment se uskutečnil v pátek 31.3. 2023 a v pátek 14.4. 2023 v prostoru laboratoří Fyzikálního ústavu A.V. ČR pod odborným dohledem experimentálních fyziků. Předcházela tomu teoretická příprava a nákup potřebných materiálů. Bylo nezbytné důkladně připravit postup práce a konzultovat s pracovníky možnosti a limity přístrojů v laboratoři. Bylo nutné provést několik úprav, které jsou popsány v následujících kapitolách. Následně byly provedeny doplňkové experimenty, které se uskutečnily 16.5.2023 v solární laboratoři Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze.

8.2. Vybavení laboratoře

Pro účely experimentu byla vybrána laboratoř Fyzikálního ústavu A.V. ČR. Nachází se na adrese Cukrovarnická 112/10 Praha 6. Rozhodujícími kritérii pro výběr této laboratoře byla její vybavenost, dopravní dostupnost a v neposlední řadě ochota personálu participovat na experimentu bakalářské práce.

Přestože laboratoř není primárně určena pro výrobu solárních článků, nachází se zde veškeré vybavení potřebné pro tyto účely. Jedná se o prostor, který disponuje složitými filtračními systémy, aby bylo dosaženo čistého prostředí a zamezení znečištění a znehodnocení produktů. Před samotným vstupem je nezbytné využít čisté antistatické pláště, přezůvky a pokrývku hlavy. V předsáli se nachází vzduchová sprcha, která příchozí zbaví prachových částic.

Z přístrojů využitých pro výrobu článků byla pro mě stěžejní přítomnost spin coateru, který je potřebný pro rovnoměrné nanášení vrstev perovskitového článku. Spin coater KarlSuss CT60 je určený pro skla do velikosti 5x5 cm, což přesně odpovídalo rozměru pořízených FTO skel. Další využitá zařízení byla hot plate Stuart SD 160 využitá pro žíhání nanesených vrstev. Pro odměření množství chemikálií byly využity odměrné válce a váha Denver Instrument S-64 s citlivostí 0,1 mg. Manipulace s chemikáliemi probíhala v digestoři. Pro kontinuální míchání

připravených roztoků sloužil Orbital Shaker PSU-10i. K dispozici mi bylo také chemické sklo a náčiní, jako např. jednorázové pipety, pinzety, kádinky a Petriho misky. Na obrázku 18 je zobrazeno vybrané využití laboratorní vybavení.

Autor považuje za důležité zmínit, že všechny fotografie pořízené v laboratoři mají žluté zbarvení. Je tomu tak kvůli fotorezistům, se kterými se v laboratoři často pracuje, a jiné, než žluté světlo by je mohlo poničit.

K dispozici mi také bylo několik chemikálií, kterými laboratoř disponuje (výčet v kapitole 8.3.), a také dusíková pistole využitá pro očištění sklíček.



Obrázek 18: Využití laboratorní vybavení: (A) spin coater KarlSuss CT60, (B) váha Denver Instrument S-64, (C) Orbital Shaker PSU-10i.

8.3. Nákup chemikálií a materiálů

Chemikálie potřebné pro výrobu zvolených solárních článků bývají často velmi specifické. Proto bylo nutné uskutečnit průzkum trhu s cílem najít vhodného prodejce. Ukázalo se, že nejvhodnějším výrobcem je švýcarská společnost Solaronix, která se mimo prodeje chemikálií zabývá také výrobou DSSCs a PSCs. Běžně dostupné chemikálie byly pořízené od české společnosti P-Lab. Přehled jednotlivých látek je vypsán v tabulce č. 1.

Při plánování experimentu je nutné myslet na včasné objednání potřebných látek. Dodací lhůty jednotlivých dodavatelů se velmi liší. V tomto případě došlo k narušení časového harmonogramu vlivem zpoždění dodávky $PbCl_3$. Dodací lhůta tohoto materiálu se vyšplhala na 5 týdnů.

Tabulka 1: Využité chemikálie a materiály

	obchodník	výrobce	cena	Množství
<i>FTO sklo</i>	Solaronix SA	Solaronix SA	45 CHF	10 ks
Methylammonium iodide	Solaronix SA	Solaronix SA	23 CHF	5 g
Spiro-OMeTAD	Solaronix SA	Solaronix SA	86 CHF	100 mg
Iodolyte HI-30	Solaronix SA	Solaronix SA	25 CHF	10 ml
Sensidizer SQ2	Solaronix SA	Solaronix SA	34 CHF	50 mg
Ruthenizer 535	Solaronix SA	Solaronix SA	19 CHF	100 mg
Ethylalkohol	P-LAB	SEVEROCHEMA	91 Kč	1 l
Dimethylformamid	P-LAB	PENTA	258 Kč	1 l
Oxid titaničitý	P-LAB	ROTH	567 Kč	100 g
Chlorid olovnatý	P-LAB	PENTA	807 Kč	100 g
Chlorbenzen *	-	PENTA	-	-
Aceton*	-	PENTA	-	-
Izopropylalkohol*	-	PENTA	-	-
HCL*	-	PENTA	-	-

*poskytnuto ze zásob Fyzikálního ústavu A.V. ČR

8.4. Bezpečnost práce

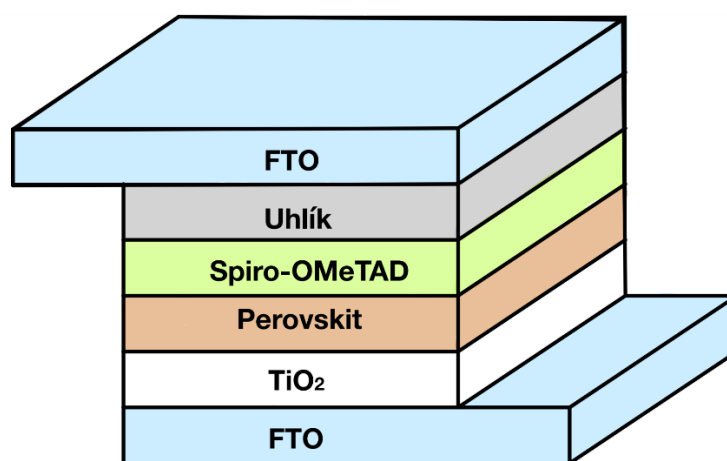
Při manipulaci s chemikáliemi bylo třeba postupovat podle bezpečnostních pokynů výrobců jednotlivých látek. Během celého experimentu bylo nutné pracovat v ochranných rukavicích, plášti a brýlích. Při manipulaci s chloridem olovnatým bylo nezbytné chránit dýchací cesty respirátorem. Veškerá manipulace s materiály v práškové formě probíhala v odvětrávané digestoři.

9. Experimentální výroba PSC

Při výrobě perovskitového solárního článku bylo postupováno podle manuálu v příloze 1 bakalářské práce. Tento postup byl přeložen a upraven z práce Oscara Eklunda Introduction to Perovskite Solar Cells in an Undergraduate Laboratory Exercise. [34]

Z důvodu nedostupnosti některých chemikálií došlo k mírným úpravám pracovního postupu. Pro výrobu HTL vrstvy byl na místo Thiokyanatan sodného vybrán Spiro-OMeTAD. Kvůli nedostupnosti jodidu sodného potřebného pro přípravu perovskitu $MAPbI_3$ byl využit perovskit $MAPbCl_3$, který lze též využít při výrobě PSC.

Vyrobený solární článek byl tvořen dvěma FTO skly, elektronovou transportní vrstvou tvořenou TiO_2 , perovskitovou vrstvou z perovskitu $MAPbCl_3$, děrovou transportní vrstvou ze Spiro-OMeTAD a grafitovou elektrodou. Architektura vyrobeného solárního článku je zobrazena na obrázku 19.

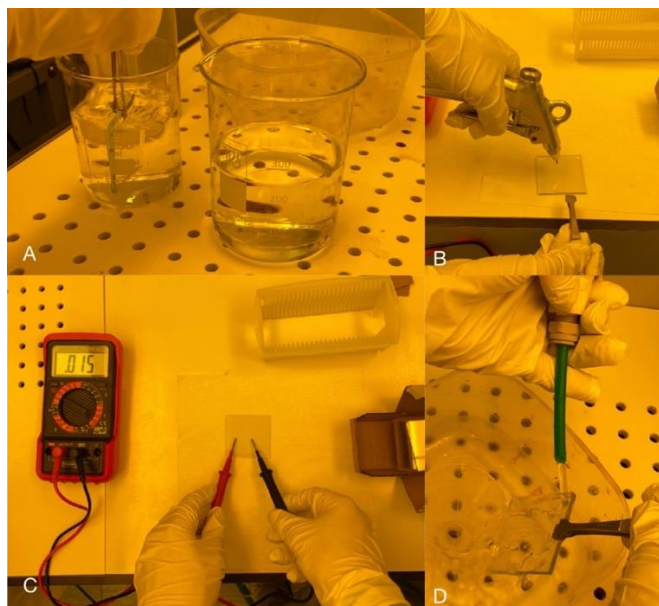


Obrázek 19: Architektura vyrobeného perovskitového článku

9.1. Příprava FTO skla

FTO sklo bylo před nanášením vrstev nutné očistit od nečistot. Všechna skla byla nejprve omyta v acetonové lázni a následně v lázni z izopropylalkoholu. Poté byla skla opláchnuta vodou z reverzní osmózy a vysušena pomocí proudu dusíku.

Následně bylo třeba identifikovat vodivou a nevodivou stranu skel. Toho bylo dosaženo přiložením svorek multimetru, nastaveného na odpor 2000Ω , na plochu skel. Při přiložení svorek k vodivé straně skla ukazoval multimetr hodnotu 0,015. Naopak při přiložení svorek na nevodivou stranu skla zobrazil multimetr hodnotu 1. Na obrázku 20 je zobrazen postup přípravy FTO skel.



Obrázek 20: Příprava FTO skel (A) čištění skel v acetonu (levá nádoba) a izopropylalkoholu (pravá nádoba), (B) sušení FTO skel proudem dusíku, (C) identifikování vodivé strany skla pomocí multimetru, (D) oplachování osmózou.

9.2. Příprava roztoků

Nejprve bylo třeba připravit roztoky pro nanášení jednotlivých vrstev. Celkem byly připraveny tři roztoky. Roztok TiO_2 s ethanolem a HCL, roztok perovskitu $MAPbCl_3$ v dimethylformamidu a roztok Spiro-OMeTAD v dimethylformamidu. Množství jednotlivých látek je uvedeno v tabulce č. 2.

Roztoky bylo třeba neustále promíchávat, aby nedošlo k usazování částic na dně nádoby, k míchání byl využit přístroj Orbital Shaker PSU-10i. Roztok perovskitu byl pro snadnější rozpuštění MAI a $PbCl_2$ v dimethylformamidu umístěn na hotplate nastavený na teplotu $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabulka 2: Roztoky potřebné pro výrobu perovskitového solárního článku

Prekursor	Látka	Množství
TiO_2	TiO_2	850 mg
	HCL	5 mg
	Ethanol	15 ml
$MAPbCl_3$	MAI	317 mg
	$PbCl_2$	556 mg
	DMF	2 ml
Spiro-OMeTAD	Spiro-OMeTAD	20 mg
	DMF	2 ml

9.3. Nanášení vrstev – Spin coating

Očištěné FTO sklo bylo z jedné čtvrtiny přelepeno lepící páskou a položeno do středu spin coateru. Sklo bylo přichyceno vytvořením podtlaku. Kvůli poměrně velkým rozměrům bylo nutné sklo vycentrovat přesně na střed, aby nedošlo k jeho uvolnění a zničení. Pomocí pipety bylo na FTO sklo nanášeno 300 μl roztoku TiO_2 . Po nanášení roztoku byl spin coater nastaven na 3000 otáček a zapnut po dobu 30 sekund. Po doběhnutí programu byla odstraněna lepící páska a sklo bylo přesunuto na hotplate předehřátý na 300 °C po dobu 10 minut. Po žíhání bylo nutné nechat sklo na vypnutém hot platu, aby bylo zajištěno pomalé chladnutí. U prvního skla tak učiněno nebylo a vlivem teplotního šoku po několika minutách prasklo.

V dalším kroku byla na vrstvu TiO_2 nanášena vrstva perovskitu. Nepotažená část FTO skla byla přelepena lepící páskou a sklo bylo umístěno na spin coater. Následně bylo pipetou nanášeno 300 μl roztoku MAPbCl_2 a 900 μl chlorbenzenu. Poté byla sundaná lepící páska a perovskitová vrstva byla žíhána na hot platu při 100 °C po dobu 20 minut. Jelikož teploty žíhání nebyly tak vysoké bylo možné nechat skla chladnout při pokojové teplotě.

Poslední nanášenou vrstvou byla vrstva Spiro-OMeTAD. Na perovskitovou vrstvu bylo nanášeno 300 μl roztoku při 4 000 otáčkách po dobu 30 sekund. Po nanášení vrstvy Spiro-OMeTAD bylo sklo žíháno při 100°C po dobu 15 minut.

Solární článek byl dokončen nanášením malého množství grafitu na čisté FTO sklo. Obě elektrody k sobě byly připojeny pomocí svorek na papír. V tabulce č. 3 jsou vypsány parametry nanášení jednotlivých vrstev.

Tabulka 3: Parametry nanášení jednotlivých vrstev

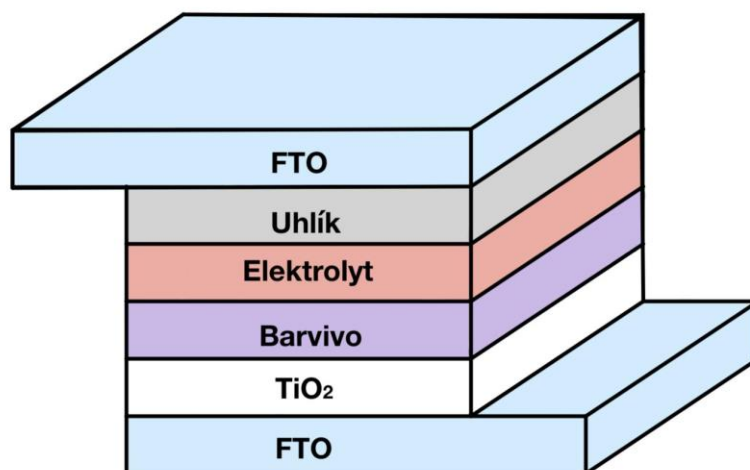
Precursor	Množství		Spin coating		žíhání
	roztoku				
	[μl]	Čas [s]	Otáčky [min^{-1}]	Čas [min]	Teplota [°C]
TiO_2	300	30	3000	10	300
MAPbCl_2	300	30	4000	20	100
Chlorbenzen	900	-	-	-	-
Spiro-OMeTAD	300	30	4000	15	100

10. Experimentální výroba DSSCs

Při výrobě dye sensitized solárního článku bylo postupováno podle manuálu v příloze 2 bakalářské práce. Tento postup byl přeložen a upraven z článku Make a Grätzel cell, vydaného britskou královskou chemickou společností. [35]

Během experimentu bylo vyrobeno celkem 7 solárních článků lišící se využitým barvivem a způsobem nanášení vrstvy TiO_2 . Pro experiment byly zvoleny čtyři barviva. Jedno anorganické, jedno organické a dvě přírodní barviva. Zástupce anorganických barviv bylo barvivo Ruthenizer 535, které je jedním z nejčastěji využívaných barviv určených pro výrobu DSSCs. Jako zástupce organických barviv bylo vybráno barvivo Sensidizer SQ2. Přírodní barviva reprezentovalo barvivo extrahované z červené řepy a špenátu a barvivo extrahované z květů ibišku. Architektura článku je zobrazena na obrázku 21.

Zvolenými technologiemi pro nanášení TiO_2 vrstvy byla metoda blade coating a spin coating.



Obrázek 21: Architektura dye sensitized solárního článku

10.1. Příprava barviv

Pro výrobu DSSCs byla připravena celkem čtyři barviva. Při přípravě organického a anorganického barviva bylo postupováno podle pokynů výrobce. Roztok anorganického barviva byl připraven rozpuštěním 30 mg Ruthenizer 535 v 25 ml ethanolu. Roztok organického barviva byl připraven rozpuštěním 20 mg Sensidizer SQ2 v 15 ml ethanolu. Ibiškové barvivo bylo připravené louhováním 10g ibišku ve 100 ml ethanolu po dobu 24 hodin. Poslední využití barvivo bylo připravené louhováním 30 g červené řepy a 20 g špenátu ve 100 ml ethanolu po dobu 24 hodin. V tabulce č. 4 je vypsáno složení jednotlivých barviv.

Tabulka 4: Roztoky potřebné pro výrobu DSSCs

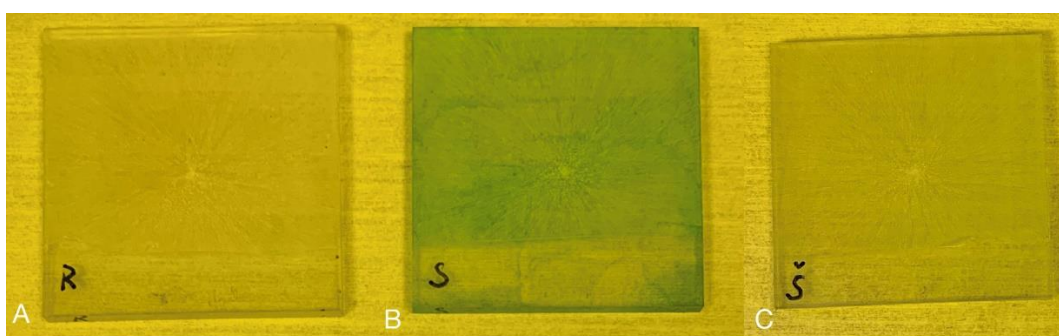
Precursor	Látka	Množství
Ruthenizer 535	Ruthenizer 535	30 mg
	ethanol	25 ml
Sensidizer SQ2	Sensidizer SQ2	20 mg
	ethanol	15 ml
Přírodní barvivo 1	Špenát	20 g
	Červená řepa	30 g
	ethanol	100 ml
Přírodní barvivo 2	Květy ibišku	10 g
	Etahnol	100 ml

10.2. Nanášení vrstev metodou spin coating

Nanášení TiO_2 vrstvy probíhalo pomocí spin coateru obdobně, jako při výrobě PSCs a detailně je popsána v kapitole 9.3.

FTO skla s nanesenou vrstvou TiO_2 byla po vychladnutí naložena do Petriho misek s připravenými barvivy a byla v nich ponechána po dobu jedné hodiny. Po uplynutí této doby byla skla vyjmuta z nádob a opatrně očištěna od přebytečného barviva, které nebylo absorbováno do vrstvy TiO_2 . Na obrázku 22 je zobrazen výsledný vzhled vrstev.

Články byly dokončeny nanesením tenké vrstvy grafitu na zbylá FTO skla, na která nebyla nanesena žádná vrstva. Poté byly obě části solárního článku přiloženy vodivými stranami k sobě a spojeny dohromady pomocí svorek na papír.



Obrázek 22: Nanesené vrstvy DSSCs: Ruthenizer 535 (A), Sensidizer SQ2 (B), Přírodní barvivo (C)

10.3. Nanášení vrstev metodou blade coating

Pro nanášení vrstev metodou blade coating bylo nejprve nutné připravit pastu TiO_2 . Existuje několik rozpouštědel, pomocí kterých lze tuto pastu vyrobit. Obecný postup výroby této pasty byl následovný. TiO_2 prášek byl umístěn do misky a postupně bylo přidáváno rozpouštědlo, dokud pasta nedosáhla vhodných vlastností. Příliš tekutá pasta tvoří nerovnoměrný povrch, naopak příliš hustá pasta se lepí k nástroji, kterým je nanášena. Pastu je nutné důkladně promíchat, aby v ní nezůstaly hrudky, které se po vyžhání pasty často odlepují od podkladu.

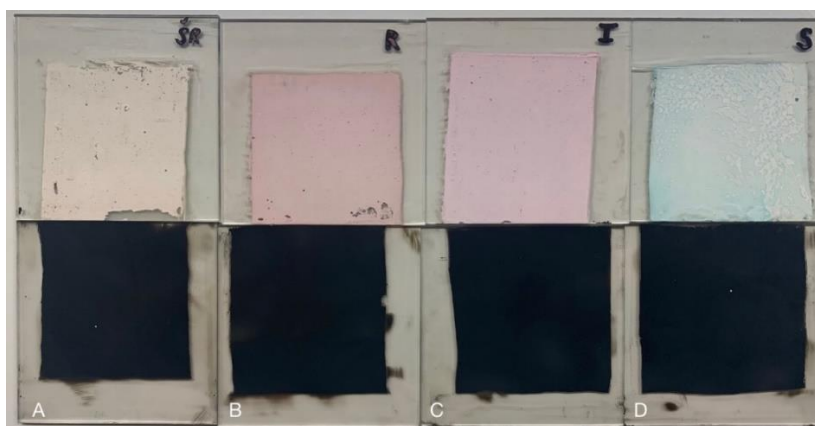
Pro účely tohoto experimentu byly připraveny tři vzorky TiO_2 pasty. První vzorek byl vyroben přidáním ethanolu, druhý vzorek přidáním HCL a třetí vzorek přidáním vinného octa. První vzorek byl pro nanášení nevhodný, TiO_2 se v ethanolu špatně rozpouštěl. Druhý vzorek měl vhodné vlastnosti pro nanášení, ale při následném žhání všechny vzorky vyjma jednoho popraskaly. Třetí vzorek byl připravena překvapivě nejlepší a vrstva nanesená pastou z TiO_2 a vinného octa jako jediná přežila žhání a následné chladnutí.

Očištěná FTO skla byla ze tří stran přilepena k podložce vodivou stranou vzhůru. Lepicí páska na bocích určuje tloušťku nanesené vrstvy, přelepení horní strany FTO skla bylo z důvodu vytvoření prostoru pro připojení testovacího zařízení.

Na horní stranu skla bylo nanášeno dostatečné množství TiO_2 (je lepší nanést pasty více, při nedostatečném množství nedojde k rovnoměrnému pokrytí celé plochy skla) a pomocí skleněné tyčinky jedním tahem ze shora dolů roznesené po odkrytém povrchu. Před odlepením pásky byla vrstva ponechána 10 minut tvrdnout.

Po 10 minutách byla skla přenesena do pece vyhřáté na 250 °C a byla žhána po dobu 20 minut. Poté byla z pece vyjmuta a ponechána na ohřáté podložce, aby bylo dosaženo postupného chladnutí. Ohřátá skla i vrstva TiO_2 by mohla vlivem teplotního šoku popraskat.

Zcela vychladnutá skla byla umístěna do připravených barviv a byla zde ponechána po dobu 24 hodin. Po uplynutí této doby byla skla očištěna od přebytečného barviva. Články byly dokončeny nanášením tenké vrstvy grafitu na zbylá FTO skla, na která nebyla nanášena žádná vrstva. Poté byly obě části solárního článku přiloženy vodivými stranami k sobě a spojeny dohromady pomocí svorek na papír. Na obrázku 23 je zobrazen výsledný vzhled jednotlivých vrstev.



Obrázek 23. Elektrody DSSCs (A) špenát+řepa (B) Ruthenizer 535 (C) ibišek (D) Sensidizer SQ2

11. Experimentální testování solárních článků

Solární články byly ihned po výrobě otestovány pro ověření funkčnosti pod osvitem 6 W LED. Pomocí multimetru byly naměřeny zkratové proudy a napětí nakrátko. Naměřené hodnoty pro články vyrobené metodou blade coating jsou vypsány v tabulce č. 5 a hodnoty pro články vyrobené metodou spin coating jsou zobrazeny v tabulce č. 6.

Tabulka 5: Naměřené zkratové proudy a napětí na prázdko článků vyrobených metodou blade coating

Článek	I_{sc} [mA]	U_{oc} [mV]
Ruthenizer 535	0,02032	500
Sensidizer SQ2	0,00332	140
Ibišek	0,00964	240
Špenát + řepa	0,0002	0

Z naměřených dat je patrné, že nejlepších parametrů dosahuje článek vyrobený s pomocí komerčního anorganického barviva Ruthenizer 535. Tento výsledek byl očekáván, jelikož právě články s anorganickými barvivy dosahují dlouhodobě nejlepších parametrů.

Velmi dobře si vedl článek vyrobený pomocí Ibiškového barviva, u kterého byl naměřen třikrát větší zkratový proud a téměř dvakrát větší napětí na prázdko, než tomu bylo u článku vyrobeného pomocí komerčního organického barviva Sensidizer SQ2.

Nejméně přesvědčivý výsledek byl naměřen u článku vyrobeného pomocí barviva z řepy a špenátu. Byly sice naměřeny velmi nízké hodnoty proudů, ale napětí na prázdko bylo nulové. Oproti zbylým třem článkům jsou tyto hodnoty téměř zanedbatelné.

Tabulka 6: Naměřené zkratové proudy a napětí na prázdko článků vyrobených metodou spin coating

Článek	I_{sc} [mA]	U_{oc} [mV]
Ruthenizer 535	0,00126	0
Sensidizer SQ2	0,0026	0
Špenát + řepa	0,00038	0

U solárních článků vyrobených metodou spin coating na první pohled zaujmou nulové hodnoty naměřených napětí na krátko. Vrstvy TiO_2 nanesené metodou spin coating byly o

poznání tenčí než vrstvy nanesené metodou blade coating. Lze usuzovat, že v tomto případě byla vrstva TiO_2 příliš tenká, což způsobilo již zmíněná nulová napětí naprázdno.

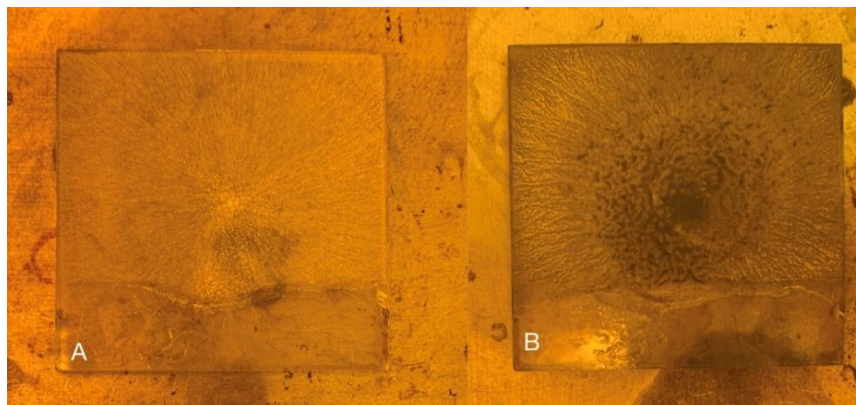
Perovskitových solárních článků bylo vyrobeno celkem 6. Během prvního experimentu byl vyroben jeden článek podle pracovního postupu uvedeného v příloze 1. Při prvotním ověření funkčnosti byly naměřeny nulové hodnoty zkratových proudů i napětí nakrátko. Byl tedy proveden druhý experiment, během něhož byly vyrobeny další dva články vyrobené metodou spin coating s upravenou přípravou titanového prekurzoru. Jelikož byla jako hlavní příčina nefunkčnosti vyhodnocena nehomogenita vrstvy oxidu titaničitého, byly vyzkoušeny dva alternativní způsoby nanášení této vrstvy. Dva solární články byly vyrobeny napařením vrstvy titanu, který byl následně zoxidován titanovou plazmou. U 6. článku byla vrstva oxidu titaničitého nanášena metodou blade coating obdobně, jako tomu bylo u DSSCs. Ostatní vrstvy byly nanášeny stejným způsobem, jako tomu bylo u prvních třech vzorků. I tyto články se při měření ukázali jako nefunkční, pro přehlednost jsou jejich naměřené hodnoty zobrazeny v tabulce číslo 7. Vzhledem k tomu, že naměřené hodnoty článků byly totožné, je v tabulce vždy uveden jen jeden údaj pro každou metodu nanášení.

Tabulka 7: *Naměřené zkratové proudy a napětí na prázdko perovskitových solárních článků*

Článek	I_{sc} [mA]	U_{oc} [mV]
PSCs (spin coating)	0	0
PSCs (napařování + oxidace)	0	0
PSCs (blade coating)	0	0

Nefunkčnost prvního perovskitového článku byla s největší pravděpodobností způsobena nevhodnou přípravou prekurzoru TiO_2 . Oxid titaničitý je špatně rozpustný v ethanolu a tvoří spíše suspenzi než roztok. Nanášená vrstva byla velmi nehomogenní, což se projevilo i do dalších nanášených vrstev. Na obrázku č24 (A) lze pozorovat radiální struktury, které následně

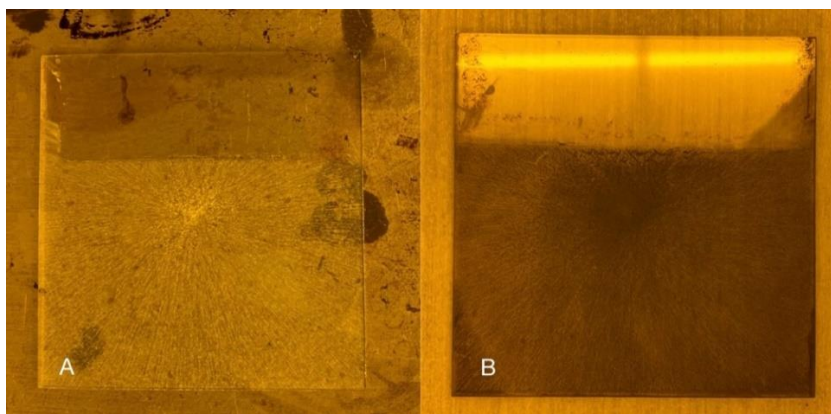
znemožnili rovnoměrné nanesení ostatních vrstev. V ideálním případě by měla být vrstva TiO_2 homogenní a bez těchto radiální struktur.



Obrázek 24: Vrstva TiO_2 (A) a vrstva perovskitu (B)

Během druhého experimentu byly provedeny úpravy při přípravě prekurzorů. Roztok TiO_2 byl připraven s přidáním většího množství HCL. Tím bylo dosaženo lepší rozpustnosti TiO_2 v ethanolu. Byl kladen roztok promícháván až do chvíle nanášení vrstvy na FTO sklo.

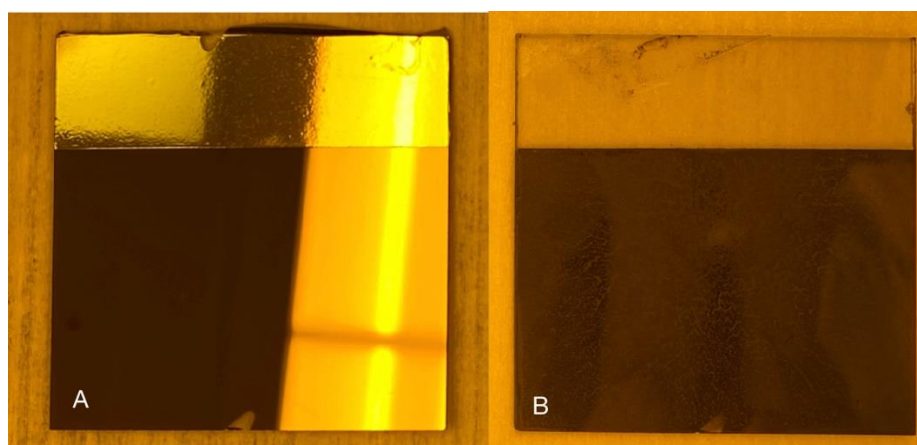
Upravena byla i příprava perovskitového prekurzoru, který byl před nanášením ohřát na $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby byla zlepšena rozpustnost $PbCl_3$ v ethanolu. Po těchto úpravách bylo dosaženo daleko rovnoměrnějšího nanesení obou vrstev. Tyto vrstvy jsou zobrazeny na obrázku 25. Z porovnání obrázků 23 a 24 je patrné, že pokrok byl znatelný.



Obrázek 25: Vrstva TiO_2 (A) a vrstva perovskitu (B)

I přes značné zkvalitnění obou vrstev se funkční perovskitový solární článek vyrobit nepodařilo. Neúspěch lze přikládat nejspíše malému množství pokusů. Bohužel časové možnosti neumožnili experiment znovu zopakovat a pokusit se prekurzory a metody nanášení dále vylepšovat. Další možností, jak vyrobit funkční perovskitový článek může být nakoupení již připravených prekurzorů. Existuje několik výrobců, kteří prodávají již namíchané prekurzory perovskitu i TiO_2 prodávají. Tato cesta je však dražší, než mnou zvolený přístup.

Při plánování druhého experimentu byl brán v potaz možný opětovný neúspěch při výrobě PSCs s vrstvou TiO_2 nanesenou metodou spin coating. Byly proto navrženy dva alternativní postupy nanášení vrstvy TiO_2 . Laboratoř, ve které byl experiment proveden disponuje zařízením na napařování kovových vrstev. Na FTO byla napařena vrstva titanu o tloušťce 80 μm , která byla následně zoxidována kyslíkovou plazmou. Tato metoda nebyla doposud zmíněna v odborné literatuře a autorovi práce přišlo zajímavé tuto techniku vyzkoušet. Napařením došlo k nanesení zcela homogenní a rovnoměrné vrstvy, na kterou byla pomocí spin coateru nanášena poměrně rovnoměrná vrstva perovskitu a následně Spiro-OMeTAD. Tento článek se však také jevil jako nefunkční. Nefunkčnost byla způsobena zejména nedostatečnou oxidací titanové vrstvy. Výsledný vzhled vrstev je zobrazen na obrázku 26.



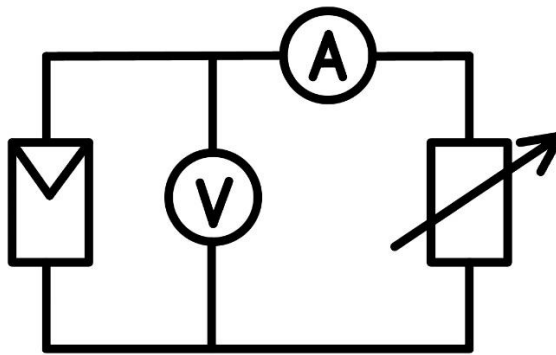
Obrázek 26: Vrstva TiO_2 (A) a vrstva perovskitu (B)

Posledním pokusem o výrobu perovskitového solárního článku byl článek, který měl být tvořen vrstvou TiO_2 , nanesenou metodou blade coating. Na tuto vrstvu měly být následně nanášeny vrstvy perovskitu a Spiro-OMeTAD metodou spin coating. Vrstva TiO_2 však byla vlivem zvolené metody nanášení tlustší, než je tomu běžné a odstředivými silami vzniklými na spin coateru popraskala a odštěpila se od povrchu. Lepších výsledků by mohlo být dosaženo nanášením i ostatních vrstev touto metodou, čímž by se předešlo poškození během rotování na spin coateru.

11.1. Měření účinnosti solárních článků

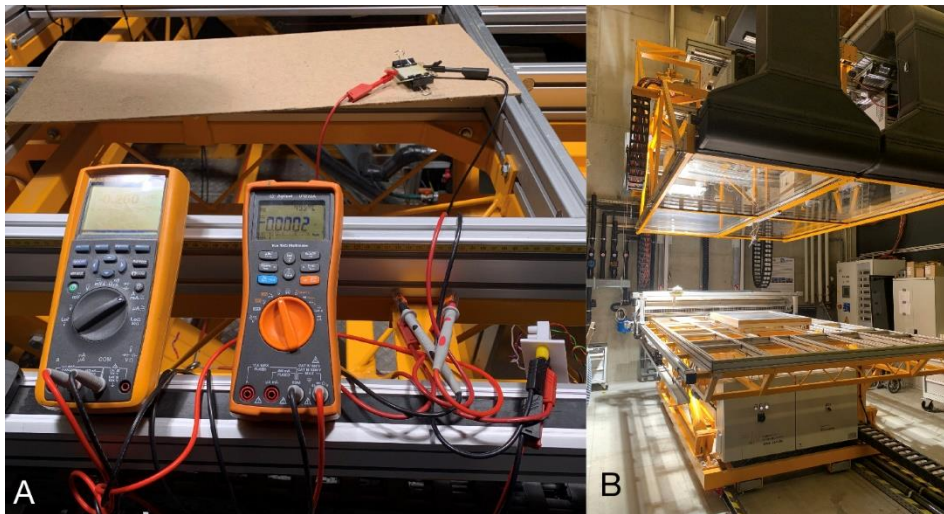
Pro měření účinnosti byly z vyrobených solárních článků vybrány tři s nejvyššími naměřenými zkratovými proudy a napětími nakrátko. Experimentální měření bylo provedeno v solární laboratoři nacházející se v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT.

Měřicí aparatura byla sestaven ze dvou multimetrů, multimetr Agilent U1272A byl nastavený na měření napětí a multimetr Fluke 289 nastavený na měření proudu a nastavitelného odporu s rozsahem 0 Ω až 100 Ω . Solární články byly k měřicí aparatuře připojeny pomocí krokodýlích svorek. Schéma měřicí aparatury je zobrazeno na obrázku 27.



Obrázek 27. Schéma měřicí aparatury

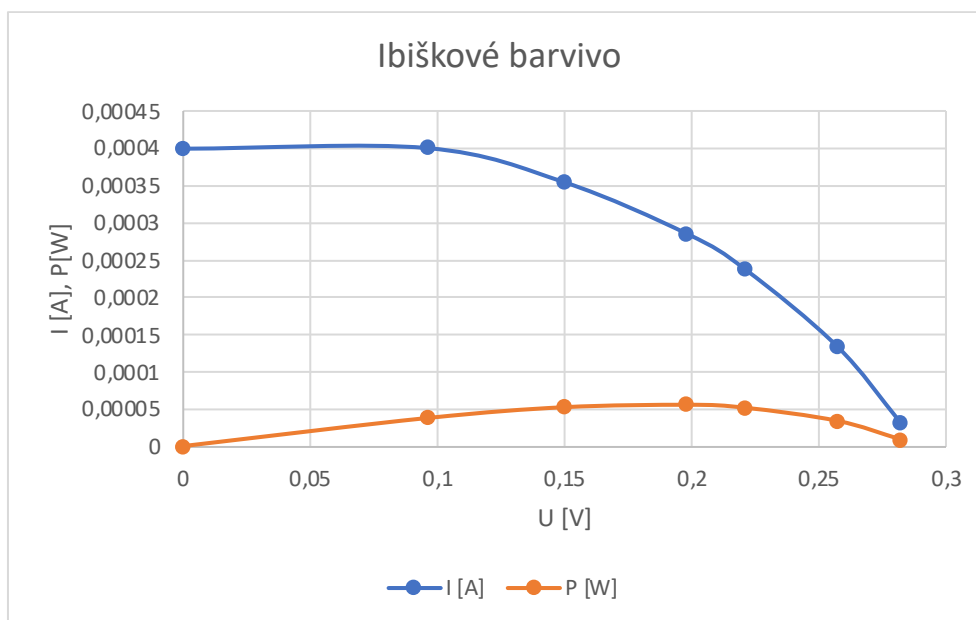
Měření bylo provedeno na slunečním simulátoru s umělým slunečním zářením pod osvitem 1100 Wm^{-2} . Kolmosti dopadajícího světla bylo dosaženo pomocí nastavení konstrukce solárního simulátoru sloužící pro upevnění testovaných zařízení a konstrukce nesoucí zdroj světla do vodorovné polohy. Na obrázku 28 (A) je zobrazeno fyzické rozložení měřicí aparatury a na obrázku 28 (B) solární simulátor.



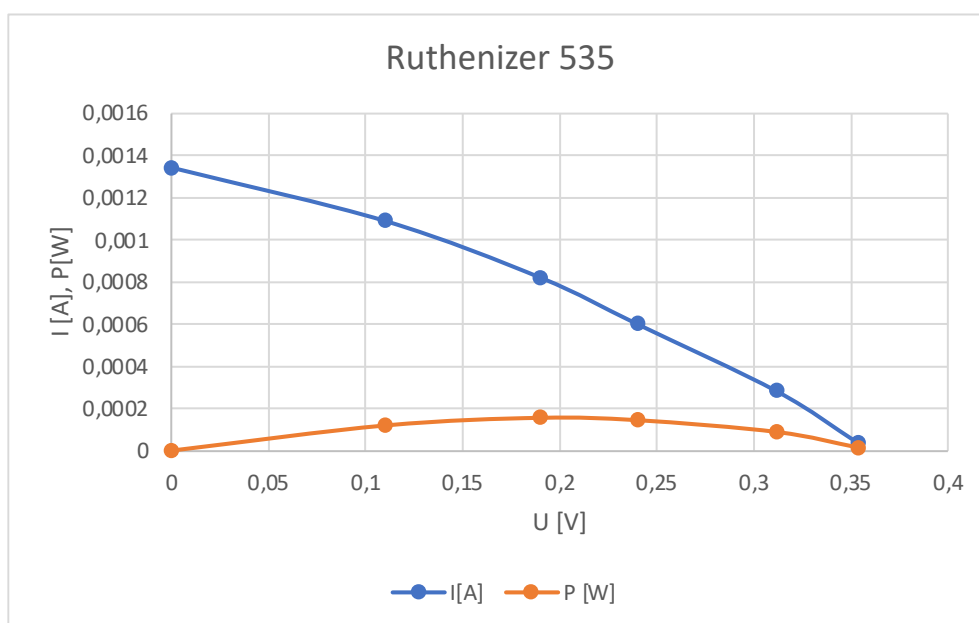
Obrázek 28: (A) měřicí aparatura (B) sluneční simulátor

12. Výsledky testování a diskuse

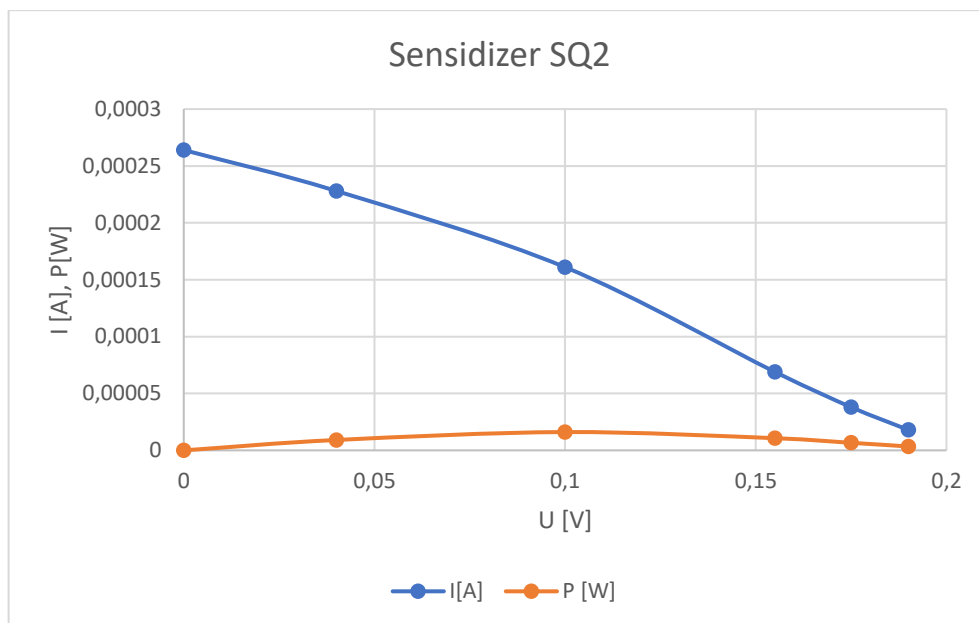
Testované solární články byly měřeny při konstantním osvětlení 1100 Wm^{-2} . Teplota článků byla 34°C . Z naměřených dat byly následně v programu excel sestaveny grafy VA charakteristik s výkonovými křivkami.



Obrázek 29. Voltampérová charakteristika solárního článku využívající ibiškové barvivo



Obrázek 30: Voltampérová charakteristika solárního článku využívající barvivo Ruthenizer 535



Obrázek 31: Voltampérová charakteristika solárního článku využívající barvivo Sensidizer SQ2

Následně byly z naměřených dat podle rovnic 1 a 2, uvedených v kapitole 6, vypočteny faktory plnění a účinnosti všech tří článků. Výsledky výpočtů jsou společně se zkratovými proudy a napětími na krátko vypsány v tabulce 7.

Tabulka 8: Charakteristické parametry testovaných článků

Článek	I_{sc} [mA]	U_{oc} [mV]	FF [%]	η [%]
Ruthenizer 535	1,34	354	32,8	0,0109
Ibišek	0,4	282	50,2	0,0034
Sensidizer SQ2	0,26	190	32,1	0,00099

Z naměřených a vypočtených dat je patrné, že nejvyšší účinnost má článek s anorganickým barvivem Ruthenizer 535, což odpovídá i teoretickým poznatkům z kapitoly 3.4, ve které je uvedeno, že právě články s anorganickým barvivem dosahují nejvyšších účinností. Druhou nejvyšší účinnosti dosáhl článek s ibiškovým barvivem. Obecně by článek s přírodním barvivem neměl svojí účinností převyšovat článek s průmyslově vyráběným organickým barvivem Sensidizer SQ2. Odchylna od teoretických poznatků mohla být způsobena výrobní vadou, která však nebyla na článku zpozorována.

Autor pokládá za vhodné upozornit na velmi nízkou účinnost vyrobených článků a vysvětlit důvody tohoto jevu. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak účinnost laboratorně vyrobených DSSCs dosahuje účinnosti v rozmezí 10 %-12 %. Tyto články jsou však vyrobeny v laboratořích přímo vybavených na jejich výrobu a autoři mají více zkušeností s výrobou

solárních článků. Dalším důvodem může být prodleva mezi výrobou solárních článků a jejich testováním.

Zlepšení výsledných parametrů by bylo možné dosáhnout využitím vhodnějších materiálů. Pro výrobu vrstvy TiO_2 je možné místo vlastní přípravy prekursoru zakoupit již namíchané TiO_2 pasty vyvinuté přímo pro aplikaci v DSSCs. Potenciál pro zlepšení je ve využití vhodnější protielektrody, kdy lze grafit nanesený metodou popsanou výše nahradit grafitovou pastou, nebo napařením zlaté nebo platinové vrstvy.

Z porovnání sestavených VA charakteristik je patrné, že nejvíce se ideální VA charakteristice zobrazené na obrázku 17 podobá VA charakteristika solárního článku s ibiškovým barvivem. VA charakteristikám odpovídají i vypočtené faktory plnění. Z dat zobrazených v tabulce 7 je patrné, že nejvyšší faktor plnění má právě článek s ibiškovým barvivem.

Nízké hodnoty faktoru plnění a skoro lineární VA charakteristika článků s barvivem Sensidizer SQ2 a Ruthenizer 535 jsou způsobené nejspíše drobnými defekty ve vrstvě TiO_2 a grafitu, ke kterým došlo během doplňování elektrolytu před měřením. To bylo nutné provést z důvodu úniku elektrolytu během uskladnění a převozu.

13. Závěr

V bakalářské práci byly popsány tři inovativní solární technologie, jmenovitě perovskitové solární články, dye sensitized solární články a průhledné solární články. Jedná se o perspektivní technologie s potenciálem konkurovat již zavedeným fotovoltaickým technologiím. Jejich hlavními přednostmi je očekávaná nízká cena, které lze dosáhnout levnými materiály a energeticky nenáročnou výrobou. Perovskitové články v této kategorii fotovoltaických technologií vyčnívají zejména svojí účinností, která již překročila 25 %. Dye sensitized solární články si uchovávají svou účinnost i při velmi nízkých intenzitách osvětlení. Mohou mít potenciální využití ve vnitřních prostorech, kde mohou sloužit k napájení různých čidel a senzorů. Velkou nevýhodou těchto technologií je však jejich životnost, která zatím nemůže konkurovat křemíkovým fotovoltaikám. Tímto nedostatkem se však zabývá velké množství výzkumníků a již teď lze zaznamenat znatelný pokrok. Pokud bude dosaženo očekávané nízké ceny finálního produktu, lze očekávat, že tyto fotovoltaické technologie budou konkurenceschopné i při nižší životnosti, než je životnost klasických křemíkových solárních panelů.

Součástí práce je studie možnosti masové výroby perovskitových solárních článků v prostředí Evropské unie, a to zejména z hlediska materiálové dostupnosti. Tato studie byla provedena pro modelový perovskitový solární článek sestavený s přihlédnutím k umožnění sériové výroby tzv. roll-to-roll procesem, který je považován za nejpravděpodobnější způsob výroby těchto článků. Z dohledaných dat je patrné, že z materiálového hlediska je masová výroba v evropských podmínkách možná.

Součástí práce byla experimentální výroba DSSCs a perovskitových solárních článků. Celkem bylo vyrobeno 12 článků, z nichž 5 bylo perovskitových a 7 DSSCs. Perovskitové články se ukázali jako nefunkční, hlavním důvodem byla nehomogenita vrstvy oxidu titaničitého a perovskitu.

Pro výrobu DSSCs byly zvoleny 4 druhy barviv (Ruthenizer 535, Sensidizer SQ2, ibiškové a řepo špenátové) a dva způsoby nanášení vrstvy TiO_2 (spin coating a blade coating). Vhodnější metodou byla metoda blade coating, pomocí níž byly vyrobeny funkční články s lepšími parametry, než tomu bylo u článků vyrobených pomocí metody spin coating.

Pro tři články s nejlepšími parametry (články s barvivem Ruthenizer 535, Sensidizer SQ2 a ibiškovým barvivem) bylo provedeno experimentální testování vlastností na slunečním simulátoru. Vhodně zapojenou měřicí aparaturou byla proměřena voltampérová charakteristika těchto článků, ze které byla následně vypočtena účinnost a faktor plnění. Nejvyšší účinnosti byla naměřena u článku s anorganickým barvivem Ruthenizer 535 a to 0,0109 %. Nejlepší průběh VA charakteristiky byl naměřen u článku s ibiškovým barvivem, u kterého byl zároveň vypočten nejvyšší faktor plnění, a to 50,2 %. Parametry vyrobených solárních článků jsou ve srovnání s články vyrobenými na ostatních pracovištích zabývajících se jejich výzkumem velmi nízké. To demonstruje, že ačkoliv se jedná o PV z dostupných materiálů, jejich výroba je komplikovaná a pro úspěšnou výrobu článků s dobrými parametry je třeba mít více zkušeností s jejich výrobou. Vývoj takovéto technologie trvá řadu let, a i proto není komerční výroba tak rozvinutá, jak by se dalo očekávat.

Seznam příloh

Příloha 1: Manuál pro výrobu perovskitového solárního článku

Příloha 2: Manuál pro výrobu dye sensitized solárního článku

Seznam obrázků

Obrázek 1: vývoj účinnosti PSCs v letech 2014-2023 [14].....	11
Obrázek 2: Struktura ABX3 perovskitového materiálu [5].....	11
Obrázek 3: schématické zobrazení konstrukce PSCs [8]	13
Obrázek 4: Závislost účinnosti PSCs na ploše [3].....	15
Obrázek 5: První instalace perovskitových solárních panelů.....	16
Obrázek 6 Nejvyšší dosažené účinnosti DSSCs článků v průběhu let [14]	18
Obrázek 7: schématické zobrazení DSSCs článku [2]	19
Obrázek 8: Konferenční centrum SwissTech Convencion Center s instalovanými DSSCs solárními panely [24].....	23
Obrázek 9: Luminescentní solární kolektor [9].....	25
Obrázek 10: Částečně průsvitný solární panel [9].....	26
Obrázek 11: Nanášení perovskitové vrstvy pomocí metody spin coating [26].....	28
Obrázek 12: Roll-to-roll proces výroby solárních článků[27].....	29
Obrázek 13: Inkjet tisknutí (a) kontinuální (b) drop-on-demand[26].....	29
Obrázek 14: Princip technologie blade coating [28]	30
Obrázek 15: Princip technologie Slot-die coating[28]	31
Obrázek 16: Princip technologie Spray coating[26].....	31
Obrázek 17: Voltampérová charakteristika solárního článku [29].....	32
Obrázek 18: Využití laboratorní vybavení: (A) spin coater KarlSuss CT60, (B) váha Denver Instrument S-64, (C) Orbital Shaker PSU-10i.....	37
Obrázek 19: Architektura vyrobeného perovskitového článku	39
Obrázek 20: Příprava FTO skel (A) čištění skel v acetonu (levá nádoba) a izopropylalkoholu (pravá nádoba), (B) sušení FTO skel proudem dusíku, (C) identifikování vodivé strany skla pomocí multimetru, (D) oplachování osmózou.....	40
Obrázek 21: Architektura dye sensitized solárního článku	42
Obrázek 22: Nanesené vrstvy DSSCs: Ruthenizer 535 (A), Sensidizer SQ2 (B), Přírodní barvivo (C).....	43
Obrázek 23. Elektrody DSSCs (A) špenát+řepa (B) Ruthenizer 535 (C) ibišek (D) Sensidizer SQ2	44
Obrázek 24: Vrstva TiO ₂ (A) a vrstva perovskitu (B)	47
Obrázek 25: Vrstva TiO ₂ (A) a vrstva perovskitu (B)	47
Obrázek 26: Vrstva TiO ₂ (A) a vrstva perovskitu (B)	48
Obrázek 27. Schéma měřící aparatury.....	49
Obrázek 28: (A) měřící aparatura (B) sluneční simulátor	49
Obrázek 29. Voltampérová charakteristika solárního článku využívající ibiškové barvivo	50
Obrázek 30: Voltampérová charakteristika solárního článku využívající barvivo.....	50
Obrázek 31: Voltampérová charakteristika solárního článku využívající barvivo.....	51

Seznam tabulek

Tabulka 7. Charakteristické parametry testovaných článků.....	49
Tabulka 1: Využité chemikálie a materiály	38
Tabulka 2: Roztoky potřebné pro výrobu perovskitového solárního článku.....	40
Tabulka 3: Parametry nanášení jednotlivých vrstev	41
Tabulka 4: Roztoky potřebné pro výrobu DSSCs	43
Tabulka 5: Naměřené zkratové proudy a napětí na prázdko článků.....	45
Tabulka 6: Naměřené zkratové proudy a napětí na prázdko článků.....	45
Tabulka 7: Naměřené zkratové proudy a napětí na prázdko	46
Tabulka 8: Charakteristické parametry testovaných článků.....	51

Použitá literatura

- [1] RITCHIE HANNAH, ROSER MAX a ROSADO PABLO. Energy. [online]. 2020. [vid. 2023-11-01]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/energy>
- [2] GONG, Jiawei, K. SUMATHY, Qiquan QIAO a Zhengping ZHOU. Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends [online]. 2017. [vid. 2022-11-10]. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2016.09.097
- [3] WU, Tianhao, Zhenzhen QIN, Yanbo WANG, Yongzhen WU, Wei CHEN, Shufang ZHANG, Molang CAI, Songyuan DAI, Jing ZHANG, Jian LIU, Zhongmin ZHOU, Xiao LIU, Hiroshi SEGAWA, Hairen TAN, Qunwei TANG, Junfeng FANG, Yaowen LI, Liming DING, Zhijun NING, Yabing QI, Yiqiang ZHANG a Liyuan HAN. The Main Progress of Perovskite Solar Cells in 2020–2021 [online]. 2021. ISSN 21505551. Dostupné z: doi:10.1007/s40820-021-00672-w
- [4] ROY, Priyanka, Numeshwar KUMAR SINHA, Sanjay TIWARI a Ayush KHARE. A review on perovskite solar cells: Evolution of architecture, fabrication techniques, commercialization issues and status [online]. 2020. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2020.01.080
- [5] PARK, Nam Gyu. Perovskite solar cells: An emerging photovoltaic technology [online]. 2015. ISSN 18734103. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2014.07.007
- [6] ZHOU, Di, Tiantian ZHOU, Yu TIAN, Xiaolong ZHU a Yafang TU. Perovskite-Based Solar Cells: Materials, Methods, and Future Perspectives [online]. 2018. ISSN 16874129. Dostupné z: doi:10.1155/2018/8148072
- [7] RONG, Yaoguang, Yue HU, Anyi MEI, Hairen TAN, Makhsud I. SAIDAMINOV, Sang il SEOK, Michael D. MCGEHEE, Edward H. SARGENT a Hongwei HAN. Challenges for commercializing perovskite solar cells [online]. 2018. ISSN 10959203. Dostupné z: doi:10.1126/science.aat8235
- [8] CORREA-BAENA, Juan Pablo, Michael SALIBA, Tonio BUONASSISI, Michael GRÄTZEL, Antonio ABATE, Wolfgang TRESS a Anders HAGFELDT. Promises and challenges of perovskite solar cells [online]. 2017. ISSN 10959203. Dostupné z: doi:10.1126/science.aam6323
- [9] LEE, Kangmin, Han Don UM, Deokjae CHOI, Jeonghwan PARK, Namwoo KIM, Hyungwoo KIM a Kwanyong SEO. The Development of Transparent Photovoltaics [online]. 2020. ISSN 26663864. Dostupné z: doi:10.1016/j.xcrp.2020.100143
- [10] ČULÍK, Pavel, Keith BROOKS a Cristina MOMBLONA. Design and Cost Analysis of 100 MW Perovskite Solar Panel Manufacturing Process in Different Locations. [online] 2022. Dostupné z: doi:10.1021/acseenergylett.2c01728
- [11] VINCENT, Shaw a Hall MAX. Chinese PV Industry Brief: Microquanta builds 12 MW ground-mounted project with perovskite solar modules. [online]. 2022 [vid. 2022-11-04]. Dostupné z: <https://www.pv-magazine.com/2022/02/18/chinese-pv-industry-brief-microquanta-builds-12-mw-ground-mounted-project-with-perovskite-solar-modules/>

- [12] DEVADIGA, Dheeraj, M. SELVAKUMAR, Prakasha SHETTY a M. S. SANTOSH. Dye-Sensitized Solar Cell for Indoor Applications: A Mini-Review [online]. 2021. ISSN 1543186X. Dostupné z: doi:10.1007/s11664-021-08854-3
- [13] KARTHICK, S. N., K. V. HEMALATHA, Suresh Kannan BALASINGAM, F. MANIK CLINTON, S. AKSHAYA a Hee Je KIM. Dye-sensitized solar cells: History, components, configuration, and working principle. In: Interfacial Engineering in Functional Materials for Dye-Sensitized Solar Cells [online]. 2019. Dostupné z: doi:10.1002/9781119557401.ch1
- [14] Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart. [online]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>
- [15] SHARMA, Khushboo, Vinay SHARMA a S. S. SHARMA. Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status [online]. 2018. ISSN 1556276X. Dostupné z: doi:10.1186/s11671-018-2760-6
- [16] KOKKONEN, Mikko, Parisa TALEBI, Jin ZHOU, Somayyeh ASGARI, Sohail Ahmed SOOMRO, Farid ELSEHRAWY, Janne HALME, Shahzada AHMAD, Anders HAGFELDT a Syed Ghufuran HASHMI. Advanced research trends in dye-sensitized solar cells [online]. 2021. ISSN 20507496. Dostupné z: doi:10.1039/d1ta00690h
- [17] QUASIM KHAN, Mohd a Khursheed AHMAD. Origin and Fundamentals of Perovskite Solar Cells. In: Recent Advances in Nanophotonics - Fundamentals and Applications [online]. 2020. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.94376
- [18] NANDAN ARKA, Girija, Shashi BHUSHAN PRASAD a Subhash SINGH. Comprehensive study on dye sensitized solar cell in subsystem level to excel performance potential: A review [online]. 2021. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2021.08.037
- [19] CASTILLO-ROBLES, José A., Enrique ROCHA-RANGEL, José A. RAMÍREZ-DE-LEÓN, Frida C. CABALLERO-RICO a Eddie N. ARMENDÁRIZ-MIRELES. Advances on dye-sensitized solar cells (DSSCs) nanostructures and natural colorants: A review [online]. 2021. ISSN 2504477X. Dostupné z: doi:10.3390/jcs5110288
- [20] ASLAM, Asad, Umer MEHMOOD, Muhammad Hamza ARSHAD, Abdulrehman ISHFAQ, Junaid ZAHEER, Anwar UL HAQ KHAN a Muhammad SUFYAN. Dye-sensitized solar cells (DSSCs) as a potential photovoltaic technology for the self-powered internet of things (IoTs) applications [online]. 2020. ISSN 0038092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2020.07.029
- [21] G24 Power. [online]. [vid. 2022-12-16]. Dostupné z: <https://gcell.com/gcell-products>
- [22] 3GSolar [online]. [vid. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://www.3gsolar.com/>
- [23] Solarnix [online]. [vid. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.solaronix.com/solarcells/>
- [24] MICHAEL KOLLER. Grätzelzellen als Kunst Swiss Tech Convention Center, Lausanne/CH. Deutche BauZeitschrift [online]. nedatováno [vid. 2023-01-01]. Dostupné

z: https://www.dbz.de/artikel/dbz_Graetzelzellen_als_Kunst_Swiss_Tech_Convention_Center_Lausanne_CH_2305942.html

- [25] HUSAIN, Alaa A.F., Wan Zuha W. HASAN, Suhaidi SHAFIE, Mohd N. HAMIDON a Shyam Sudhir PANDEY. A review of transparent solar photovoltaic technologies [online]. 2018. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.06.031
- [26] ESWARAMOORTHY, Nandhakumar a Kamatchi R. Fabrication and Manufacturing Process of Perovskite Solar Cell. In: Green Energy [online]. 2020. Dostupné z: doi:10.1002/9781119760801.ch3
- [27] KAJAL, Priyanka, Kunal GHOSH a Satvasheel POWAR. Manufacturing Techniques of Perovskite Solar Cells. In: Energy, Environment, and Sustainability [online]. 2018. ISSN 25228374. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-10-7206-2_16
- [28] MA, Yingzhuang a Qing ZHAO. A strategic review on processing routes towards scalable fabrication of perovskite solar cells. Journal of Energy Chemistry [online]. 2021. ISSN 20954956. Dostupné z: doi:10.1016/j.jechem.2021.05.019
- [29] IV Curve. [online]. Nedatováno. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>
- [30] Top 10 Titanium Dioxide Companies in the world. [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.reportsanddata.com/blog/top-titanium-dioxide-companies-in-the-world>
- [31] The economic impact of titanium dioxide in Europe. [online]. Nedatováno. Dostupné z: <https://www.tdma.info/about-tio2/the-economic-impact-of-titanium-dioxide-in-europe/>
- [32] MATTIELLO, Sara, Giulia LUCARELLI, Adiel CALASCIBETTA, Lorenzo POLASTRI, Erika GHIGLIETTI, Suresh Kumar PODAPANGI, Thomas M. BROWN, Mauro SASSI a Luca BEVERINA. Sustainable, Efficient, and Scalable Preparation of Pure and Performing Spiro-OMeTAD for Perovskite Solar Cells. ACS Sustainable Chemistry and Engineering [online]. 2022, **10**(14). ISSN 21680485. Dostupné z: doi:10.1021/acssuschemeng.2c00493
- [33] UPADHYAYA, Aditi, Chandra Mohan Singh NEGI, Anjali YADAV, Saral K. GUPTA a Ajay Singh VERMA. Synthesis and Characterization of Methylammonium Lead Iodide Perovskite and its Application in Planar Hetero-junction Devices. Semiconductor Science and Technology [online]. 2018, **33**(6). ISSN 13616641. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6641/aac066
- [34] EKLUND, Oscar. Introduction to Perovskite Solar Cells in an Undergraduate Laboratory Exercise. Karlstads Universitet. [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1330620/FULLTEXT01.pdf>
- [35] Make a Grätzel cell instructions. Royal Society of Chemistry. [online]. Nedatováno. Dostupné z: <https://edu.rsc.org/resources/make-a-grtaand776zel-cell/1290.article>

Příloha 1: Manuál pro výrobu PSCs

Tento postup byl přeložen a upraven z: [34]

Potřebné chemikálie:

- Isoperoxid titaničitý (TTIP) – 0,2 M = 85 mg
- Kyselina chlorovodíková (HCL, 37% roztok) - 0,1 M = 5,5 mg
- Ethanol
- Methylammonium jodid (*MAI*, CH_3NH_3I) – 1 M = 318 mg
- Jodid olovnatý (PbI_2) – 1 M 922 mg
- Dimethylformamid (C_3H_7NO)
- Thiokyanatan sodný ($CuSCN$) – 0,05 M = 9 mg
- Diethylsulfid
- Chlorbenzen
- Isopropanol
- Uhlík

Potřebné vybavení:

- FTO sklo
- Multimetr
- Nastavitelná pipeta (10-100 μ l a 100-1000 μ l)
- Kleště
- Špachtle
- Baňky (10 ml)
- Stojan na baňky
- Lepicí páska
- Svorky na papír
- Spin coater
- Plotýnka s magnetickým míchadlem
- Stopky
- Hliníková fólie

Ochranné pomůcky:

- Plášť
- Ochranné brýle
- Rukavice
- Ochrana dýchacích cest
- Digestoř

Při práci je nezbytné mít vždy plášť, rukavice a ochranné brýle. Při manipulaci s jodidem olovnatým je nutné využít ochrany dýchacích cest.

Pracovní postup

Příprava roztoků

Nejprve je třeba připravit jednotlivé roztoky. TiO_2 připravte smícháním 0,2 M isoperoxidu titaničitého s 0,1 M kyseliny chlorovodíkové v ethanolu. Perovskit $MAPbI_3$ připravte smícháním 1 M methylammonia jodidu s 1 M PbI_2 v dimethylformamidu. Výsledný roztok umístěte na plotýnku předeřátou na na 80 °C. Třetí potřebný roztok pro výrobu tohoto článku připravte smícháním 0,05 M thiokyanatanu sodného s diethylsulfidem. Doporučené výsledné množství je 1,5 ml TiO_2 , 1,5 ml roztoku thiokyanatanu sodného a 2 ml $MAPbI_3$. Roztoky nechte míchat, dokud nebudou využity při výrobě. $MAPbI_3$ je třeba před nanesením sundat z plotýnky a nechat chladnout při pokojové teplotě alespoň po dobu 10 minut.

Příprava FTO skla

Nejdříve je třeba identifikovat vodivou a nevodivou stranu FTO skel. Tyto dvě strany od sebe lze rozeznat pomocí multimetru. Ten je třeba nastavit na 2000 Ohmů, display by měl zobrazovat hodnotu 1. Obě sondy multimetru přiložte postupně na obě strany FTO skla. Pokud je strana skla nevodivá, zobrazí se na multimetru hodnota 1. Pokud je strana skla vodivá, na multimetru se hodnota změní.

Před nanášením dalších vrstev je třeba FTO sklo očistit od nečistot. Je vhodné je očistit v ultrazvukovém čističi isopropanolem po dobu jedné hodiny.

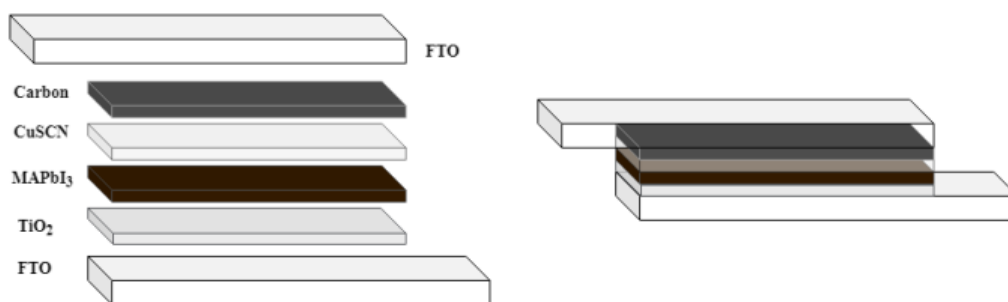
Nanášení vrstev

Nejprve naneste vrstvu TiO_2 . Očištěné FTO sklo přelepte z ¼ lepicí páskou a položte ho vodivou stranou vzhůru do středu spin coateru. Pomocí pipety na sklo nanese přibližně 50 μ l roztoku TiO_2 . Po nanesení roztoku zapněte spin coater a vyčkejte, dokud se nanesená vrstva rovnoměrně rozmístí po povrchu skla. Následně odstraňte lepicí pásku a FTO sklo s vrstvou TiO_2 opatrně umístěte nanesenou vrstvou vzhůru na okraj plotýnky předeřáté na 300 °C. Pomalu ho přesuňte do středu plotýnky a nechte žíhat po dobu 10 minut. Poté vypněte plotýnku, a aby se předešlo popraskání vrstvy TiO_2 vlivem tepelného šoku, umístěte FTO sklo na její okraj. Vyčkejte 5 minut. Následně sundejte FTO sklo z plotýnky a nechte chladnout při pokojové teplotě.

Dalším krokem je nanesení perovskitové vrstvy na již vychladlou vrstvu TiO_2 . Přelepte nepotaženou část vodivé strany FTO skla lepicí páskou. Do dvou pipet si připravte nejprve 50 μ l perovskitu $MAPbI_3$ a následně 150 μ l chlorbenzenu. FTO sklo umístěte na spin coater, spusťte ho a během prvních 10 vteřin naneste roztok perovskitu. Poté, co spincoater dosáhne 4 000 otáček za minutu, naneste chlorbenzen. Po nanesení obou vrstev vypněte spincoater, odstraňte lepicí pásku a umístěte FTO sklo opět nanesenou vrstvou vzhůru na plotýnku předeřátou na 100 °C. Žíhejte po dobu 20 minut a nechte chladnout při pokojové teplotě. Správná perovskitová vrstva by měla mít lesklou šedivou barvu.

Opět přelepte čistou část FTO skla lepicí páskou a naneste na vrstvu perovskitu 50 μ l thiokyanatanu sodného. Po rovnoměrném rozptření vrstvy pomocí spin coateru umístěte FTO sklo na hotplate a žihejte při 100 °C po dobu 5 minut. Opět nechte chladnout při pokojové teplotě.

Naneste přibližně 20 mg uhlíku na vrstvu thiokyanatanu sodného. Solární článek dokončete přiložením druhého FTO skla vodivou stranou na nanesené vrstvy. Obě FTO skla k sobě upevněte pomocí svorek na papír. Na následujícím obrázku je zobrazená výsledná podoba solárního článku.



výsledná podoba vyrobeného solárního článku

Příloha 2: Manuál pro výrobu DSSCs

Tento postup byl přeložen a upraven z: [35]

Potřebné chemikálie a materiály:

- FTO skleněné plátky
- TiO_2
- Grafit
- *roztok jódu*
- Barvivo

Potřebné vybavení:

- 1x kádinka (jakékoliv velikosti)
- 1x kádinka s vodou
- 1x krystalizační miska
- 1x špachtle
- 2x pipeta
- 1x skleněná tyč
- 1x pinzeta
- 1x obyčejná tužka
- Lepicí páska
- Multimetr
- Kabel s krokodýlovou spojkou
- Svítilna
- Plotýnka
- Svorky na papír

Ochranné pomůcky:

- Plášť
- Ochranné brýle
- Rukavice
- Ochrana dýchacích cest
- Digestoř

Pracovní postup

Příprava roztoků

Nejprve je třeba připravit TiO_2 pastu, kterou připravíte smícháním 0,2 M TiO_2 s 0,1 M kyseliny chlorovodíkové.

Příprava FTO skla

FTO sklo je třeba očistit od případných nečistot. FTO skla opláchněte v kádince s etanolem a osušte papírovou utěrkou. Dále je třeba identifikovat vodivou a nevodivou stranu FTO skel. Tyto dvě strany od sebe lze rozeznat pomocí multimetru. Multimetr je třeba nastavit na 2000 Ohmů, display by měl zobrazovat hodnotu 1. Obě sondy multimetru přiložte postupně na obě strany sklíčka. Pokud je strana skla nevodivá, zobrazí se na multimetru hodnota 1. Pokud je strana skla vodivá, na multimetru se hodnota změní.

Nanášení vrstev

K podložce přilepte lepicí páskou FTO sklo vodivou stranou vzhůru. Špachtlí naneste titanovou pastou na jeden okraj skla. Pomocí skleněné tyče rozprostřete jedním přetažením titanovou pastu po odkrytém povrchu skla. Výsledkem by měla být tenká vrstva TiO_2 , která je uniformní. Po nanesení vrstvy TiO_2 opatrně odstraňte lepicí pásku a pomocí pinzety umístěte elektrodu na hotplate předehřátý na 120 °C a nechte žíhat po dobu 10 minut.

V dalším korce připravte barvivo, lze použít velké množství barviv, při přípravě postupujte podle postupu výrobce. Pro dokončení pracovní elektrody je nutné na vrstvu TiO_2 nanést barvivo. Elektrodu umístěte do kádinky s barvivem. Celá vrstva TiO_2 by měla být tímto barvivem pokryta. Elektrodu nechte v misce po dobu minimálně 15 minut, ideálně několik hodin, aby vrstva TiO_2 absorbovala dostatečné množství barviva.

Při výrobě protielektrody využijte grafit z obyčejné tužky. Vodivou stranu FTO skla pokreslete tužkou. Sklo by mělo být celé rovnoměrně pokryté vrstvou grafitu.

Poté, co TiO_2 absorbuje dostatek barviva, vyjměte elektrodu z barvivové lázně a pomocí pipety opláchněte z jejího povrchu neabsorbované barvivo. Pomocí papírové utěrky opatrně, aby se nenarušila vrstva TiO_2 , usušte elektrodu.

Obě elektrody přiložte k sobě tak, aby se vrstvy TiO_2 a grafitu dotýkaly. Elektrody je třeba umístit tak, aby vznikl prostor pro připojení krokodýlových spojek. Obě elektrody k sobě sepněte svorkami na papír.

Článek dokončete dolitím malého množství elektrolytu na jeden okraj spojeného článku a počkejte, dokud se elektrolyt rovnoměrně nerozprostře mezi elektrody. Není dobré nalít elektrolyt přímo na nanesené vrstvy, mohlo by je to poničit. Okraje, na které se připojí krokodýlí svorky očistěte od přebytečného elektrolytu.