



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

CHARAKTERIZACE VLASTNOSTÍ PEROVSKITOVÝCH FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

CHARAKTERIZACE VLASTNOSTÍ PEROVSKITOVSKÝCH FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Aleh Salaukou

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Aleh Salaukou

ID: 192810

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Charakterizace vlastností perovskitových fotovoltaických článků

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou fotovoltaických článků a s možnostmi měření jejich zatěžovacích charakteristik. Seznamte se s dalšími metodami testování fotovoltaických článků, především s metodou impedanční spektroskopie a metodou fotospektroskopie. Proveďte měření vybraných perovskitových fotovoltaických článků na zařízení Zahner a výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 30.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto práce se věnuje problematice fotovoltaických článků na bázi perovskitu. V teoretické části jsou popsány základní vlastnosti struktury perovskitu, jeho složení a použití v solárních článcích. Kromě toho se daná práce týče základní informace o fotovoltaice a křemíkových solárních panelech. Také je tady představená informace týkající se metod měření fotovoltaických článku, jako jsou impedanční spektroskopie, fotoimpedanční spektroskopie a metoda zatěžovacích křivek. Praktická část Bakalářské práce se zabývá aplikováním měřicích metod popsaných v teoretické části, stanovením ekvivalentních obvodů a diskuzí ohledně získaných výsledků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Perovskit, solární článek, fotovoltaika, impedanční spektroskopie, fotoimpedanční spektroskopie, ekvivalentní obvod.

ABSTRACT

This work deals with photovoltaic cells based on perovskite. The theoretical part describes the basic properties of perovskite structure, its composition and its using in solar cells. In addition, the work provides basic information about photovoltaic and silicon solar panels. Information on photovoltaic cell measurement methods such as impedance spectroscopy, photoimpedance spectroscopy, and load curve method are also presented here. Practical part of the Bachelor work deals with the application of measuring methods described in the theoretical part, the determination of equivalent circuits and discussions about the results obtained.

KEYWORDS

Perovskite, solar cell, photovoltaics, impedance spectroscopy, photoimpedance spectroscopy, equivalent circuit.

SALAUKOU, Aleh. *Charakterizace vlastností perovskitových fotovoltaických článků*. Brno, 2019. 67 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119583>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI DÍLA

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Charakterizace vlastností perovskitových fotovoltických článků* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **30. května 2019**

.....
Aleš Salaukou, podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vítězslavu Novákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **30. května 2019**

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod.....	9
1. Fotovoltaika.....	10
1.1. Fotovoltaický jev.....	10
1.2. Parametry fotovoltaických článků.....	12
1.3. Křemíkový solární článek.....	13
2. Perovskit.....	15
2.1. Nález a výzkum.....	15
2.2. Vlastnosti struktury.....	16
3. Perovskitové solární články.....	18
3.1. Obecná struktura.....	18
3.1.1. Mezoporézní struktura.....	18
3.1.2. Rovinná struktura.....	19
3.2. Složení.....	19
3.2.1. Transportní elektroda.....	19
3.2.2. Mezoporézní vrstva oxidu.....	20
3.2.3. Transportní vrstva elektronů.....	20
3.2.4. Perovskitová vrstva.....	21
3.2.5. Transportní vrstva děr.....	21
3.2.6. Substrátová elektroda.....	22
3.3. Celkový pohled.....	22
4. Metody syntézy perovskitové vrstvy v PSČ.....	23
4.1. Metoda roztoků.....	23
4.2. Metoda parní depozice.....	24
4.3. Metoda roztoků asistovaná parami.....	24
5. Metody měření solárních článků.....	26
5.1. Impedanční spektroskopie.....	26
5.1.1. Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS).....	26
5.2. Fotoimpedanční spektroskopie.....	28
5.2.1. IMPS, IMVS.....	28
5.2.2. CIMPS.....	30
5.3. Další metody měření.....	31
5.3.1. Metoda zatěžovacích charakteristik.....	31
5.3.2. OCVD.....	31
5.3.3. CELIV.....	32
6. Praktická část.....	33
6.1. Použité zařízení.....	33
6.2. Testování metodik měření na solárním článku na bázi křemíku.....	34

6.2.1. Statické měření.....	34
6.2.2. Dynamické měření.....	38
6.2.2.1. IMPS.....	38
6.2.2.2. IMVS.....	39
6.2.2.3. EIS.....	41
6.3. Měření charakteristik solárního článku na bázi perovskitu.....	42
6.3.1. Statické měření.....	43
6.3.2. Dynamické měření.....	45
6.3.2.1. IMPS.....	45
6.3.2.2. IMVS.....	46
6.3.2.3. EIS.....	48
7. Zpracování výstupů měření fotovoltaického článku na bázi perovskitu.....	51
7.1. Statické měření.....	51
7.2. Dynamické měření.....	53
7.2.1. IMPS.....	54
7.2.2. IMVS.....	56
7.2.3. EIS.....	57
Závěr.....	62
Seznam symbolů a zkratk.....	63
Seznam obrázků.....	64
Seznam tabulek.....	65
Literatura.....	65

ÚVOD

V současné době technické prostředí stalo neoddělitelnou částí lidského života a v porovnání s minulým stoletím udělalo velké pokroky v rozvoji. Tenhle technický pokrok citelně zlepšuje kvalitu lidského života, ale se také současně stává více a více energeticky náročným a vzhledem k tomu, že energetické zdroje naší planety mají svůj limit potřebujeme najít cestu zmenšení tohoto negativního vlivu technického rozvoje. Tou cestou je použití obnovitelných přírodních zdrojů energie.

V dnešní době jedním z nejslibnějších energetických zdrojů je energie slunečního záření, které je k dispozici celoročně. Pro dostávání a použití této energie se používají solární články sestavené do solárních panelů. A jedním z nepoužitelných materiálů pro tento účel je křemík díky jeho hojnosti a stabilní účinnosti buněk, ale výroba panelů za použitím tohoto materiálu souvisí s vysokými výrobními náklady a pomalým pokrokem ve zvýšení účinnosti. Z těchto důvodů se pracuje nad zkoušením dalších materiálů, jedním ze kterých je perovskit.

Za relativně krátkou dobu se jeho účinnost srovnala s účinností křemíkových solárních článků a byli poskytnuté nové návrhy ohledně technologické výroby, které by nebyli tak náročné jako ve případě s křemíkem. Na problematiku výzkumu solárních článků na bázi perovskitu i bude vlastně zaměřená táto práce.

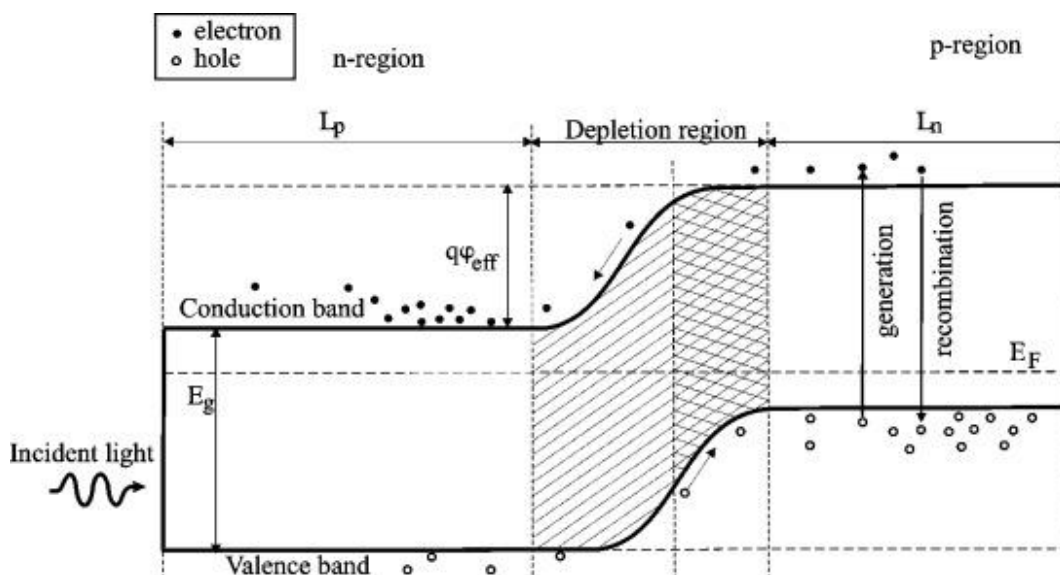
1. FOTOVOLTAIKA

1.1. Fotovoltaický jev

Fotovoltaický jev je fyzikální proces, který umožňuje přeměnit slunečnou energii na energii elektrickou [9].

Byl objeven francouzským fyzikem Alexandrem Edmondem Becquerelem v roce 1839 [9] při provádění experimentů na sekundárních buňkách. Bylo poznamenáno, že napětí buněk se zvětšilo, když byly jejich stříbrné plotny vystaveny směrem k slunečnímu záření [10].

Fotovoltaický jev nastává v solárních článkách. Tyto solární články se skládají ze dvou typů polovodičů – P-typu a N-typu, které jsou spojeny dohromady, aby vytvořily PN přechod (Obr.1). Spojením těchto dvou typů polovodičů se vytvoří elektrické pole v oblasti spojení, jelikož se elektrony pohybují na kladnou stranu P a, současně, díry se přesouvají na zápornou stranu N [10].

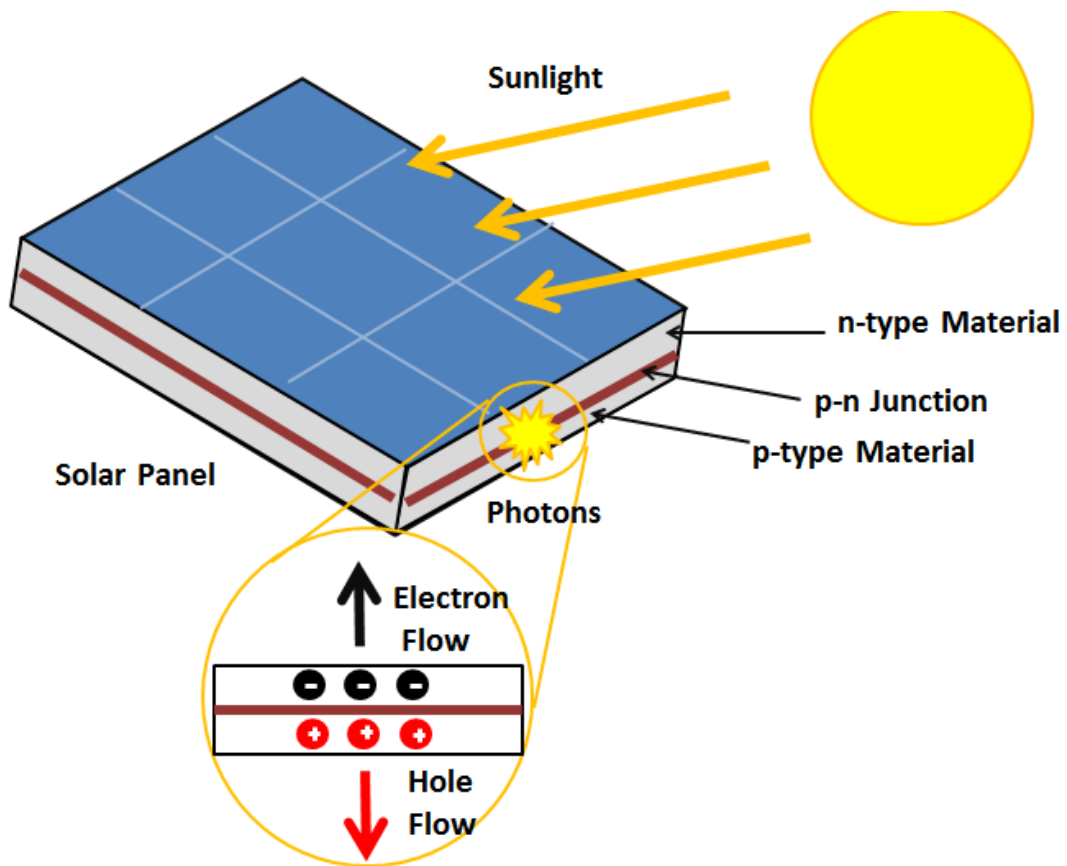


Obr.1. Diagram energetických pásem PN přechodu při osvětlení [12]

Světlo se skládá z fotonů, které jsou jednoduše malými svazky elektromagnetického záření nebo energie. Tyto fotony mohou být absorbovány fotovoltaickými články [11].

Když světlo s vhodnou vlnovou délkou dopadne na tyto články, energie z fotonu se přenesne na atom polovodičového materiálu v PN přechodu. To způsobí, že elektrony přeskočí na vyšší energetickou úroveň, známou jako vodivostní pás. A na místě ve valenčním pásmu, ze kterého elektron vyskočil, zůstane díra. Tento pohyb elektronů v důsledku přidané energie vytváří dva nosiče náboje, pár elektron-díra [10].

Kvůli elektrickému poli, které existuje v důsledku spojení polovodičů typu N a typu P, se elektrony a díry pohybují v opačném směru. To znamená, že namísto toho, aby byl přitahován k straně P, uvolněný elektron má tendenci se přesouvat na stranu N. Tento pohyb elektronu vytváří v buňce elektrický proud. Jakmile se elektron pohybuje, je tu "díra", která zůstala [11]. Ona se může také pohybovat, ale v opačném směru, tedy k straně P. Právě tento proces vytváří stejnosměrný proud v buňce [10]. Znázornění tohoto procesu lze vidět na obrázku č. 2.



Obr.2. Fotovoltaický jev

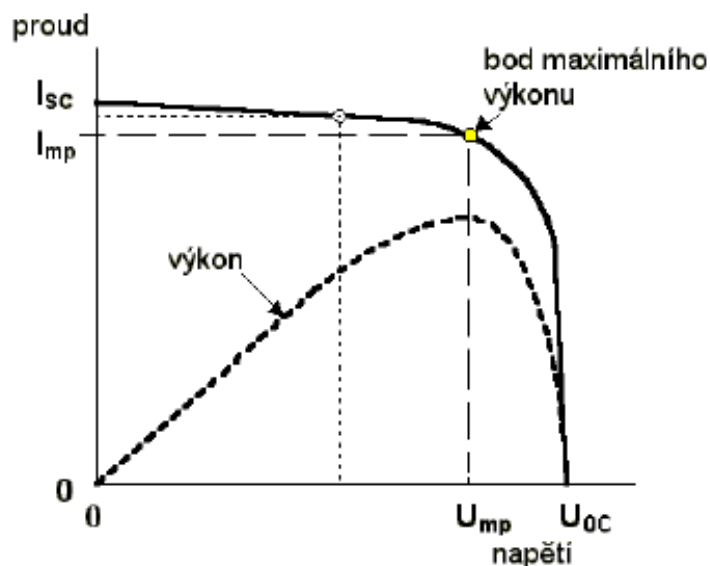
[Zdroj: Ecogreen Electrical. (31.10.2018). Solar PV Systems [Online]. Available: <http://www.ecogreenelectrical.com/solar.html>]

1.2. Parametry fotovoltaických článků

Nejvyšší možnou hodnotou stejnosměrného proudu, který se fotovoltaickým jevem vytváří v solárním článku při dané intenzitě ozáření, je zkratový proud I_{sc} .

Když ke článku není připojena žádná zátěž, tak se dá stanovit další parametr, tedy maximální napětí U_{oc} (napětí naprázdno). Výkon solárního článku se pak dá stanovit ze součinu proudu a napětí [13].

Pro každý článek lze určit pracovní bod, ve kterém je výkon největší (Obr.3). Tento bod je pak označován jako bod maximálního výkonu o napětí U_{mp} a proudu I_{mp} [13].



Obr.3. Stanovení pracovního bodu fotovoltaického článku [13]

Výkon solárního článku je závislý na spektru světla, na teplotě článku a na ozáření světla.

Jako hlavní parametry článků se vždycky udávají hodnoty zkratového proudu I_{sc} , napětí na prázdko U_{oc} , napětí při P_{MAX} U_{mp} , proudu při P_{MAX} I_{mp} a maximální výkon P_{MAX} [13].

Dále jsou důležitými parametry činitel plnění FF, který je mírou kvality solárního článku:

$$FF = \frac{I_{MAX} \cdot V_{MAX}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.1),$$

a, samozřejmě, účinnost η , kterou se dá stanovit ze vztahu

$$\eta = \frac{I_{MAX} \cdot V_{MAX}}{P_{in}} = FF \cdot \frac{V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{in}} \quad (1.2),$$

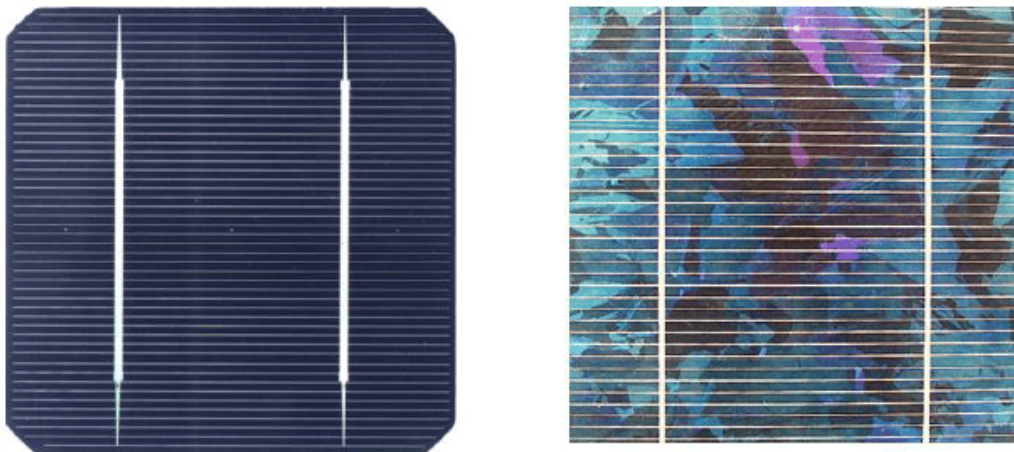
kde P_{in} je výkon dopadajícího záření [12].

1.3. Křemíkový solární článek

V současné době je více než 90 % trhu solárních článků je založeno na křemíku. Křemík zůstává nejpoužívanějším materiálem pro fotovoltaiku díky jeho hojnosti, netoxicitě a stabilní účinnosti buněk. A co se týče výroby, v technologii krystalického křemíku je k dispozici velmi rozšířená a hluboká infrastruktura, a to jak v oblasti fotovoltaických, tak i v oblasti integrovaných obvodů [14].

Jako výchozí materiál pro výrobu fotovoltaických článků z krystalického křemíku se používají křemíkové destičky (nejčastěji typu P) čtvercového tvaru.

Začátek výroby fotovoltaických článků byl spojen s monokrystalickým křemíkem, ale v sedmdesátých letech potřeba snížení ceny používaného materiálu přivedla k vývoji polykrystalického křemíku, kde při výrobě dochází k řízenému tuhnutí taveniny v blocích (Obr.4). Takovým způsobem přišlo k menší spotřebě vstupního materiálu a tím pádem i ke snížení investičních nákladů [16].



Obr. 4. Monokrystalický a polykrystalický křemíkový článek [16].

Křemík je velice vhodný materiál pro výrobu fotovoltaických článků, poněvadž z hlediska šířky zakázaného pásu lze u křemíku dosáhnout vysoké účinnosti, což je hlavním cílem vývoje fotovoltaických článků [17].

Teoretická omezující účinnost krystalické křemíkové solární buňky při nekoncentračním slunečním záření je přibližně 29 % [15].

V současnosti nejlepší laboratorní křemíkové solární články dokážou dosáhnout účinnosti jenom 24-25 % za nekoncentrovaného slunečního záření, což je 85 % teoretického limitu [14].

2. PEROVSKIT

2.1. Nález a výzkum

Oxid titaničito-vápenatý (CaTiO_3), známý jako perovskit, je minerál, který byl objeven v Uralském pohoří a dostal svůj název podle ruského mineraloga a archeologa Lva Alexejeviče Perovského (1792–1856) [1].



Obr.5. Perovskit nalezený v Německu (vlevo) a v Rusku (vpravo) [3].

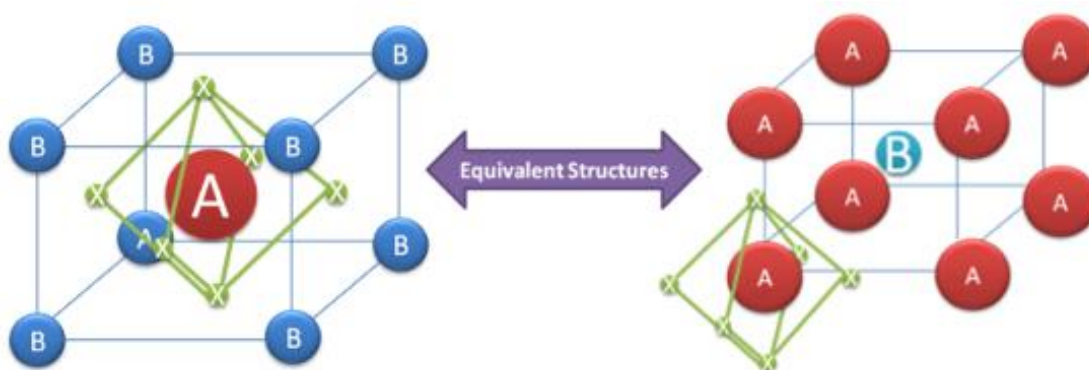
Podle vědců je perovskit unikátní hlavně v tom, že je velmi odolný a jeho použití vyžaduje až 5krát menší náklady na výrobu než současné solární panely z křemíku [2].

Před několika roky účinnost panelů z perovskitu při přeměně slunečního záření na elektřinu byla necelá 4 %, ale během plodného výzkumu a zlepšování metodiky výroby se podařilo účinnost až zpětinasobit. A podle vědců je řečeno, že ve případě jestli se podaří pokračovat dále podobným tempem, solární články využívající perovskit mohou překonat i nejefektivnější fotovoltaické panely na bázi křemíku [1].

2.2. Vlastnosti struktury

Pravý perovskit (minerál) se skládá z vápníku, titanu a kyslíku ve formě CaTiO_3 . Mezitím jako perovskity se označuje celá skupina jakékoliv sloučenin, které mají krystalickou strukturu shodnou s oxidem vápenato-titaničitým (CaTiO_3) a která má generickou formu ABX_3 [4,5]. Perovskitové mřížkové uspořádání je demonstrováno níže (Obr.6).

Stejně jako u mnoha struktur v krystalografii, může být struktura reprezentována několika způsoby. Nejjednodušším způsobem je představit perovskit jako velký atomový nebo molekulární kation typu A ve středu krychle. Vrcholy krychle jsou pak obsazeny atomy B (také kladně nabitě kationty) a středy stěn jsou tvořeny menším atomem X s negativním nábojem (anionem) [5,6].



Obr.6. Obecná struktura krystalu ve tvaru ABX3 [5].

Důležitým parametrem perovskitů je jejich "Toleranční faktor (t)", který ovlivňuje vznik perovskitové struktury. Struktura perovskitu může vzniknout, pouze pokud se toleranční faktor pohybuje v rozmezí 0,75 – 1,0. Je definován jako poměr iontových poloměrů:

$$t = \frac{r_A + r_0}{\sqrt{2} \cdot (r_B + r_0)} \quad (2.1),$$

kde r_A je poloměr A-kationu, r_B je poloměr B-kationu a r_0 je poloměr aniontu (obvykle kyslíku) [7].

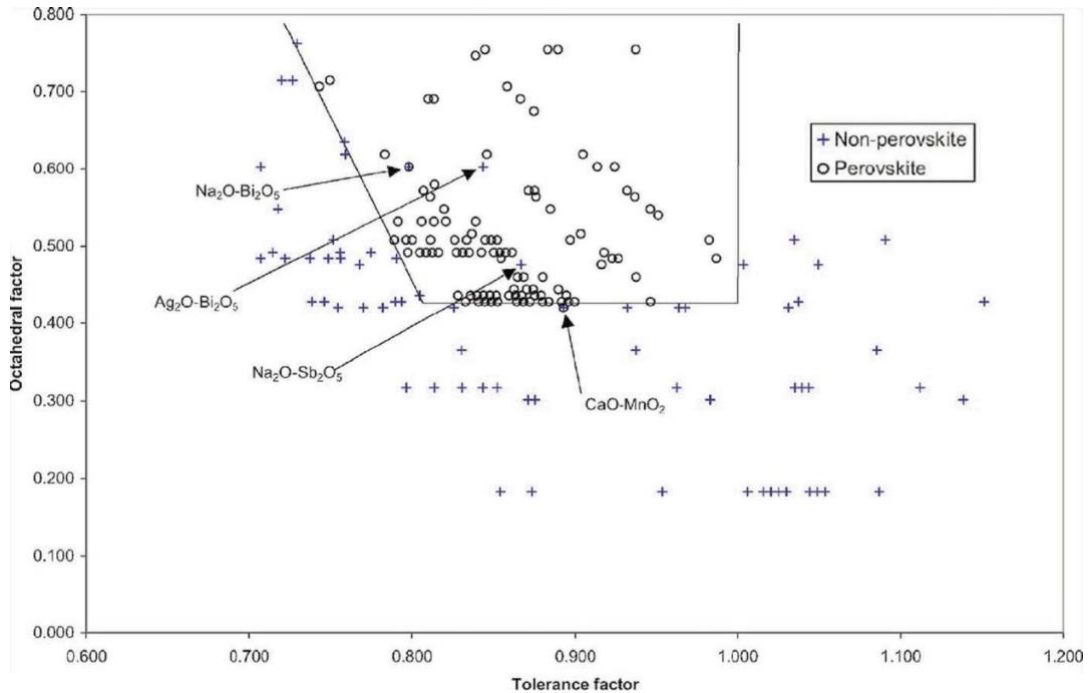
Ale pro stanovení možnosti vzniku perovskitové struktury není „Toleranční faktor“ vystačujícím údajem, takže je třeba určit další parametr, kterým je "Oktaedrický faktor (μ)", který lze stanovit ze vztahu:

$$\mu = \frac{r_B}{r_X} \quad (2.2),$$

kde r_B je poloměr B-kationu a r_X je poloměr aniontu [8].

Podle "Oktaedrického faktoru" musí pro vznik perovskitové struktury tento parametr být v rozmezí 0,44 – 0,9 [8].

Po určení obou faktorů t a μ lze stanovit, jestli perovskitová struktura může vzniknout. Tzn. pokud ty faktory jsou v požadovaných mezích lze s velkou pravděpodobností očekávat, že struktura vznikne. Znázornění oblasti možného vzniku perovskitové struktury je na obrázku Obr.7 [5, 8].



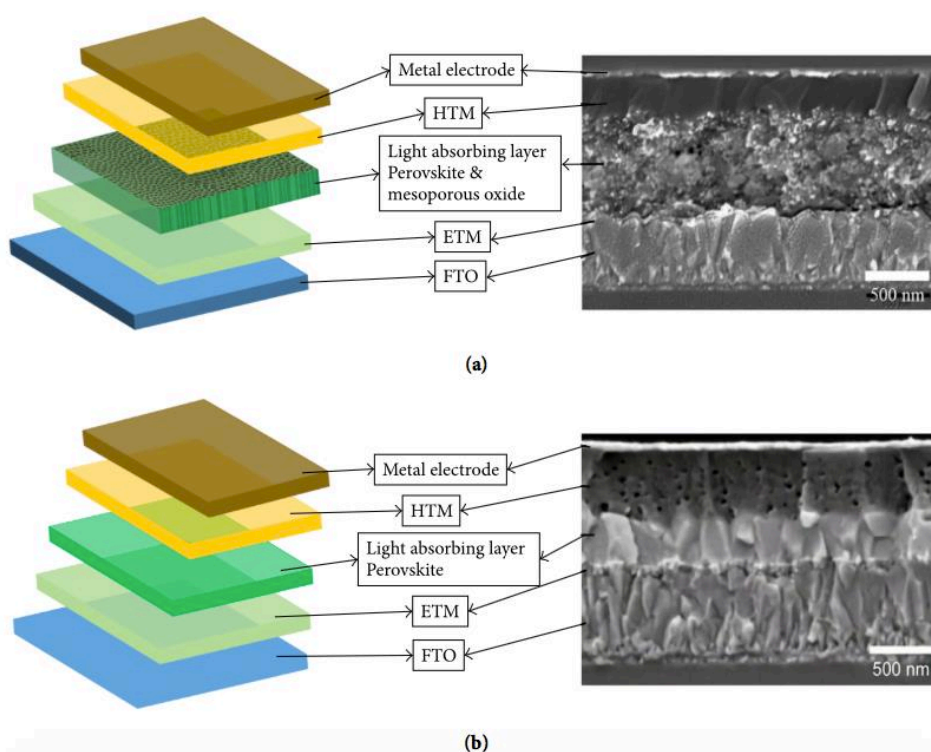
Obr.7. Oblast možného vzniku perovskitové struktury [8]

V závislosti na tom, které atomy se používají ve struktuře, mohou perovskity mít velkou řadu zajímavých vlastností, včetně supravodivosti, obrovské magnetorezistence a katalytických vlastností. Perovskity proto představují vzrušující hřiště pro fyziky, chemiky a vědce materiálů [5].

3. PEROVSKITOVÉ SOLÁRNÍ ČLANKY

3.1. Obecná struktura

V posledních letech byly vyvinuty různé struktury perovskitových solárních článků. V dnešní době nejčastěji se ale používají mezoporézní a rovinné heterostruktury, které jsou znázorněny níže na obrázku č.8 [18].



Obr.8. Schématické schéma mezoporézních(a) a rovinných(b) architektonických PSČ [18]

3.1.1. Mezoporézní struktura

Mezoporézní materiály byly rozsáhle studovány a široce použity kvůli jejich vysoké pórovitosti a velkému specifickému povrchu. Aplikace mezoporézních materiálů v perovskitových solárních článcích umožňuje absorberu perovskitů přilnout k mezoporéznímu rámečku oxidu kovu za účelem zvýšení plochy přijímání světla fotocitlivého materiálu a tím i zlepšení účinnosti zařízení [19].

Jak je znázorněno na obrázku Obr.8(a), typický mezoporézní solární článek sestává z elektrody FTO, husté elektronové transportní vrstvy, mezoporézní vrstvy oxidu, perovskitové vrstvy, vrstvy transportní díry a elektrodové vrstvy.

Tento druh struktury efektivně snižuje pravděpodobnost rekombinace elektronů a děr, což velmi zlepšuje elektrické schopnosti článku [18, 19].

3.1.2. Rovinná struktura

Typická rovinná struktura perovskitových solárních článků je znázorněna na obrázku Obr.8(b). Hlavní rozdíl od mezoporézní struktury spočívá v tom, že rovinná struktura odstraňuje porézní kostru oxidu kovu, což znamená, že mezi perovskitovými materiály a dvěma vrstvami (elektronovou transportní vrstvou a děrovou transportní vrstvou) se tvoří dvě rozhraní. Páry elektronů a děr jsou proto rychle a účinně odděleny transportní vrstvou elektronů a transportní vrstvou děr.

Studie o perovskitových solárních článcích s rovinnou strukturou přispívají k pochopení mechanismů absorpce světla a separace elektron – díra a zvyšují optimalizaci zařízení pro vývoj vysoce účinných laminovaných perovskitových solárních článků.

Tento druh struktury má také potenciál pro přípravu flexibilních fotovoltaických článků [18, 20].

3.2. Složení

3.2.1. Transparentní elektroda

Jako elektrody se používají různé materiály, však nejčastěji ve výrobě volí ITO a FTO:

Indium cínový oxid (ITO) je ternární složení india, cínu a kyslíku v různých poměrech. V závislosti na obsahu kyslíku může být popsán buď jako keramika nebo jako slitina. ITO je jedním z nejrozšířenějších průhledných vodivých oxidů, protože má výbornou elektrickou vodivost a optickou průhlednost [21].

Sklo s povlakem z oxidu cínu dopovaného fluorem (FTO) je elektricky vodivé a je velmi vhodné pro použití v široké řadě přístrojů a aplikací v optoelektronice a fotovoltaike [22].

Oxid cínu dopovaný fluorem byl uznán za velmi slibný materiál, protože je relativně stabilní za atmosférických podmínek, je chemicky inertní, mechanicky tvrdý, odolný proti vysokým teplotám a je levnější než oxid india cínu (ITO) [22].

3.2.2. Mezoporézní vrstva oxidu

Nejtypičtějším mezoporézním rámovým materiálem je TiO_2 , který pro perovskitové nanokrystaly tvoří propojenou absorbující vrstvu. TiO_2 hraje nejen podpůrnou roli, ale má také významné funkce jako je transport elektronů, blokování otvorů a potlačení rekombinace párů elektron – díra ve vodivém substrátu FTO, což přispívá ke zlepšení fotoelektrické efektivity zařízení [18, 19].

Kromě TiO_2 se také používají oxidy kovů, jako například ZnO , Al_2O_3 a ZrO_2 . Na rozdíl od TiO_2 , Al_2O_3 působí pouze jako nosná vrstva v zařízení a nehraje podobné funkční role jako TiO_2 pro přenos fotoelektrických elektronů, což znamená, že elektrony generované v materiálech absorbujících světlo nejsou vstřikovány do vodivého pásma Al_2O_3 , ale jsou přímo transportovány z perovskitu samotného do vodivé vrstvy FTO [19, 24].

3.2.3. Transportní vrstva elektronů

Základním úkolem transportní vrstvy elektronů je vytvořit elektronový selektivní kontakt s vrstvou perovskitu, aby se zlepšila účinnost extrakce generovaných elektronů a aby se účinně zabránilo migraci děr na protielektrodu, což vede ke snížení rekombinace [18, 25].

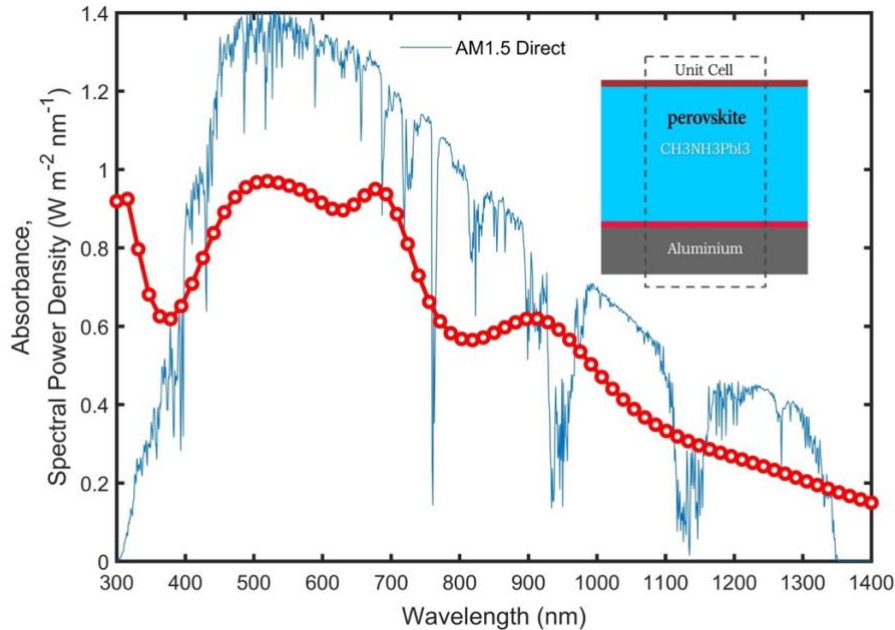
V současnosti jako účinný elektronový transportní materiál jsou široce studovány materiály jako TiO_2 a jiné polovodiče n-typu.

Základ pro výběr materiálu pro přepravu elektronů je následující:

- 1) Za prvé, doporučují se polovodiče typu n s vyšší mobilitou nosiče
- 2) Za druhé, materiál by měl být průhledný pro viditelné světlo v důsledku poměrně širokého pásma mezery.
- 3) Za třetí, podmínky přípravy by měly být mírné, aby materiál bylo možné získat při nízkých teplotách.
- 4) Za čtvrté, pásmová struktura by měla odpovídat perovskitovým materiálům [18, 26].

3.2.4. Perovskitová vrstva

Mezi všemi složkami perovskitových solárních článků hrají perovskitové materiály základní roli při absorpci světla (Obr.9) a fotoelektrické konverzi, takže aby byla zajištěna plná absorpce energie slunečního světla musí být absorpční vrstva silná ($> 10 \mu\text{m}$) [18].



Obr.9. Absorpce světla vrstvou perovskitu
[Zdroj: <https://www.researchgate.net>]

Jako základ (A a B struktury ABX_3) perovskitové vrstvy se obvykle používá aminomethyl olovnatý ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}$). Jako X se často uplatňují halogenidy triiodide (I_3) a jodidchlorid ($\text{I}_3\text{-XCIX}$) [18].

3.2.5. Transportní vrstva děr

Transportní vrstva děr se používá k přijímání děr vytvořených ve vrstvě perovskitu a jejich přenášení na povrch kovové elektrody. Podle chemického složení mohou být materiály pro přepravu děr v perovskitových solárních článcích rozděleny do dvou typů: organických a anorganických [19].

Nejčastěji používaným materiálem pro přepravu děr je Spiro-OMeTAD. Mezi další materiály patří PEDOT: PSS, PCDTBT, PCPDTBT a také kovy, jako například Au, Ag a Pt [27].

3.2.6. Substrátová elektroda

Jedná se o klasickou kovovou elektrodu pro vytváření elektrického kontaktu. Pro výrobu se obvykle používá stříbro a zlato [18].

3.3. Celkový přehled

Perovskitové solární články se rychle rozvinuly, ale některé kritické faktory mohou omezit jejich vývoj.

Za prvé, stabilita perovskitu je značně ovlivněna vnějšími faktory prostředí (vlhkost, teplota a ultrafialové záření), což vede k nízké stabilitě zařízení a velkým obtížím při zapouzdření solárních článků. Proto je vývoj zařízení s vysokou stabilitou, včetně vrstvy absorbující světlo, přenosové vrstvy elektron – díra a materiálů elektrod, bude mít velký význam pro podporu praktické použitelnosti [28].

Za druhé, materiál pro dopravu děr Spiro-OMeTAD používaný v perovskitových solárních článcích je dostatečně drahý (desetinásobek tržní ceny zlata) a jeho syntézní proces je složitý. Proto je nutné navrhnout nové materiály pro přepravu děr, které podporují komerční využití perovskitových solárních článků.

Za třetí, je obtížné uložit velké množství kontinuálního perovskitového filmu použitím tradičních metod, a proto by měly být navrženy další metody pro přípravu vysoce kvalitních a velkých ploch perovskitových solárních článků pro komerční výrobu v budoucnu.

Za čtvrté, Pb prvek použitý v perovskitových solárních článcích je vysoce toxický, což brání průmyslovému rozvoji a vývoji perovskitových solárních článků. Proto je nutné nalézt v budoucnu látku s nízkou toxicitou nebo vůbec netoxickou látkou, která by nahradila Pb.

Za páté, chybí hluboké pochopení mikroskopického fyzického mechanismu perovskitových solárních článků. Proto je nutné vytvořit úplný teoretický model, který by vysvětlil důvody pro zvýšení účinnosti [18, 28].

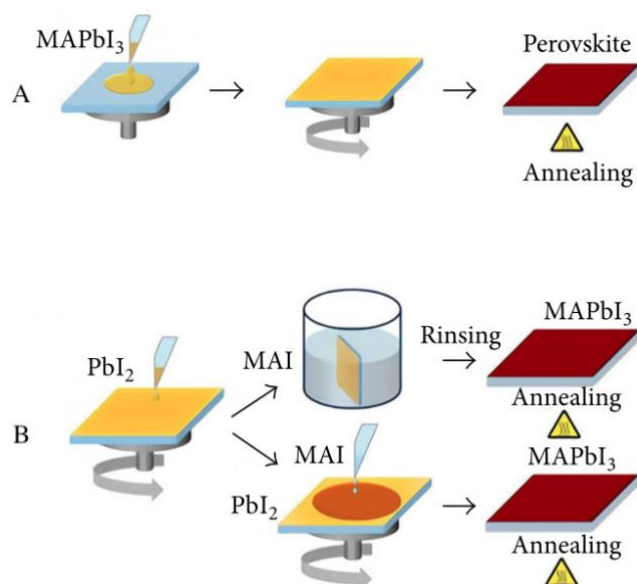
Teoretický výzkum může přispět nejen k dalšímu zlepšení výkonu perovskitových solárních článků, ale také předložit nápady pro vývoj jednodušších a účinnějších nových materiálů a struktur. Shrnutím lze říct, aby se perovskitové solární články mohli plně uplatnit ve fotovoltaice musí na začátku všechny výše uvedené problémy najít své řešení [18, 28].

4. METODY SYNTÉZY PEROVSKITOVÉ VRSTVY V PSČ

Neoddělitelnou částí perovskitových fotovoltaických článků je vrstva perovskitu. Pro její výrobu existuje řada metodik, mezi kterými nejdůležitějšími jsou metoda roztoků, metoda parní depozice a metoda roztoků asistovaná parami.

4.1. Metoda roztoků

Syntézu použitím metody roztoků perovskitových materiálů lze rozdělit na jednostupňovou a dvoustupňovou podle počtu kroků ukládání [41]. Níže je uvedeno schematické znázornění metodiky.



Obr.10. Syntéza použitím metody roztoků. A – jednostupňová metodika, B – dvoustupňová metodika [41].

Jednostupňovou metodu lze popsat tak, že se nejprve rozpustí perovskitové suroviny včetně olovnatých zdrojů (PbI₂, PbCl₂ atd.) a organických zdrojů (MAI, MAX, FAI atd.) ve vhodných rozpouštědlech jako je DMF, GBL nebo DMSO. Získaný roztok je potom potahován na substrát. Dále následuje tepelné žihání (většinou kolem 100 ° C), které je zapotřebí k úplné krystalizaci perovskitového filmu. Způsob jednostupňové depozice je poměrně jednoduchý, ale není tady snadné řídit morfologii a velikost syntetických krystalů [41, 42].

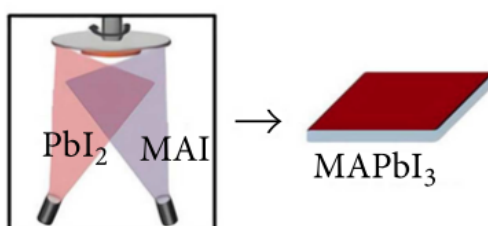
Při metodě dvoustupňové depozice ve velmi raných stádiích se na substrát nanese roztok PbI₂ v DMF tak, že se vytvoří vrstva PbI₂ a film se po určité době udržuje na

nízké teplotě (kolem 70 ° C). Po usušení se film ponoří do roztoku MAI v 2-propanolu (např. 10 mg / ml) a poté se opláchne v čistém 2-propanolu, aby se zbytkový MAI vymyl. Obvykle je pro krystalizaci vyžadován další proces tepelného žhání, po které se dvojvrstvá struktura PbI_2 / MAI přemění na perovskity [42, 43].

Metoda roztoků je relativně jednoduchá a ekonomická, avšak v syntetických krystalech se tvoří více vnitřních defektů a transportní vrstva děr je v přímém kontaktu s transportní vrstvou elektronů, což velmi snižuje plnicí faktor zařízení a napětí v otevřeném obvodu [41].

4.2. Metoda parní depozice

Metoda parní depozice perovskitu se obecně provádí za vysokých podmínek vakua. Perovskitové suroviny včetně olovnatých (např. PbX_2) a organických (např. MAX) zdrojů jsou uloženy současně nebo střídavě na předem potažený substrát TiO_2 tepelným odpařováním, kde se při vhodné teplotě a atmosféře vytvoří MAPbX_3 a pak krystalizuje se do perovskitového filmu [45, 46]. Schematický přehled metody je znázorněn níže na obrázku č. 11.



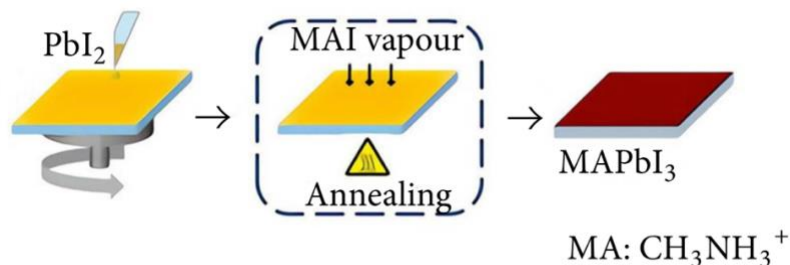
Obr.11. Metoda parní depozice [41].

Perovskitové filmy připravené způsobem parní depozice vykazují vysokou hustotu povrchu a méně defektů, což zlepšuje plnicí faktor a možné napětí v otevřeném obvodu. Avšak metoda vyžaduje vysokou teplotu, aby se pevný PbI_2 odpařil do páry, a má vysoké požadavky na zařízení a může způsobit toxické plyny. Nevýhody syntézy by se daly předejít, pokud by namísto PbI_2 byl vyvinut nový halogenid kovu s nízkou teplotou odpařování a nízkou toxicitou [41, 44].

4.3. Metoda roztoků asistovaná parami

Metodu roztoků asistovanou parami lze popsat tak, že olovnatý zdroj perovskitové suroviny (např. PbX_2) se metodou roztoků nanese na sklo FTO pokryté TiO_2 . Dále se zrna

MAPbX₃ rozrůstají díky reakci v parách organického zdroje perovskitové suroviny (např. MAX) při teplotě 120-165 °C v dusíkové atmosféře po dobu 2 až 4 hodin [47]. Níže je znázorněn přehled této metody.



Obr.12. Metoda roztoků asistovaná parami [41].

Popsaná metodika je poměrně úsporným druhem syntézy vysoce kvalitních perovskitových vrstev absorbujících světlo. Byla vyvinuta hlavně proto, aby se zabránilo nevýhodám metody roztoků a parní depozice [47].

Avšak stejně není tato metoda dokonalá a má své záporné vlastnosti. Tak, například, nemohou PbX₂ filmy na dně zcela reagovat s parami MAX, čímž se zvyšuje vnitřní odpor a snižuje se výstupní výkon perovskitových buněk [41].

5. METODY MĚŘENÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

V dnešní době se velké naděje kladou na dostávání energie z obnovitelných přírodních zdrojů. Jedním z nejslibnějších zdrojů je energie slunečního záření. Pro dostávání a použití této energie se používají solární články sestavené do solárních panelů.

Aby této energii bylo možné získat co nejvíce je zapotřebí aby solární články měli co největší účinnost. Pro zlepšování účinnosti a zdokonalení použití těchto článků existují speciální metody, které umožňují stanovit nejlepší cesty pro další výzkum. V dnešní době nejpoužívanějšími metodami jsou **metoda impedanční spektroskopie** a **metoda fotoimpedanční spektroskopie**.

5.1. Impedanční spektroskopie

Impedanční spektroskopie (IS) je rozdělena do dvou kategorií: elektrochemická IS a dielektrická IS. Hlavní rozdíl spočívá v materiálu, zařízení nebo studovaném systému: jak je naznačeno jménem, druhá kategorie (DIS) zahrnuje analýzu dielektrických materiálů s převládajícím elektronickým vedením, zatímco první kategorie (EIS) vztahuje na materiály, u nichž je iontové vedení převládající nad elektronickým [30].

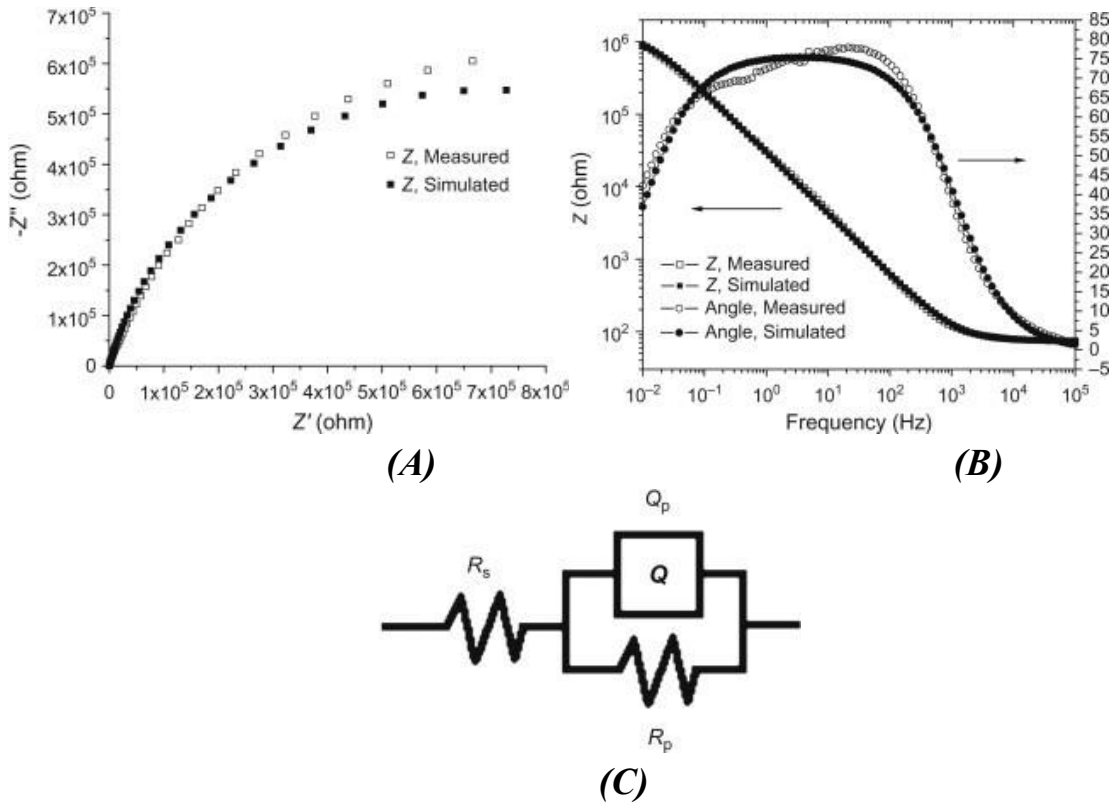
Příkladem použití této metody je z velké části studium jevu koroze a výzkum elektrochemických a fotoelektrochemických buněk, jako například palivové články, baterií a solární zařízení [29, 30].

5.1.1. Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS)

EIS je založen na aplikaci střídavého napětí (nebo proudu, ve případě galvanostatického EIS) do studovaného systému a na analýze odezvy střídavého proudu (napětí) jako funkci kmitočtu (od mHz až do jednotek MHz). Obvykle se provádí pomocí potenciostatů a analyzátorů frekvenční odezvy (FRA) a může se provádět v konfiguraci dvou nebo tří elektrod, v závislosti na přítomnosti referenční elektrody [31].

Pro prezentaci dat EIS se zpravidla využívají dvě různé reprezentace. První z nich uvádí Z "jako funkci Z " v komplexní rovině a nazývá se to jako Nyquistova diagram. Nyquistova reprezentace je kompaktnější než následující, a to i v případě, že frekvenční závislost není výslovně zřejmá. Druhou reprezentací jsou grafy Bode. Jsou to dvojice

grafů s hlášením $\log |Z|$ a θ jako funkce $\log f$ [30]. Ukázka výstupů dané metody je uvedena na Obr.13.



Obr.13. Nyquistova diagram (A) a Bodeho diagram (B) pro slitinu Ti_6Al_4V v roztoku $NaCl$. Elektrický ekvivalentní obvod používaný pro simulaci naměřených dat (C) [32].

Při měření EIS se na studovaný systém aplikuje malý signál sinusové napětí $V(\omega, t) = V_0 \sin \omega t$ s amplitudou V_0 a proměnnou frekvencí $f (f = \omega / 2\pi, \text{kde } \omega \text{ je úhlová frekvence})$ a odezva (proud $I(\omega, t)$) se měří na stejných frekvencích. Impedance $Z(\omega, t)$ související se systémem lze pak vypočítat podle Ohmova zákona jako:

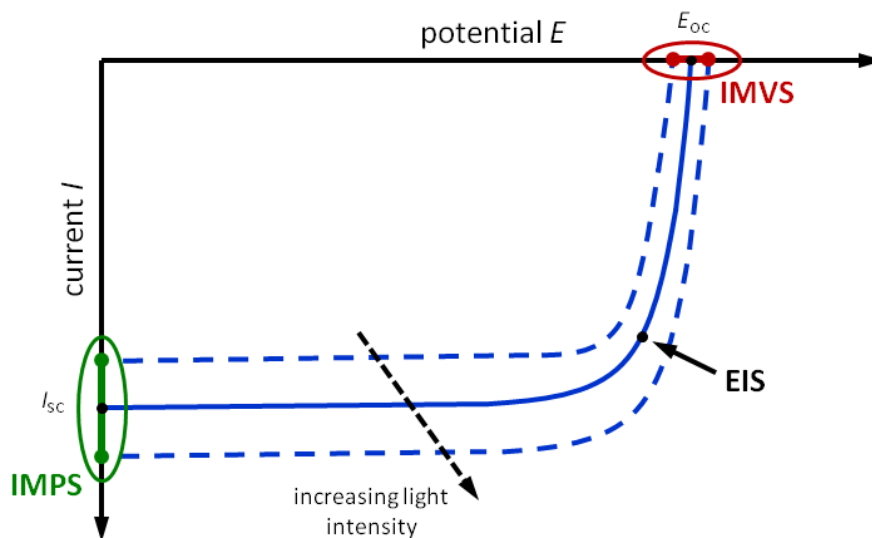
$$Z(\omega, t) = \frac{V(\omega, t)}{I(\omega, t)} \quad (5.1) [31].$$

5.2. Fotoimpedanční spektroskopie

Další široce používanou metodou měření je metoda fotoimpedanční spektroskopie. Hlavní princip této metody je velmi podobný předchozí klasické IS, jen hlavním rozdílem je, že tady je zkoumaná elektrická odezva ne na střídavý proud, ale na záření světla o určité intenzitě. Cílem této metody je studium pohybu nosičů náboje, jejich transportní a rekombinační doby.

5.2.1. IMPS, IMVS

Metoda fotoimpedanční spektroskopie poskytuje dva typy měření: intenzitou modulovaný fotonapětí (IMPS) a intenzitou modulované fotonapětí (IMVS). Jsou to úzce související techniky, při kterých je intenzita záření světelného zdroje (obvykle je to dioda emitující světlo) modulována o několik málo procent a je pak sledována vyvolaná elektrická odezva (fotoproud nebo fotonapětí) [33].



Obr.14. Přehled podmínek měření pro IMPS a IMVS [34]

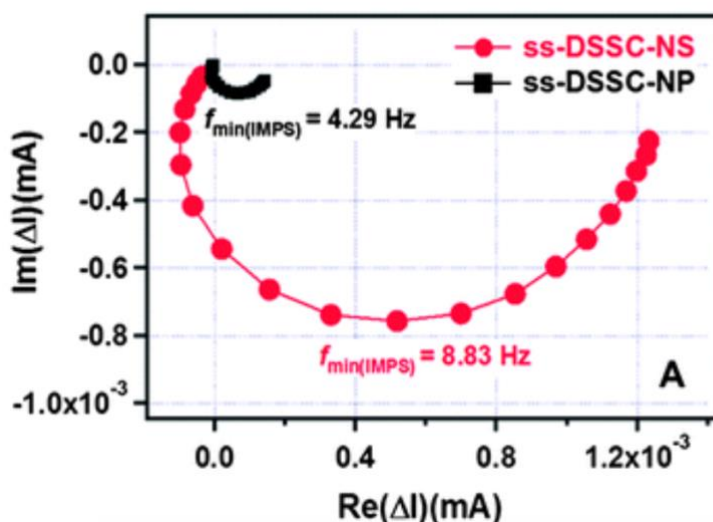
Během měření IMPS je napětí na článku nastaveno na 0 V (napětí naprázdno), což slouží podmínkou pro generování fotoproudu. Segment zelené čáry na výše uvedeném obrázku ukazuje rozsah měření během IMPS (Obr.14) [34].

Při zkratových podmínkách je mezera mezi valenčním a vodivým pásmem polovodičů maximální. Výsledkem je, že do vodivého pásma nejsou vstříkovány téměř

žádné elektrony a generuje se tzv. fotoproud, ze kterého lze pak určit transportní dobu nosičů náboje podle vztahu:

$$\tau_{tr} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{IMPS}} \quad (5.2),$$

kde f_{IMPS} je frekvence v lokálním minimu na Nyquistova diagramu (Obr.15) [34].



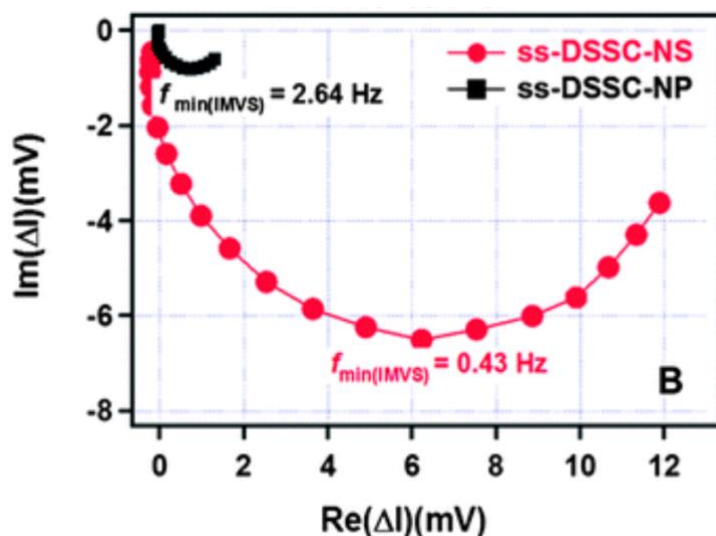
Obr.15. Ukázka zobrazení odezvy IMPS [35]

Při měření IMVS je nutno nastavit proud nakrátko, čímž bude splněna podmínka pro generování fotonapětí. Segment červené čáry ukazuje rozsah naměřený během IMVS (Obr.14) [34].

Mezera mezi valenčním a vodivým pásem je v tomto případě minimální, proto většina generovaných fotoelektronů je vstříkována do vodivého pásma polovodičů. Navíc měřený solární článek dosáhne ustáleného stavu, což znamená, že rychlost elektronového vstříku do vodivého pásma je stejná jako rychlost rekombinace elektronů a lze ji určit ze vztahu:

$$\tau_{rec} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{IMVS}} \quad (5.3),$$

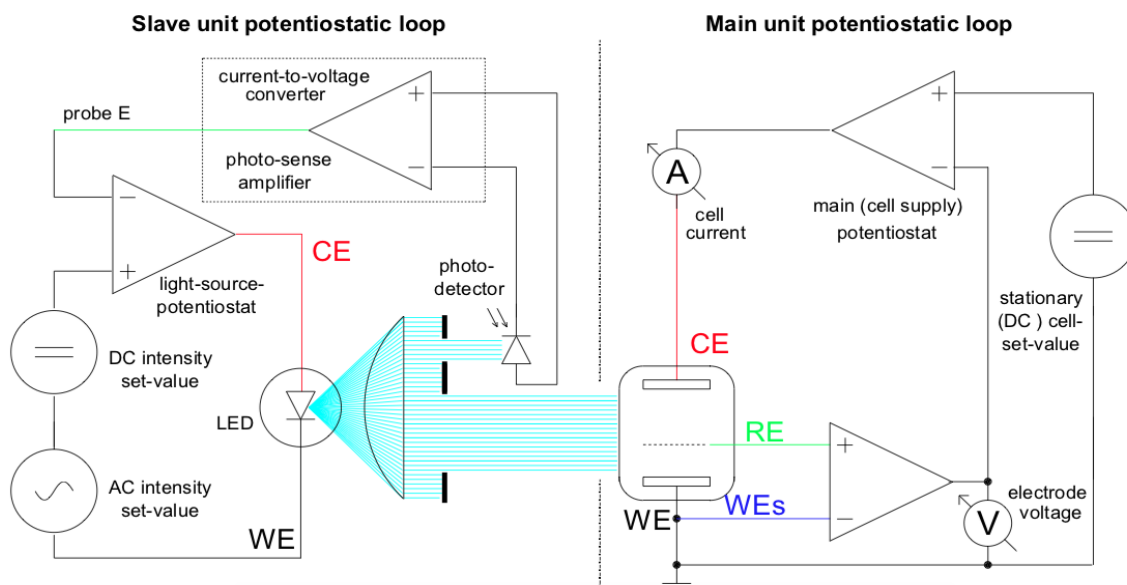
kde f_{IMVS} je frekvence v lokálním minimu na Nyquistova diagramu (Obr.16) [34].



Obr.16. Ukázka zobrazení odezvy IMVS [35]

5.2.2. CIMPS

Pro výzkum se zaměřením na speciální požadavky dynamických fotoelektrických metod měření, jako jsou IMPS a IMVS, byl společností Zahner navržen měřicí systém CIMPS, který je dnes často používán v oblasti alternativních solárních článků. Přehled toho systému je znázorněn níže na obrázku č.17 [37].

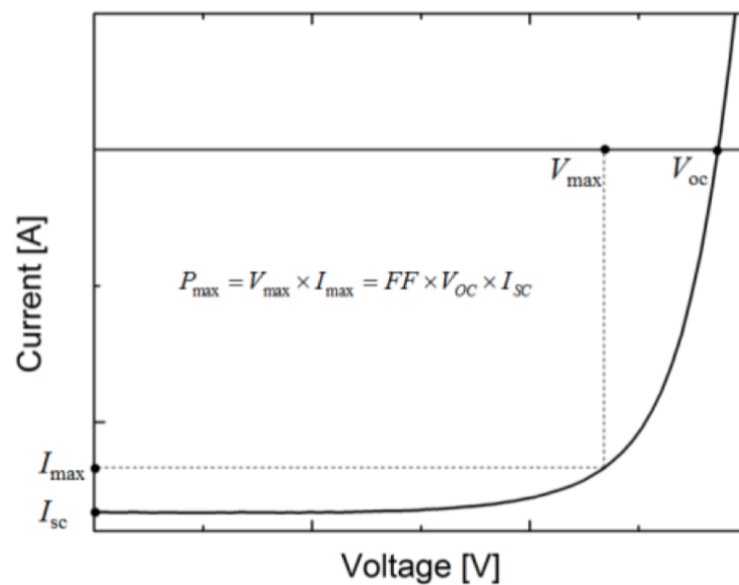


Obr.17. Schéma principu CIMPS, kde RE – referenční elektroda, WE – pracovní elektroda, CE – pomocná elektroda. Reakční smyčka fotodiodového detektoru (photo-detector) / fotozesilovače (photo-sense amplifier) tedy zesiluje intenzitu světla tak, aby přesně sledovala součet nastavených hodnot intenzity AC a DC [37].

5.3. Další metody měření

5.3.1. Metoda zatěžovacích charakteristik

Měření křivek elektrického proudu versus napětí (V-A charakteristika) solárního článku nebo modulu poskytuje velké množství informací. Lze pomocí této metody získat takové parametry solárních článků jako jsou zkratový proud (I_{sc}), napětí naprázdno (V_{oc}), proud I_{mp} a napětí U_{mp} v maximálním výkonu P_{max} , faktor plnění (FF) a účinnost (η). Příklad výstupu dané metody je znázorněn na Obr.18 [36].



Obr.18. Ukázka V-A charakteristiky solárního článku při osvětlení [36]

5.3.2. OCVD

OCVD (The open-circuit voltage decay) je další metoda měření, která se používá ve fotovoltaice. Snadno se provádí, interpretace experimentálních dat je poměrně přímočará, a navíc se očekává dobrá korelace se skutečnými elektrickými parametry zařízení. Používá se hlavně pro stanovení rekombinační doby nosičů náboje [40].

5.3.3. CELIV

Dalším přístupem k měření pohyblivosti nosičů náboje a jejich rekombinaci v solárních článku je CELIV (Extrakce nosiče náboje lineárně zvyšujícím se napětím). Díky své schopnosti měřit tyto dva parametry současně tato technika našla své využití v oblasti organických polovodičů. Nicméně teorie pro výpočet aktuální odezvy v důsledku lineárně rostoucího napětí byla prezentována pouze pro zjednodušené případy nízkého a vysokého režimu vodivosti [38, 39].

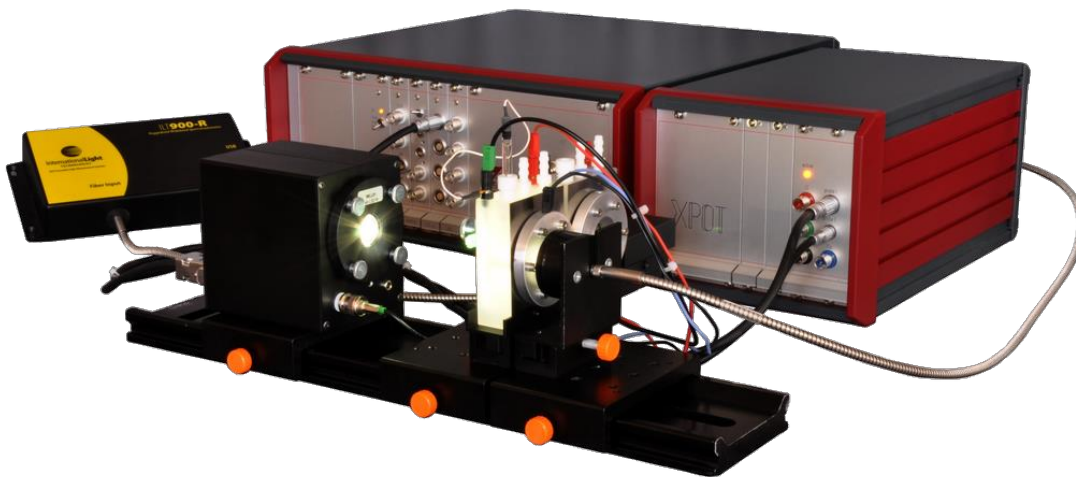
6. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část je zaměřená na provedení dvou typů měření: statického a dynamického. **Statické měření** zahrnuje v sobě Převodovou charakteristiku a Výkonovou charakteristiku s výpočtem maximálního výkonu článku, činitele plnění a účinnosti. **Dynamické měření** se provádí za použitím metod fotoimpedanční spektroskopie a klasické impedanční spektroskopie, jejíž pracovní princip je popsán v kapitole č. 5.

6.1. Použité zařízení

Pro měření solárního článku bylo použito zařízení ABS-1 CIMPS společnosti Zahner, který je zaměřen na výzkum fotocitlivých vzorků. Tento systém umožňuje provádění statického měření proudu a napětí v závislosti na změně intenzity světla a použití dynamických metod jako jsou metody fotoimpedanční spektroskopie a klasické impedanční spektroskopie.

Zařízení se skládá ze samotného potenciostatu Zahner ABS-1, ke kterému se připojují UV-VIS-IR spektrometr, dva foto-elektrochemické články PECC-2 na automatické podložce a zdroj bílého světla WLR02 LED (420-730 nm) řízený intenzitou vysokého výkonu (Obr.19).



Obr.19. Zahner ABS-1 CIMPS [Zdroj: <http://www.sciencetech-inc.com>]

Světelnost zdroje je možné nastavovat buď regulací napětí zdroje, nebo nastavením intenzity za použitím příslušného CIMPS-abs softwaru.

6.2. Testování metodik měření na solárním článku na bázi křemíku.

6.2.1. Statické měření

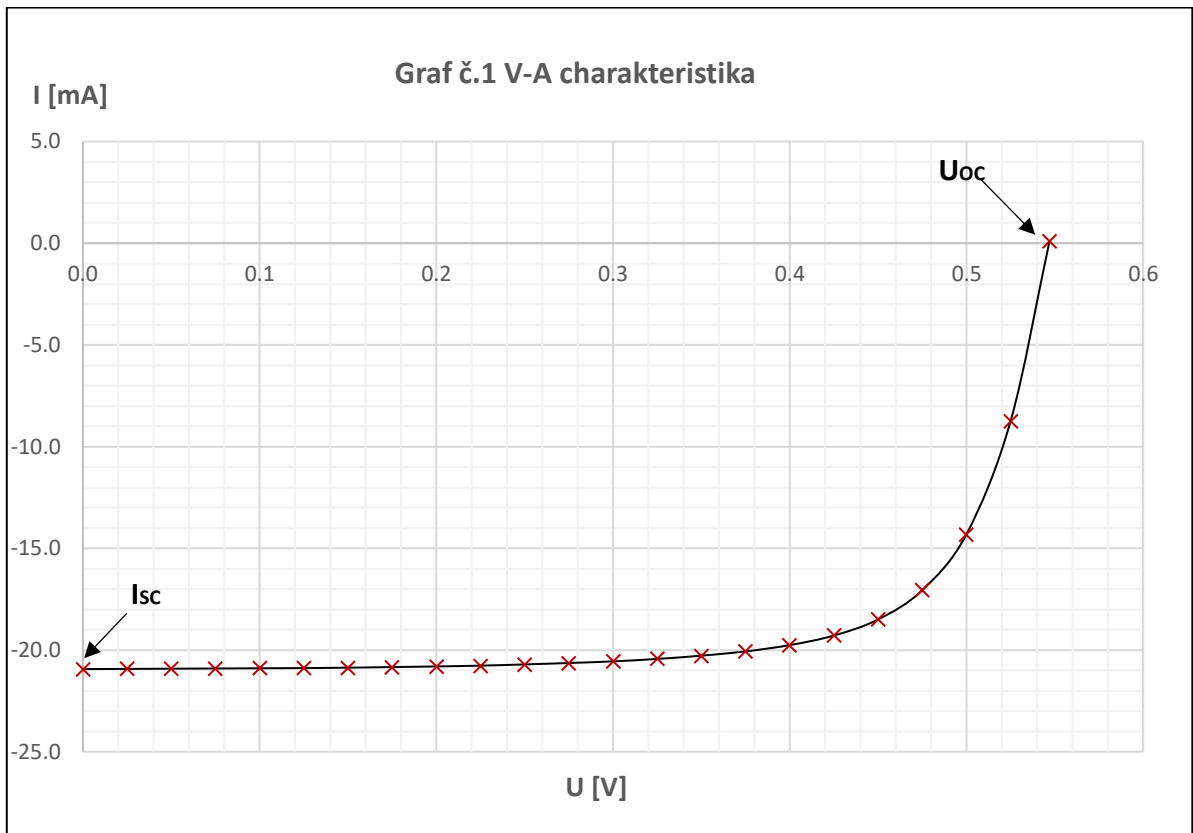
Úkolem statického měření tady je stanovit maximální výkon P_{MAX} daného článku a vypočítat činitel plnění FF, což je mírou kvality solárního článku.

Použitím připraveného zařízení a CIMPS-abs softwaru byla změřena V-A charakteristika, ze které lze pak odečíst potřebné zkratový proud a napětí naprázdno. Měření bylo provedeno nastavením hodnoty napětí od 0 V do 0,547 V s krokem 25mV a odečtením příslušné hodnoty proudu. Výsledky jsou uvedeny v tabulce Tab.1.

Tab.1. Změřené hodnoty napětí a proudu a vypočtené hodnoty výkonu

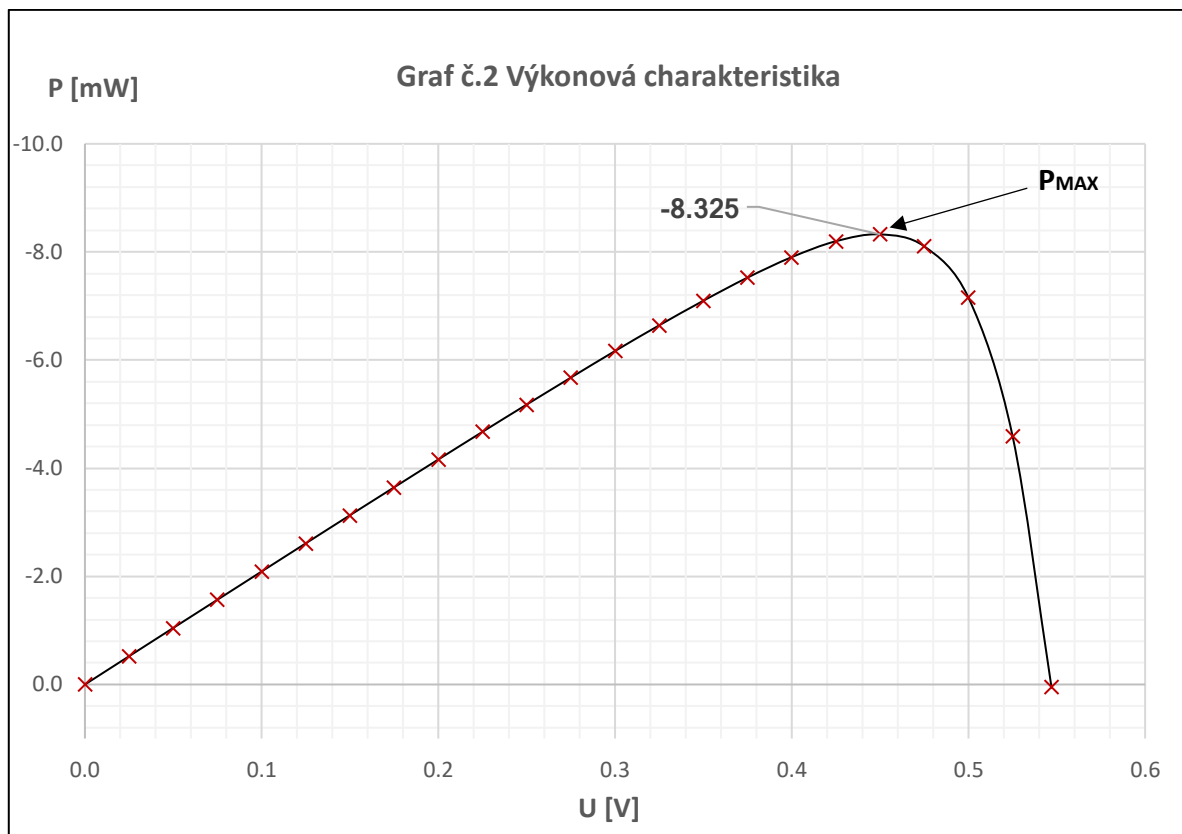
I [mA]	U [V]	P [mW]
0,09	0,547	0,050
-8,74	0,525	-4,591
-14,31	0,500	-7,155
-17,06	0,475	-8,104
-18,50	0,450	-8,325
-19,29	0,425	-8,198
-19,76	0,400	-7,904
-20,07	0,375	-7,526
-20,28	0,350	-7,098
-20,44	0,325	-6,643
-20,56	0,300	-6,168
-20,64	0,275	-5,676
-20,71	0,250	-5,178
-20,77	0,225	-4,673
-20,81	0,200	-4,162
-20,84	0,175	-3,647
-20,87	0,150	-3,131
-20,89	0,125	-2,611
-20,90	0,100	-2,090
-20,91	0,075	-1,568
-20,92	0,050	-1,046
-20,93	0,025	-0,523
-20,94	0,000	0,000

Z tabulky č.1 lze vygenerovat následující závislost:



Měření bylo provedeno při normální pokojové teplotě a hodnotě intenzity $E = 200 \text{ Wm}^{-2}$. Z grafu V-A charakteristiky je možné odečíst hodnoty proudu nakrátko I_{sc} a napětí naprázdno U_{oc} .

Dalším bodem je vytváření Výkonové charakteristiky, ze které by bylo možné stanovit hodnotu maximálního výkonu P_{MAX} :



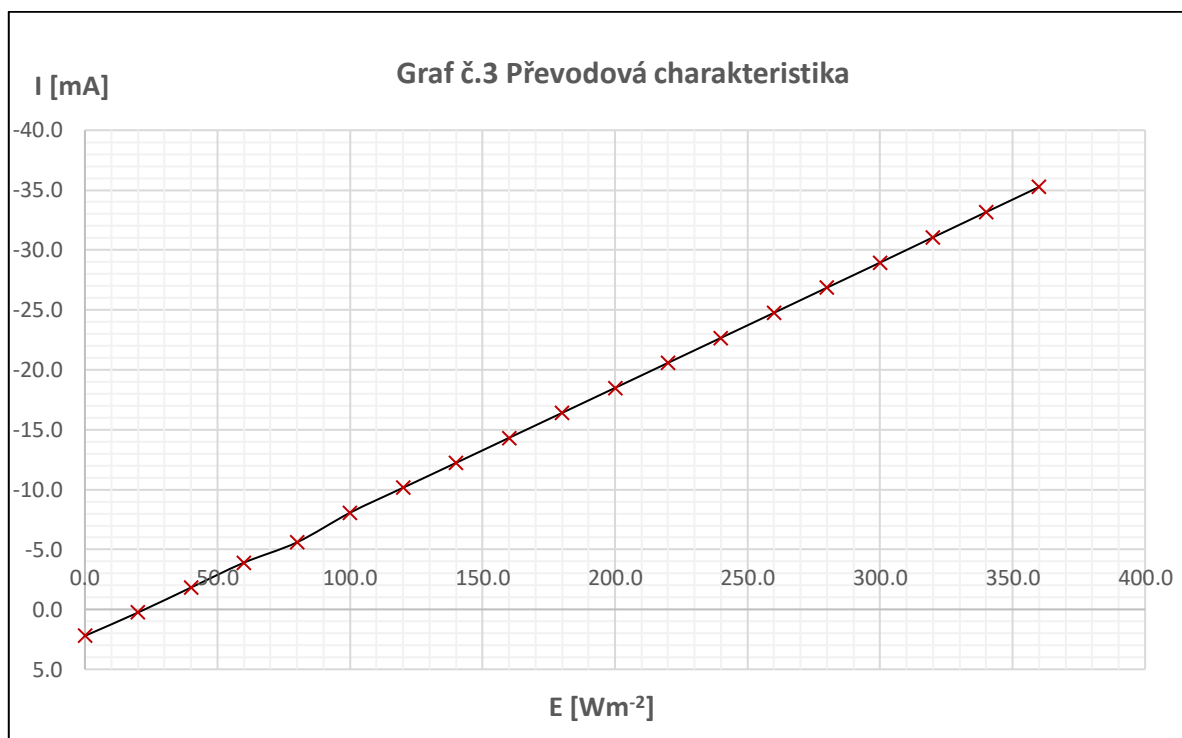
Ted' na základě stanovených z vypočtených hodnot je možné určit činitel plnění FF:

$$FF = \frac{P_{MAX}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} = \frac{-8,325mW}{-20,94mA \cdot 0,547V} = 0,7268 [-] \quad (6.1)$$

Další částí statického měření na křemíkovém článku je určení závislosti výstupní hodnoty proudu na intenzitě vstupního záření (Převodová charakteristika), což je uvedeno v tabulce Tab.2 a zobrazeno na grafu č.3. Měření bylo provedeno při napětí 441mV (napětí použité pro maximální hodnotu výkonu P_{MAX}).

Tab.2. Změřené hodnoty intenzity osvětlení a výstupního proudu.

E [Wm ⁻²]	I [mA]
0	2,21
20	0,26
40	-1,82
60	-3,90
80	-5,60
100	-8,07
120	-10,15
140	-12,23
160	-14,32
180	-16,40
200	-18,49
220	-20,58
240	-22,67
260	-24,76
280	-26,86
300	-28,95
320	-31,06
340	-33,16
360	-35,26

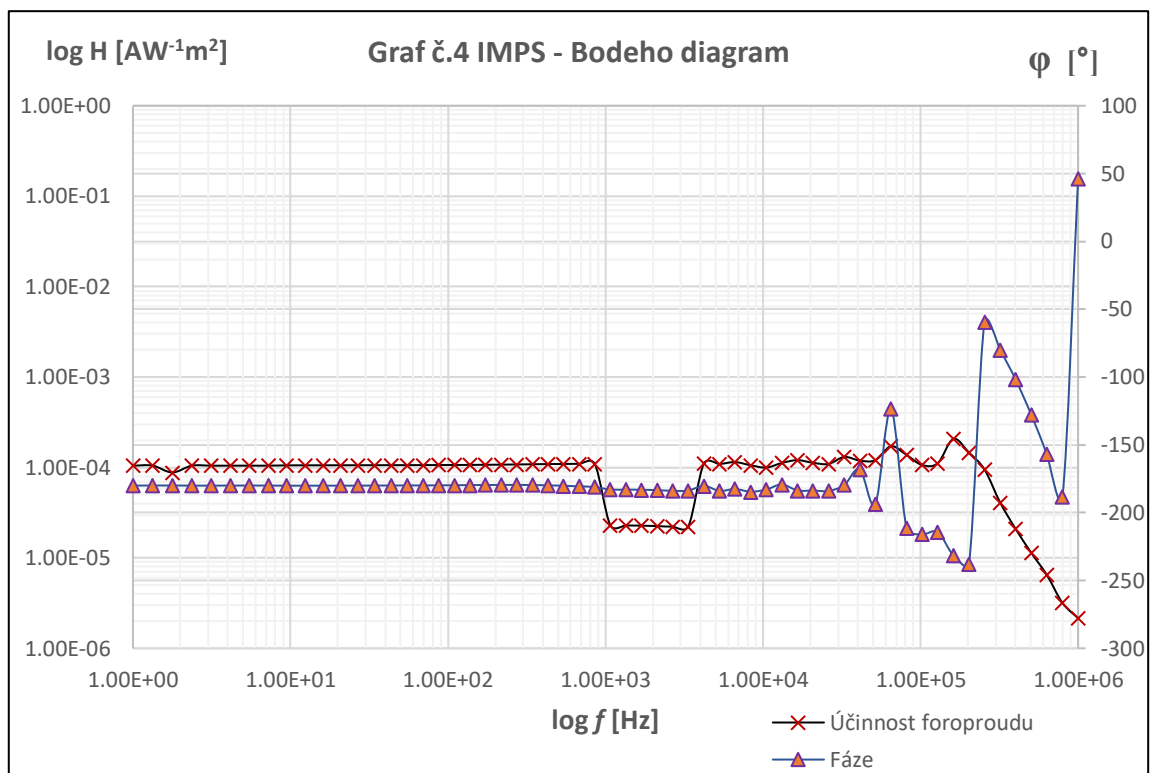


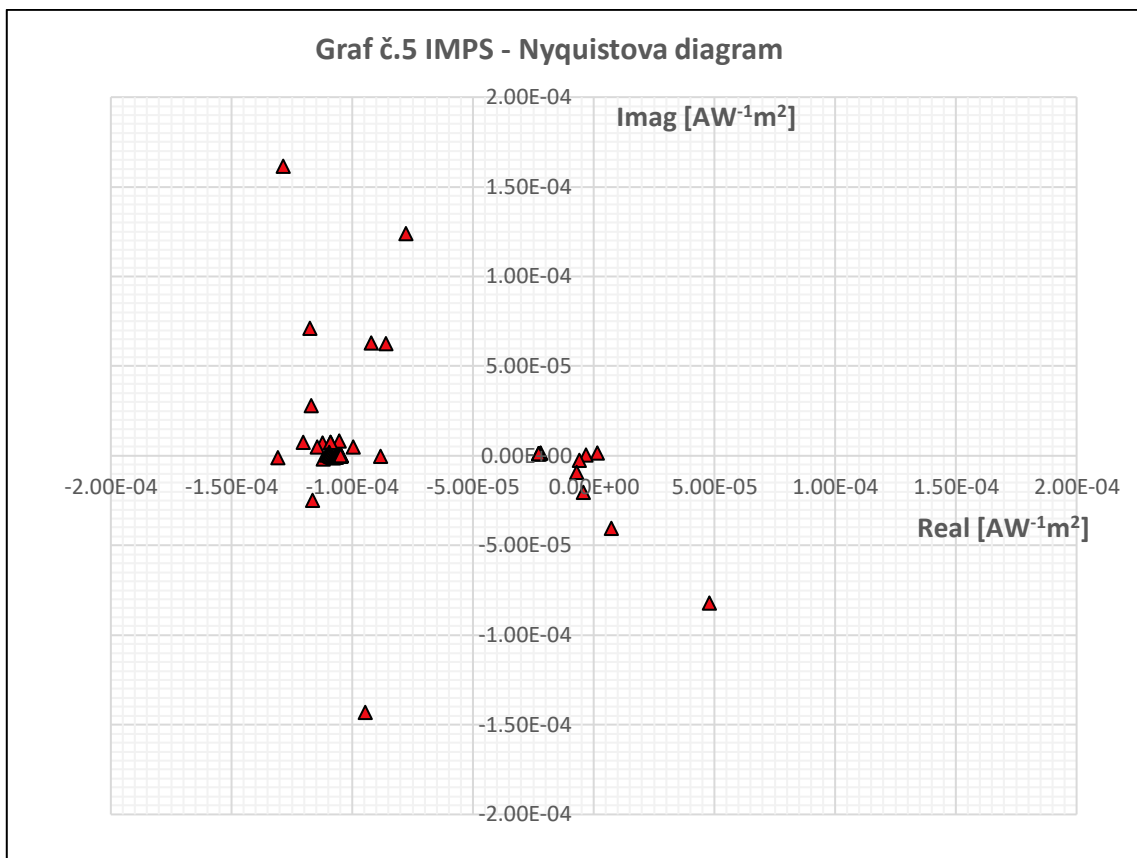
Z grafu č.3 lze konstatovat, že čím menší je úhel mezi přímkou a osou výstupního proudu, tím lepší a účinnější je použitý článek, protože při menší intenzitě záření by dokázal vygenerovat větší hodnotu výstupního proudu.

6.2.2. Dynamické měření

6.2.2.1. IMPS

Během měření IMPS napětí na článku bylo nastaveno na 0 V (napětí naprázdno), což je podmínkou pro generování na výstupu fotoproudu. Intenzita záření byla nastavená na hodnotu $E=200 \text{ Wm}^{-2}$ v celém frekvenčním rozsahu od 1 Hz do 1 MHz. Dále následují změřené charakteristiky vzorku, tj. Bodeho a Nyquistova diagram:



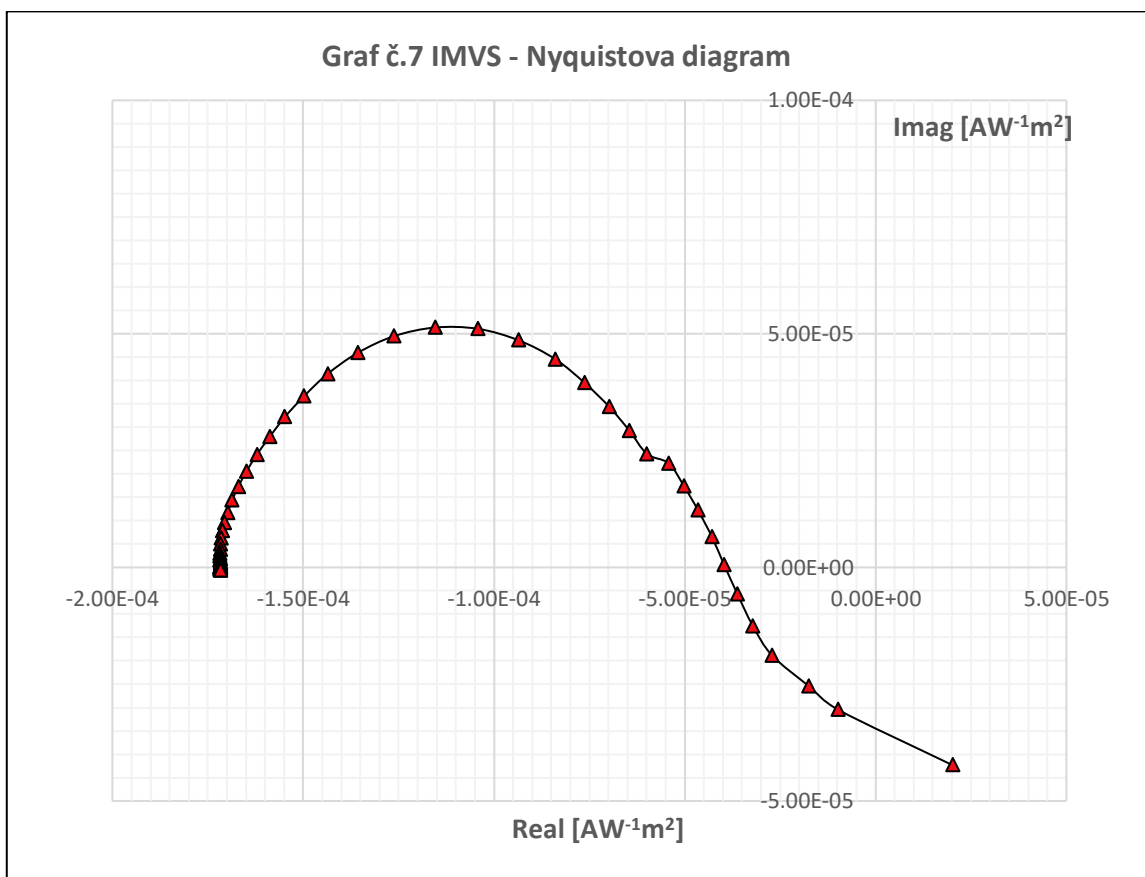
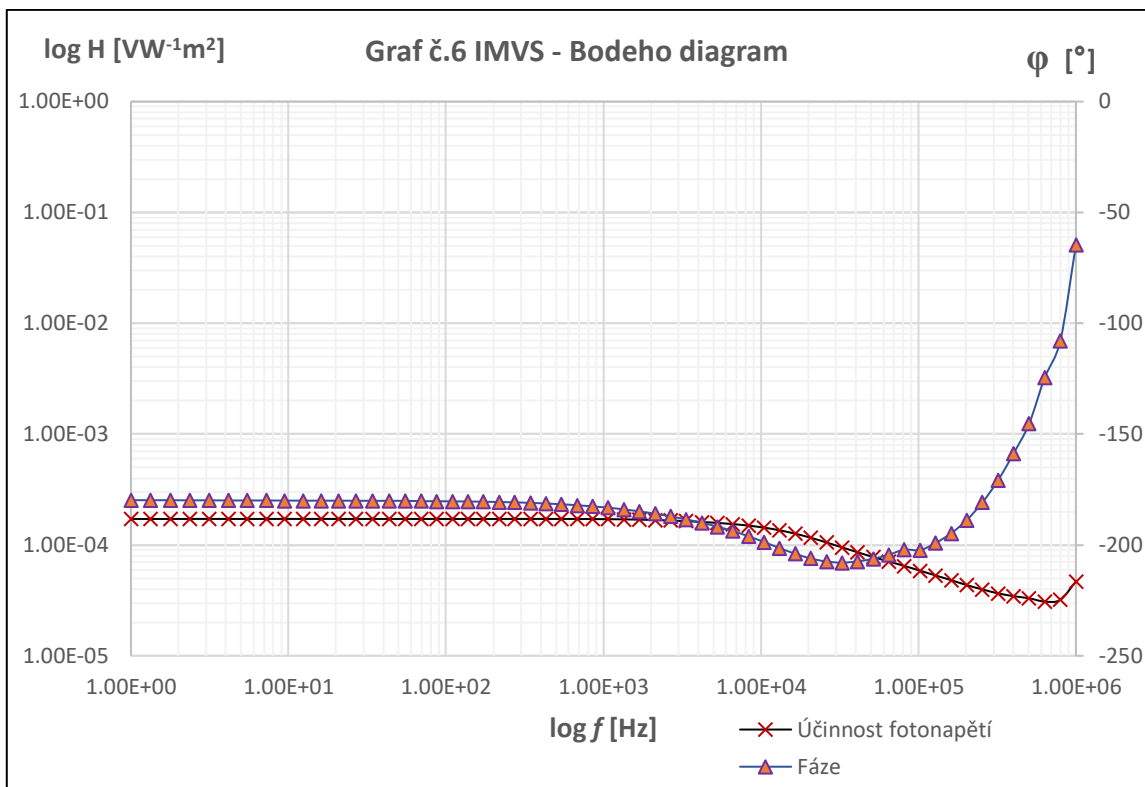


Bodeho grafická prezentace se obecně používá k vyhodnocení dat, protože přímo ukazuje frekvenci každého bodu. Z grafu je vidět, že účinnost fotoproudu na rozsahu od 1 Hz do 40 kHz je stabilní a fázový posuv je zanedbatelně malý. Další průběh závislosti již není stabilní vlivem velké frekvenci. Také z grafu lze poznamenat skok fotoproudové účinnosti na intervalu od 1 kHz do 5 kHz, což pravděpodobně mohlo být způsobeno přepínáním rozsahů na měřicím zdroje.

Křivka **Nyquistova diagramu** by tady měla mít tvar polokruhu, ale vlivem vnějších podmínek tady došlo k velkému rozptylu hodnot. Z maximálního bodu křivky lze tady stanovit frekvenci, která je používaná pro výpočet transportní doby nosičů $\pi\tau$ podle vztahu (4.2).

6.2.2.2. IMVS

Při měření IMVS byl nastaven proud nakrátko pro splnění podmínky pro generování fotonapětí. Intenzita záření byla nastavená stejně jako při měření IMPS na hodnotu $E=200 \text{ Wm}^{-2}$ v celém frekvenčním rozsahu od 1 Hz do 1 MHz. Dále následují změřené charakteristiky vzorku, tj. Bodeho a Nyquistova diagram:



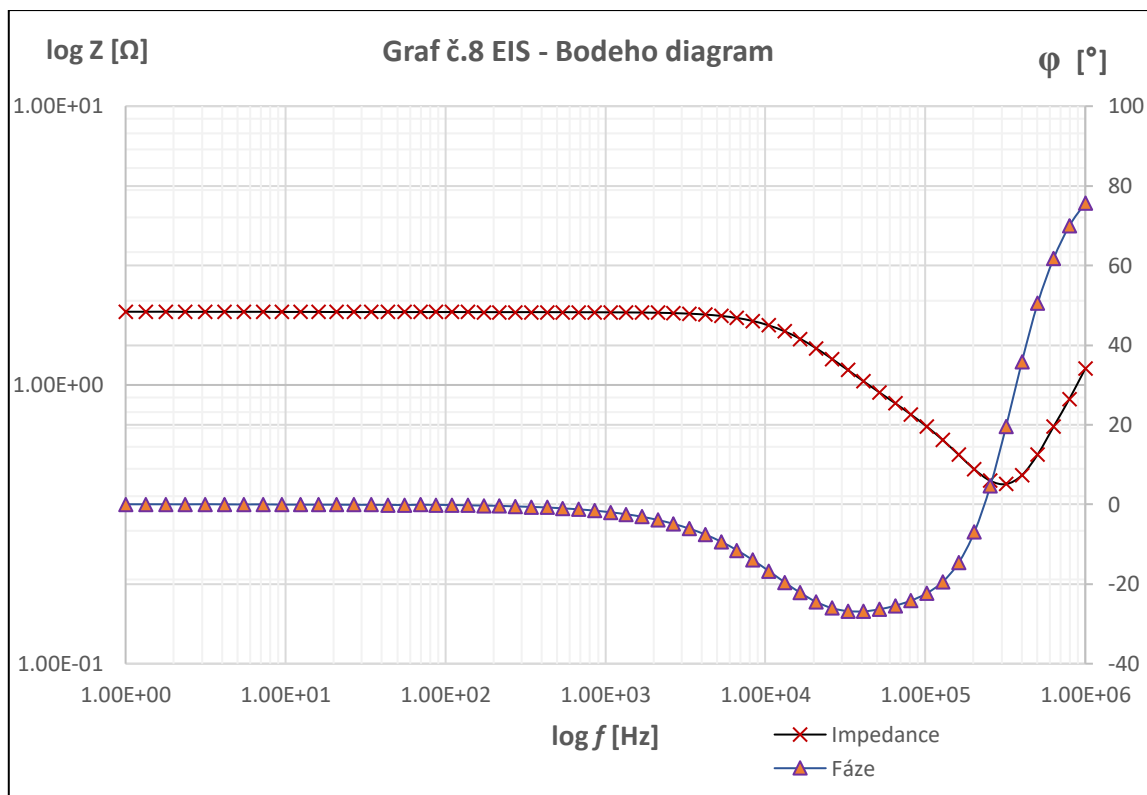
Křivka **Bodeho diagramu** tady, ukazuje podobnou závislost jako ve případě z IMPS, ale fázový posuv začíná růst dříve, na kmitočtu kolem 1 kHz. Také v porovnání z IMPS není tady tak velký rozptyl hodnot na velké frekvenci.

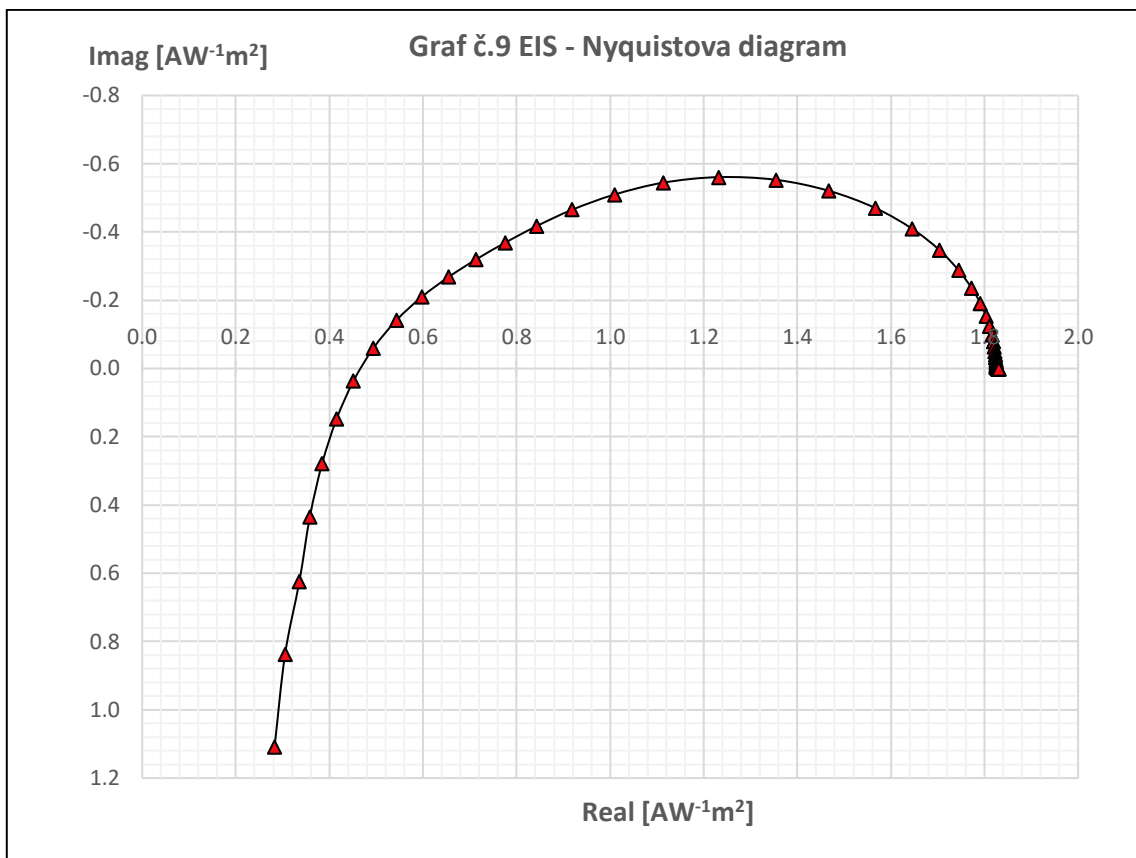
Nyquistova diagramu tady má tvar polokruhu, což odpovídá očekáváním a znamená, že nebyl tady vliv vnějších podmínek tak velký jako ve případě IMPS. Z maximálního bodu křivky můžeme stanovit frekvenci používanou pro výpočet rekombinační doby τ_{rec} ze vztahu (4.3).

Jak je vidět z praktického postupu, Bodeho prezentace a Nyquistova prezentace se obvykle používají spolu, protože i když každá z nich poskytuje určitá data, stejně pro určení časové konstanty je třeba využívat oba dva diagramy. Tím pádem grafy Bodeho diagramu při měření IMPS a IMVS poskytují frekvenci f_{IMPS} a f_{IMVS} , které se pak používají při výpočtu rekombinační a transportní doby nosičů. Současně grafy Nyquistova diagramu ukazují polohu, ze které potřebnou frekvenci lze odečíst.

6.2.2.3. EIS

Při měření EIS na studovaný systém byl aplikován malý napěťový signál s amplitudou 441mV (napětí použité pro maximální hodnotu výkonu P_{MAX}) pro celý frekvenční rozsah od 1 Hz do 1 MHz. Dále následují změřené charakteristiky vzorku:





Maxima při vyšších frekvencích na **Bodeho diagramu** odpovídá přenosu náboje na rozhraní TiO₂ / barviva / elektrolyt. Hodnota impedance je tady na rozsahu od 1 Hz do 1 kHz stabilní s nulovým fázovým posuvem. Dále na hodnotách od 40 kHz již průběh závislosti impedance není stabilní a fázový posuv rychle narůstá vlivem velké frekvenci.

Graf **Nyquistova zobrazení** má tvar polokruhu, jehož hodnoty lze použít pro stanovení časových konstant τ různých elektrochemických jevů.

6.3. Měření charakteristik solárního článku na bázi perovskitu

Měření perovskitového solárního článku bylo prováděno po dobu měsíce v časovém intervalu od 19.2.2019 do 19.3.2019 (19. února, 14. března a 19. března) na dvou vzorkách připravených chemickou fakultou VUT v Brně. Každý vzorek obsahoval 6 perovskitových fotovoltaických článků s aktivní plochou 0,045 cm².

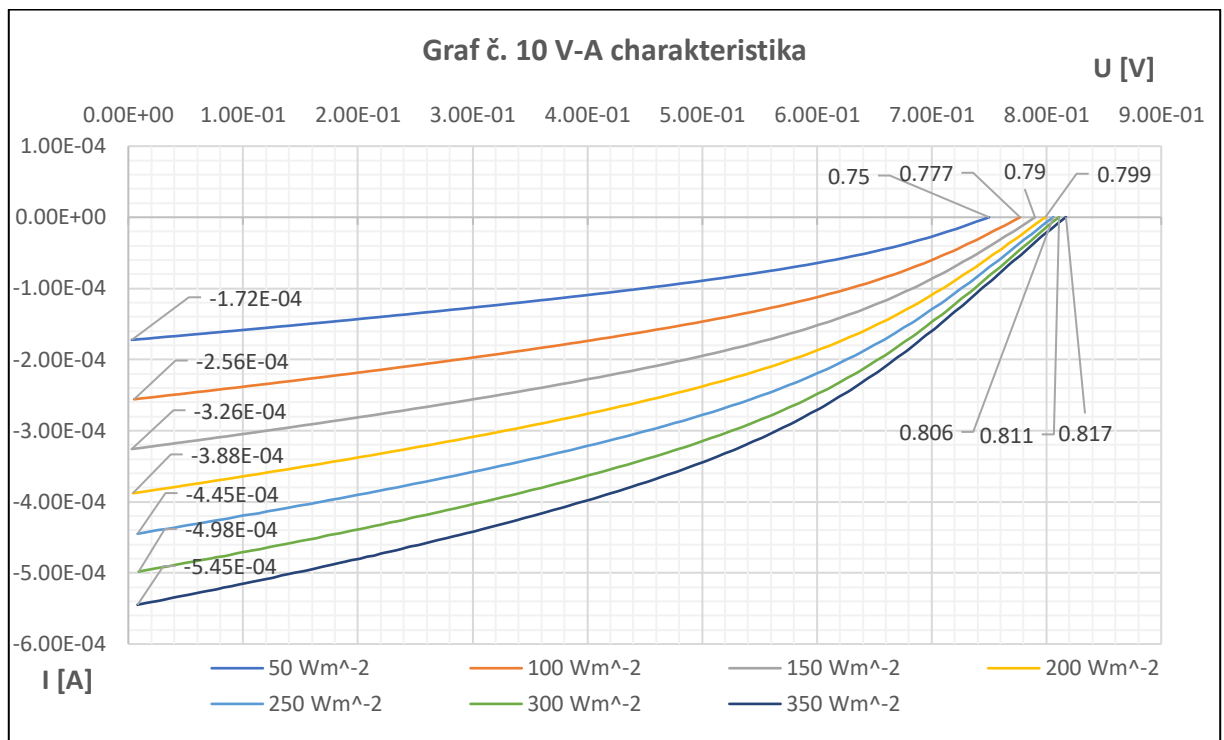
Pro následující lepší zpracování byl podle naměřených hodnot použit třetí článek ze druhého vzorku, poněvadž se choval nejvýrazněji.

Dále v rámci praktické části bude pro vybraný článek ukázán postup měření a výstupy použitých metodik. Zpracování získaných dat proběhne v následující kapitole č.7.

6.3.1. Statické měření

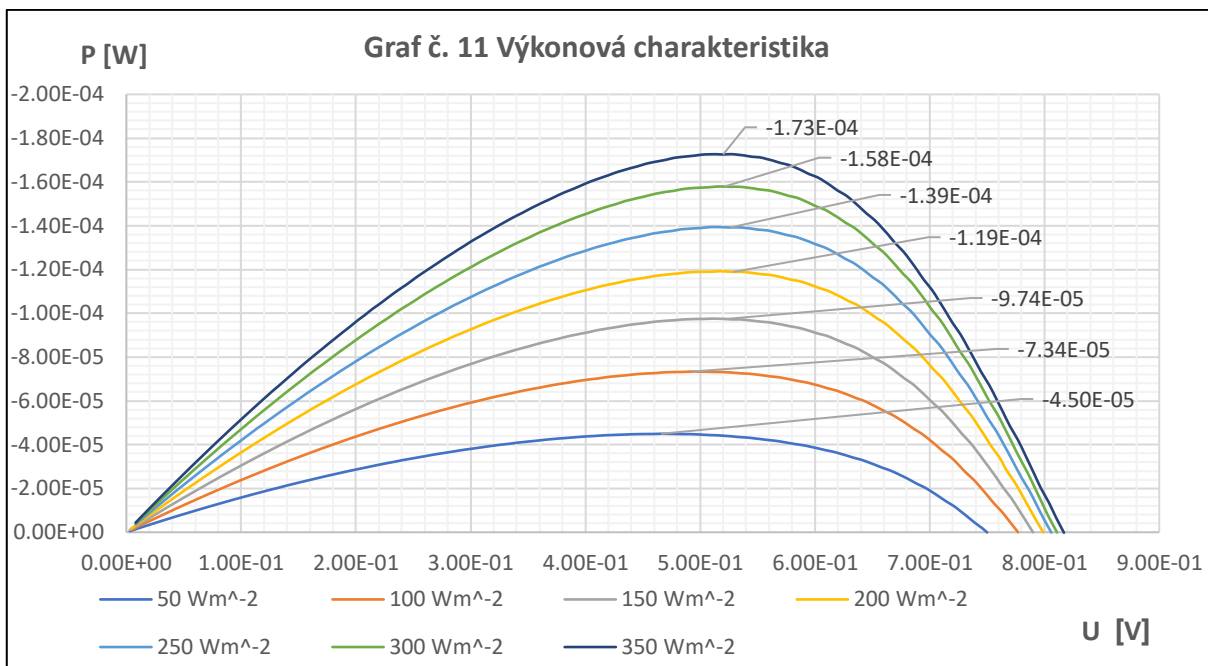
Pro ukázkou získaných grafů statického měření jsou tady použity údaje z 19. února. Ostatní získané závislosti jsou k dispozici v Příloze.

Použitím zařízení Zahner a CIMPS-abs softwaru byla na začátku změřena V-A charakteristika článku. Měření bylo provedeno nastavením hodnoty napětí a změnou intenzity dopadajícího záření z hodnoty $E = 350 \text{ Wm}^{-2}$ do $E = 50 \text{ Wm}^{-2}$. Následně byla odečtena příslušná hodnota proudu. Získaná závislost je uvedena níže:



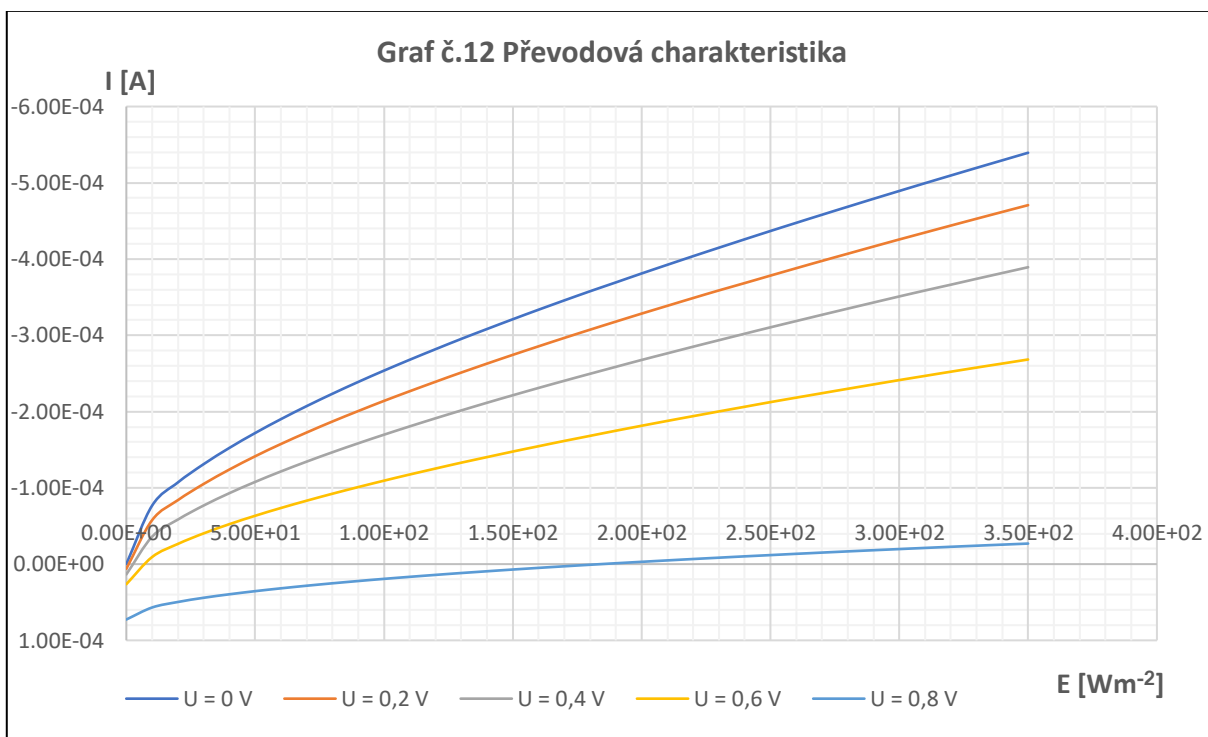
Z grafu tady lze stanovit hodnoty zkratového proudu I_{sc} a napětí naprázdno U_{oc} . Také ze závislosti platí, že při větším působení záření lze získat větší hodnoty proudu a napětí.

Následně z grafu č.10 byla vytvořena Výkonová charakteristika, ze které se potom dá stanovit hodnotu maximálního výkonu P_{MAX} :



Podle očekávání největší hodnota výkonu se také vyskytla při hodnotě $E = 350 \text{ Wm}^{-2}$.

Poslední částí statického měření bylo získání Převodové charakteristiky. Je to vlastně závislost výstupního proudu na měnící se intenzitě záření. Měření probíhalo pro různá napětí (od 0 V do 0,8 V s krokem 0,2 V) a pro intenzitu v rozmezí od $E = 0 \text{ Wm}^{-2}$ do $E = 350 \text{ Wm}^{-2}$.



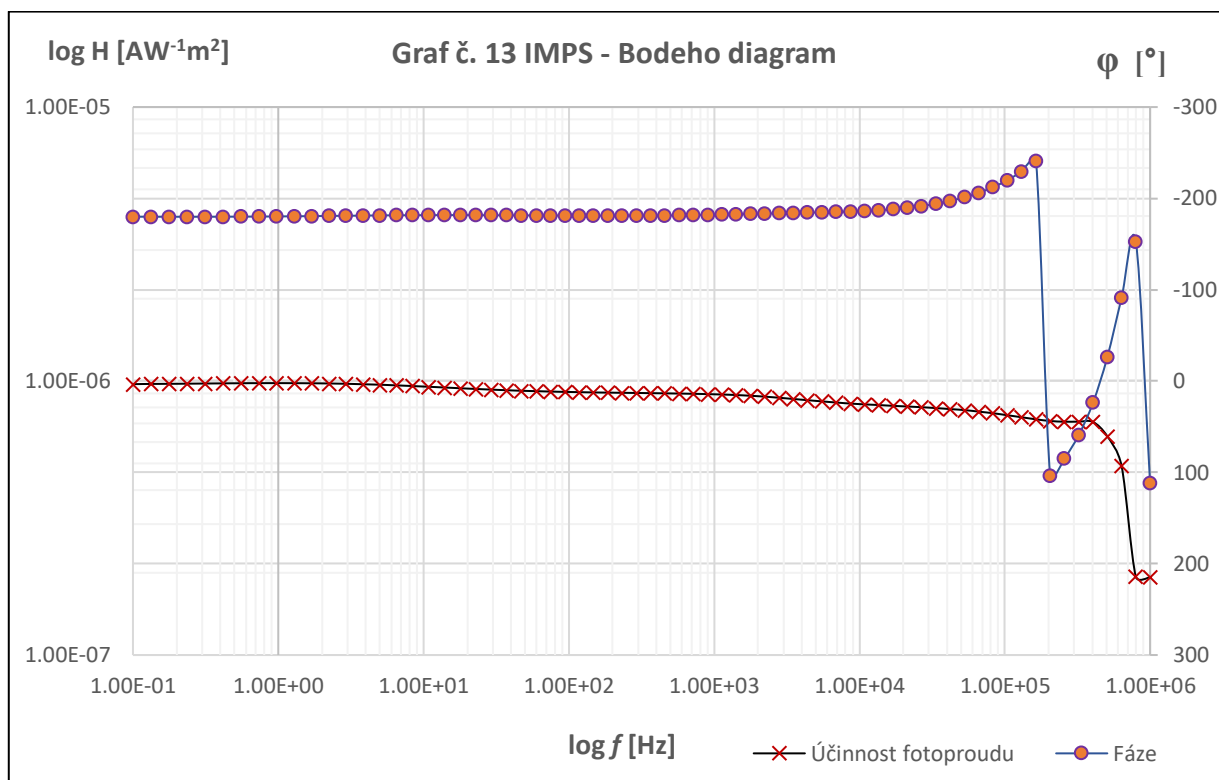
6.3.2. Dynamické měření

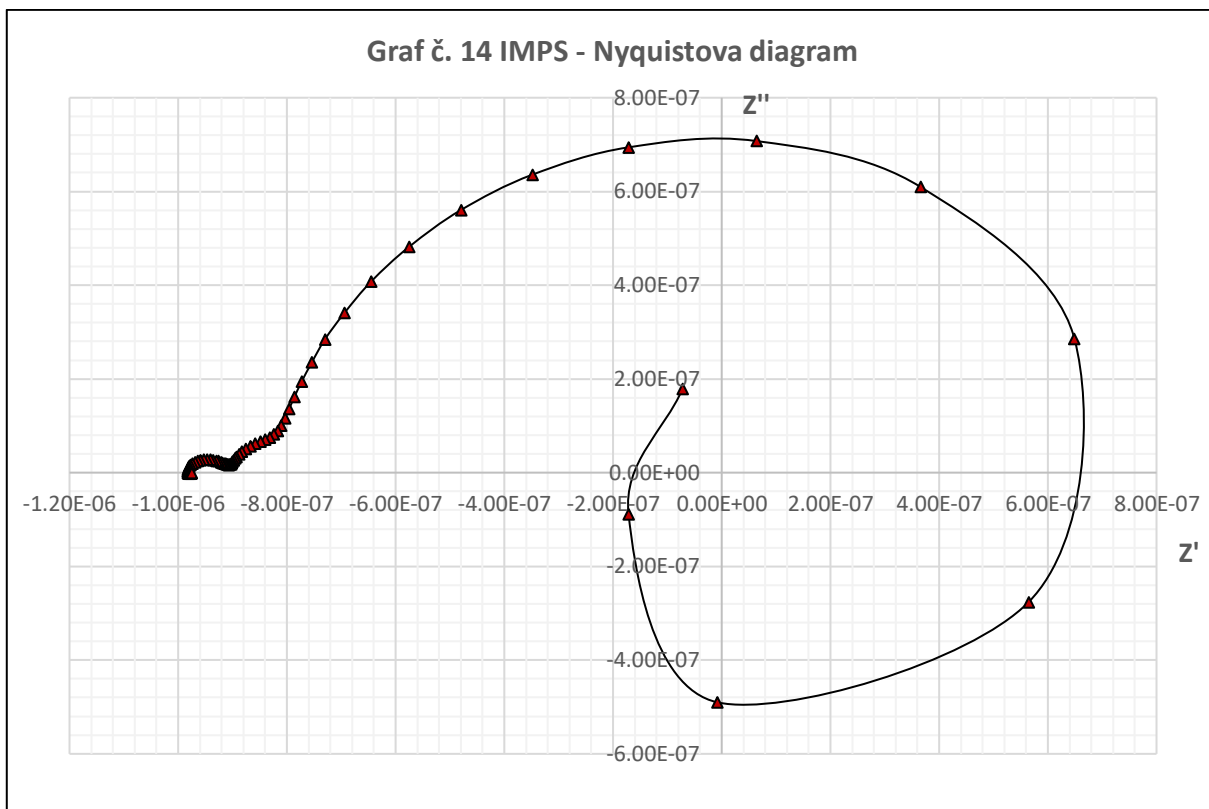
Jsou tady uvedeny výstupy metodik IMPS, IMVS a EIS, z jejíž závislosti se dále budou určeny ekvivalentní obvody pro výpočet časových konstant.

Pro ukázkou získaných grafů dynamického měření jsou tady také použity údaje jenom z prvního měření, totiž z 19. února. Ostatní získané závislosti jsou k dispozici v Příloze.

6.3.2.1. IMPS

Při měření IMPS stejně jako ve případě křemíkového článku bylo napětí nastaveno na 0 V, čím byla splněna podmínka generování fotonového proudu. Měření probíhalo při působení záření o intenzitě $E = 350 \text{ Wm}^{-2}$ v celém frekvenčním rozsahu, totiž od 100 mHz do 1 MHz. Výstupní závislosti Bodeho a Nyquistova diagramů jsou znázorněny níže:



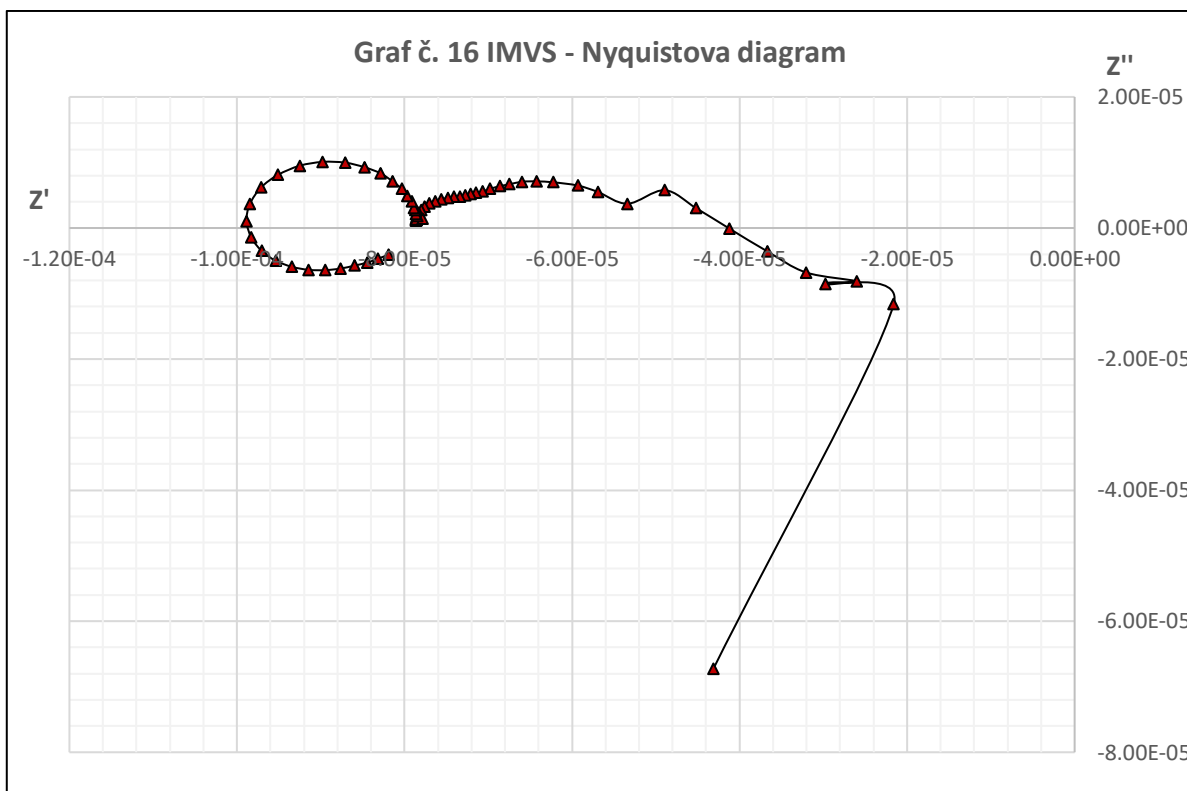
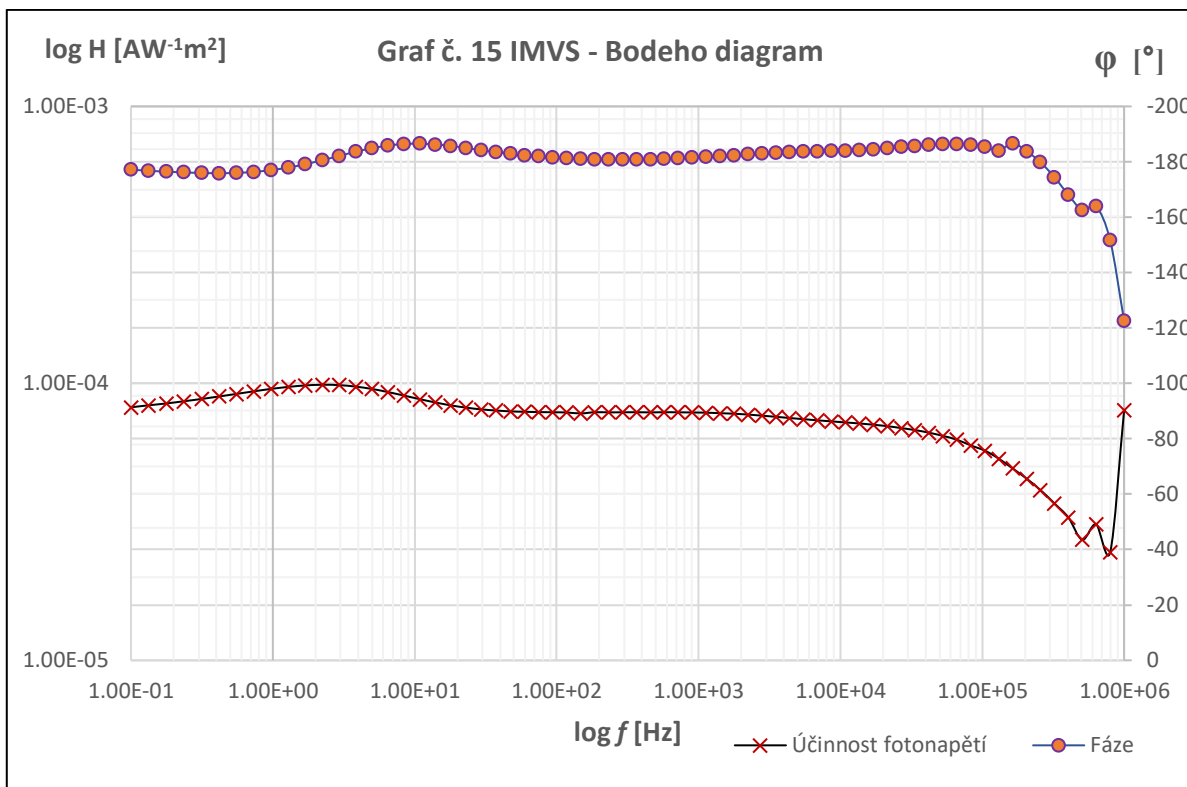


Z grafu **Bodeho diagramu** lze tady poznamenat téměř rovnoměrnou fotonapětovou účinnost na rozsahu od 100 mHz do 500 Hz a stabilní fázový posuv o 180 stupňů. Dále na hodnotě 10 kHz účinnost začíná klesat a k hodnotám řádové MHz průběh již není stabilní vlivem vysokého kmitočtu.

Z maximálního bodu křivky **Nyquistova diagramu** může být stanovena frekvence pro výpočet transportní doby nosičů τ_{tr} .

6.3.2.2. IMVS

Při měření IMVS byl na článku nastaven proud nakrátko, čím byla splněna podmínka generování fotonapětí. Měření probíhalo při intenzitě záření $E = 350 \text{ Wm}^{-2}$ v celém frekvenčním rozsahu od 100 mHz do 1MHz. Dále následují výstupy provedeného měření:

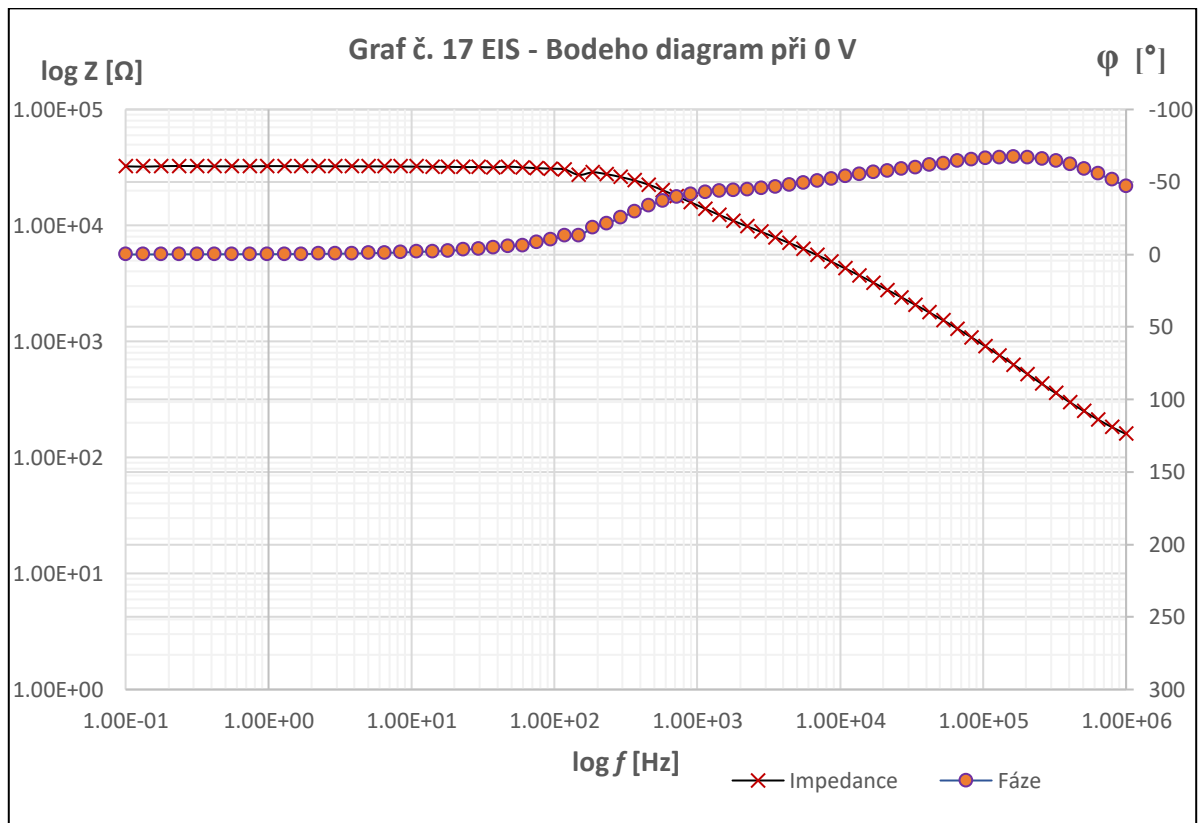


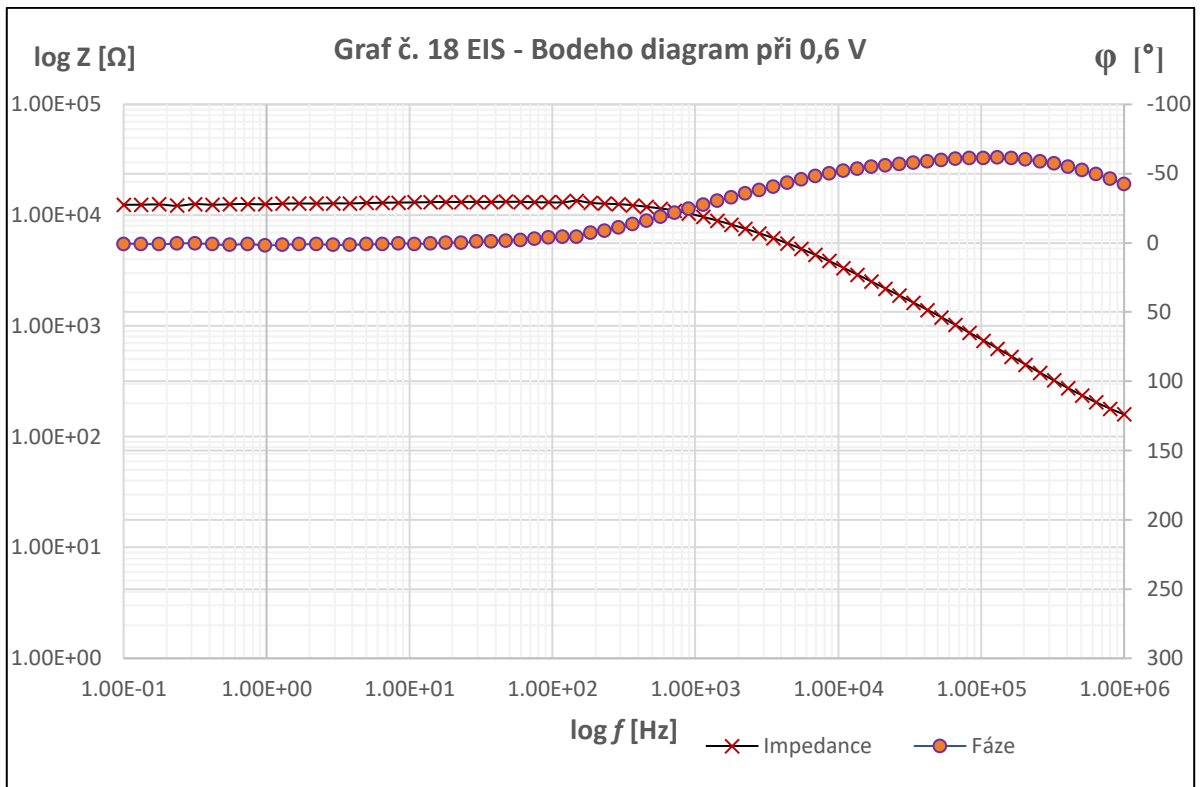
Na rozdíl od IMPS tady z **Bodeho diagramu** je vidět, že se rovnoměrná účinnost fotonapětí vyskytuje již na rozsahu 50 Hz až 1kHz. Dále průběh začíná rychle klesat a na hodnotách řádové MHz průběh již také není stabilní vlivem velké frekvence.

Z maximálního bodu křivky **Nyquistova diagramu** může tady být určena frekvence vhodná pro výpočet rekombinační doby τ_{rec} .

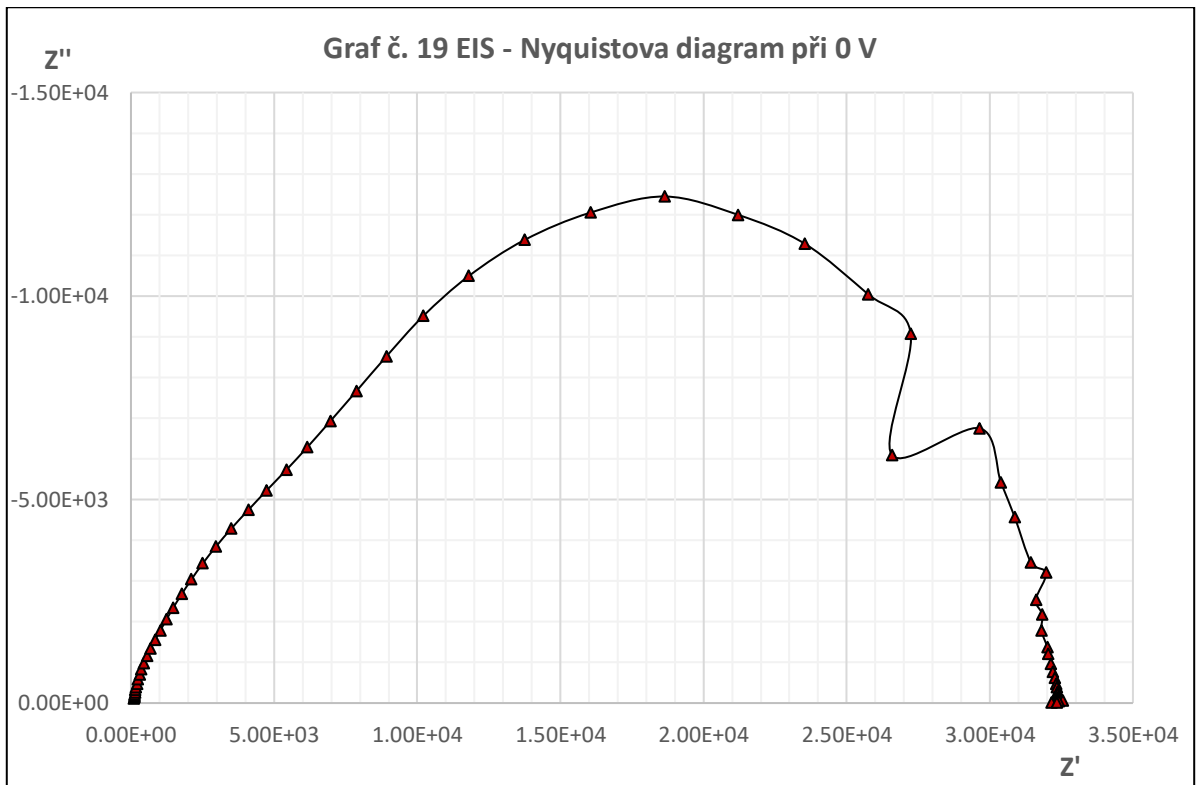
6.3.2.3. EIS

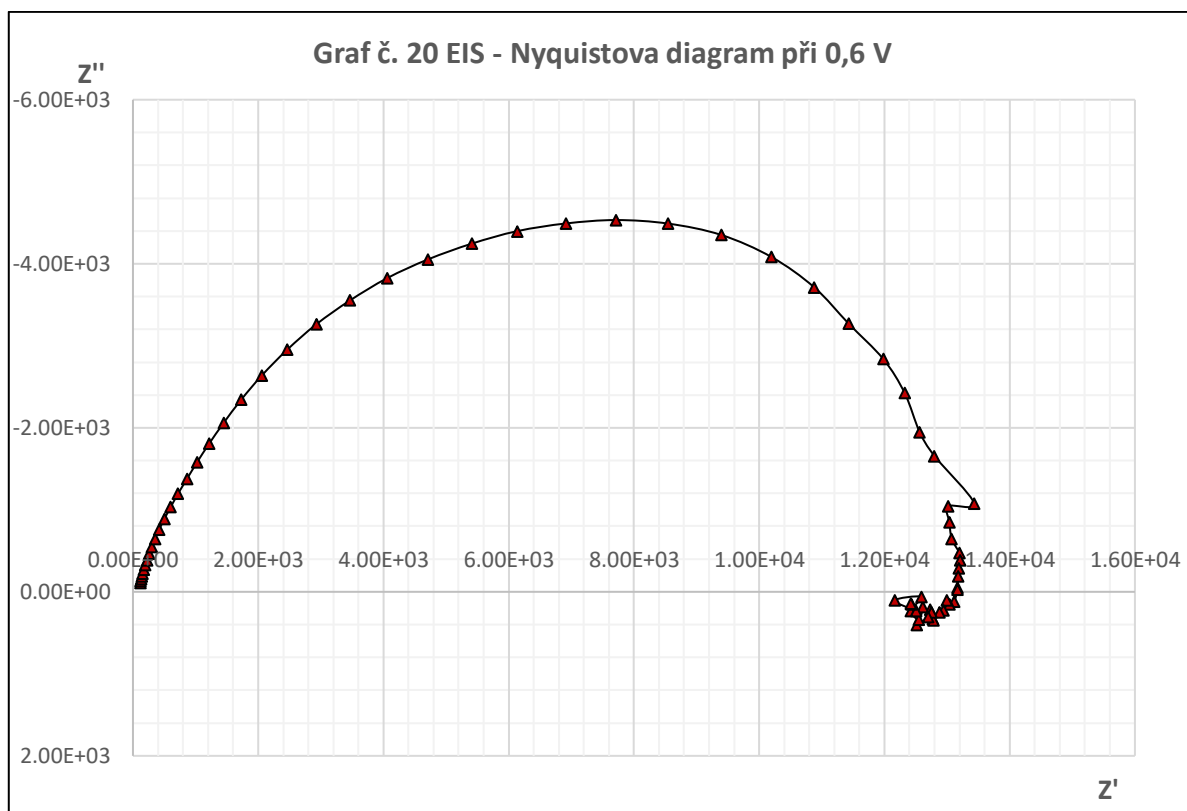
Během měření byla hodnota intenzity dopadajícího záření nastavena na 0 Wm^{-2} , tím pádem působilo na článek jenom napětí v rozmezí od 0 V do 0,6 V s krokem 0,2 V. Frekvenční rozsah byl tady zvolen od 100 mHz do 1 MHz. Níže jsou pro lepší znázornění uvedeny charakteristiky jen pro extrémní hodnoty napětí, totiž pro 0 V a pro 0,6 V:





Z porovnání **Bodeho diagramů** pro hodnoty napětí $U = 0 \text{ V}$ a $U = 0,6 \text{ V}$ je vidět, že nemají tyto průběhy tak velké odlišnosti, ale hodnota impedance ve případě nulového napětí je vyšší. Fázový posuv v obou případech začíná růst na hodnotě 100 Hz.





Tvar **Nyquistova diagramů** v obou případech také vypadá podobně, ale hodnoty impedance a jejich frekvenční rozsah je odlišný. Dále získané hodnoty lze použít pro stanovení časových konstant τ různých elektrochemických jevů.

7. Zpracování výstupů měření fotovoltaického článku na bázi perovskitu

Táto kapitola je zaměřená na studium získaných charakteristik perovskitového solárního článku během zkoušení statických a dynamických metodik měření. Jsou tady použity výstupy ze všech tří měření.

7.1. Statické měření

Během praktické části byly prostudovány následující závislosti:

- 1) V-A charakteristika, ze které byly stanovené hodnoty napětí naprázdno U_{OC} a proudu nakrátko I_{SC} .
- 2) Výkonová charakteristika, ze které byl určen výkon P_{MAX} .
- 3) Převodová charakteristika.

Další částí bylo stanovení činitele plnění FF (podle rovnice 1.1) a účinnosti článku η (podle rovnice 1.2, kde P_{IN} je přepočtená hodnota intenzity vztažená k ploše článku) pro každé provedené měření, aby dále bylo možné určit závislost získaných hodnot na čase a porovnat je. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách Tab.3, Tab.4 a Tab.5:

Tab.3. Změřené a vypočtené hodnoty statického měření dne 19.2.2019

E [Wm^{-2}]	U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	P_{MAX} [W]	FF [-]	P_{IN} [W]	η [%]
50	0,75	-1,72E-04	-4,50E-05	3,49E-01	2,25E-04	20,00
100	0,777	-2,56E-04	-7,34E-05	3,69E-01	4,50E-04	16,31
150	0,79	-3,26E-04	-9,74E-05	3,78E-01	6,75E-04	14,43
200	0,799	-3,88E-04	-1,19E-04	3,84E-01	9,00E-04	13,22
250	0,806	-4,45E-04	-1,39E-04	3,88E-01	1,13E-03	12,36
300	0,811	-4,98E-04	-1,58E-04	3,91E-01	1,35E-03	11,70
350	0,817	-5,45E-04	-1,73E-04	3,89E-01	1,58E-03	10,98

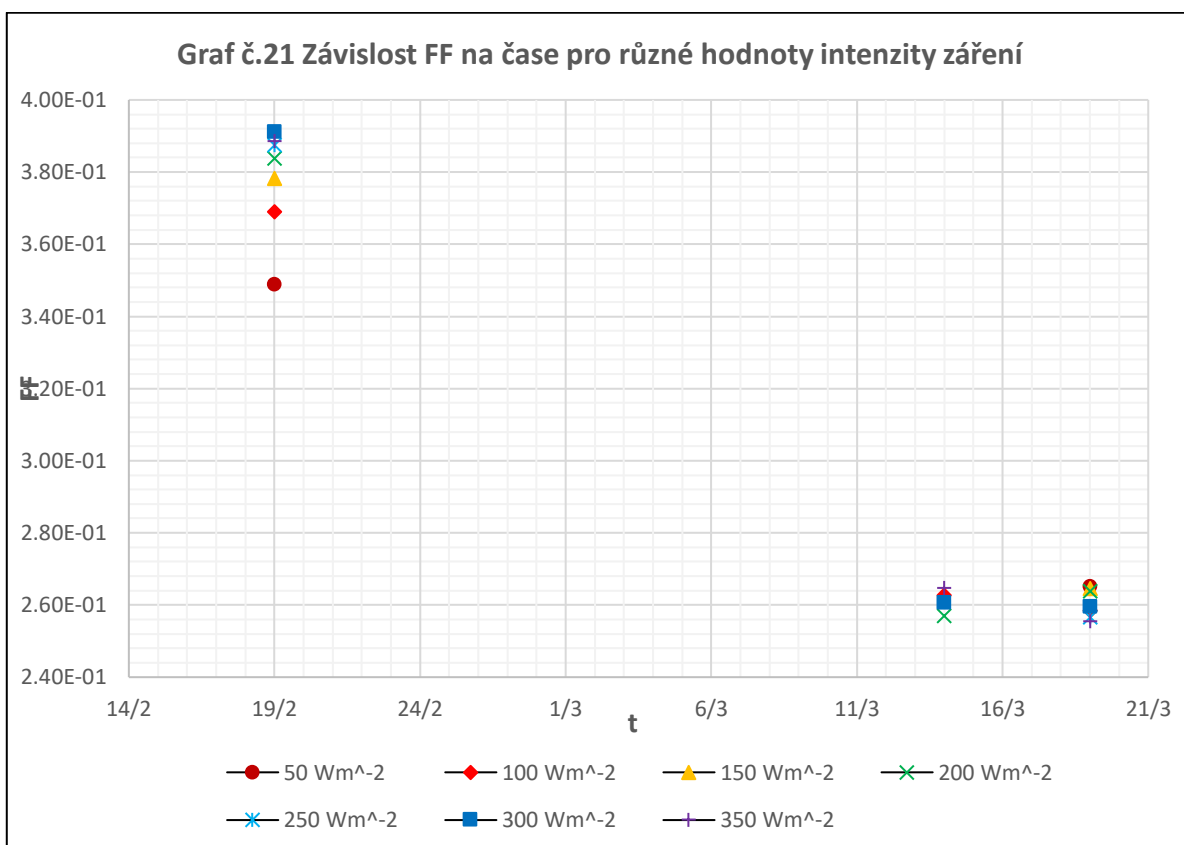
Tab.4. Změřené a vypočtené hodnoty statického měření dne 14.3.2019

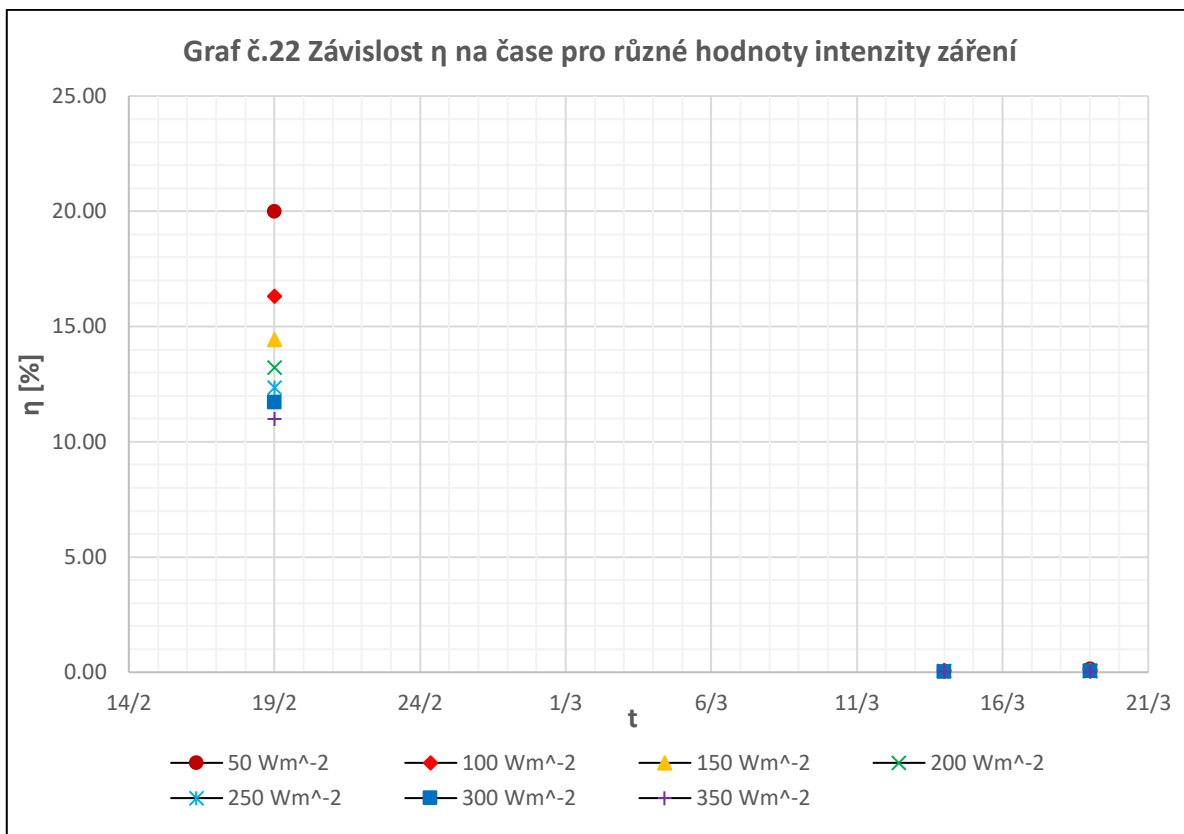
E [Wm^{-2}]	U_{OC} [V]	I_{SC} [A]	P_{MAX} [W]	FF [-]	P_{IN} [W]	η [%]
100	0,103	-1,26E-05	-3,41E-07	2,63E-01	4,50E-04	0,08
200	0,118	-1,56E-05	-4,73E-07	2,57E-01	9,00E-04	0,05
300	0,125	-1,70E-05	-5,54E-07	2,61E-01	1,35E-03	0,04
350	0,128	-1,75E-05	-5,93E-07	2,65E-01	1,58E-03	0,04

Tab.5. Změřené a vypočtené hodnoty statického měření dne 19.3.2019

E [Wm ⁻²]	U _{OC} [V]	I _{SC} [A]	P _{MAX} [W]	FF [-]	P _{IN} [W]	η [%]
50	-0,107	1,16E-05	-3,29E-07	2,65E-01	2,25E-04	0,15
100	-0,119	1,44E-05	-4,43E-07	2,59E-01	4,50E-04	0,10
150	-0,126	1,56E-05	-5,20E-07	2,65E-01	6,75E-04	0,08
200	-0,127	1,62E-05	-5,43E-07	2,64E-01	9,00E-04	0,06
250	-0,13	1,72E-05	-5,74E-07	2,57E-01	1,13E-03	0,05
300	-0,13	1,76E-05	-5,94E-07	2,60E-01	1,35E-03	0,04
350	-0,128	1,77E-05	-5,79E-07	2,56E-01	1,58E-03	0,04

Ze stanovených hodnot lze pro vybrané parametry vytvořit grafy závislosti na čase, podle kterých se dá posuzovat o časových změnách konajících se ve struktuře zkoumaného článku:





Z grafů závislosti a stanovených hodnot uvedených výše je tady vidět, že se s časem klesají všechny parametry charakterizující elektrické vlastnosti článku. Způsobeno to rychlou degradací struktury perovskitové vrstvy, poněvadž není tak stabilní jako ve případě křemíku. Je to vlastně jedna ze zásadních problémů použití fotovoltaických článků na bázi perovskitu.

Maximální hodnota účinnosti je pozorovaná v první den měření ($\eta = 20\%$) při intenzitě záření $E = 50 \text{ Wm}^{-2}$. Se zvýšením intenzity hodnota účinnosti začíná rychle klesat. Činitel plnění FF, který je vlastně mírou kvality článku, také se po uplynutí času začíná snižovat.

7.2. Dynamické měření

Hlavním úkolem dynamického měření je použitím metod IMPS, IMVS a EIS stanovit transportní dobu nosičů náboje τ_r a dobu rekombinace těchto nosičů τ_{rec} a prozkoumat chování změřených charakteristik testovaného vzorku.

Tady pro stanovení časových konstant jsou použity tzv. ekvivalentní obvody. Jsou to elektrické obvody, které slouží k aproximaci reálného chování článku. Skládají se

z kombinace sériového odporu a paralelní vazby R-C, ale vzhledem k tomu, že kapacita C udává chování “ideální” součástky, namísto něj jsou tady použity parametry konstantního fázového elementu CPE (Constant Phase Element), které udávají reálné chování. Je to vlastně obvodový prvek sloužící k modelování chování dvouvrstvy, která vykazuje vlastnosti nedokonalého kondenzátoru.

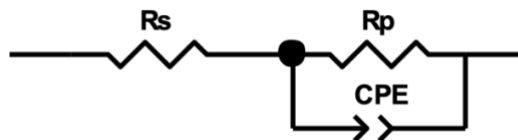
Také je důležité říct, že parametr CPE ve skutečnosti neodpovídá hodnotě kapacity, ale je možné za použitím vztahu (7.1) přepočítat parametr CPE na hodnotu přibližně odpovídající elektrické kapacitě:

$$C = \frac{(Q_0 \cdot R)^{\frac{1}{n}}}{R} \quad (7.1),$$

kde Q_0 (neboli $CPE-T$) je hodnota parametru, n (neboli $CPE-P$) je index parametru v rozmezí 0-1, R je odpor paralelně zapojeného rezistoru.

7.2.1. IMPS

Na základě údajů získaných z grafů Bodeho a Nyquistova diagramů byl vytvořen ekvivalentní obvod zobrazený na obrázku níže:



Obr.20. Ekvivalentní obvod IMPS

Použitím softwaru ZView společnosti Scribner byli provedena měření dále určeny parametry pro stanovení transportní doby nosičů τ_r podle vztahu (7.2):

$$\tau_r = R_p \cdot C_p \quad (7.2),$$

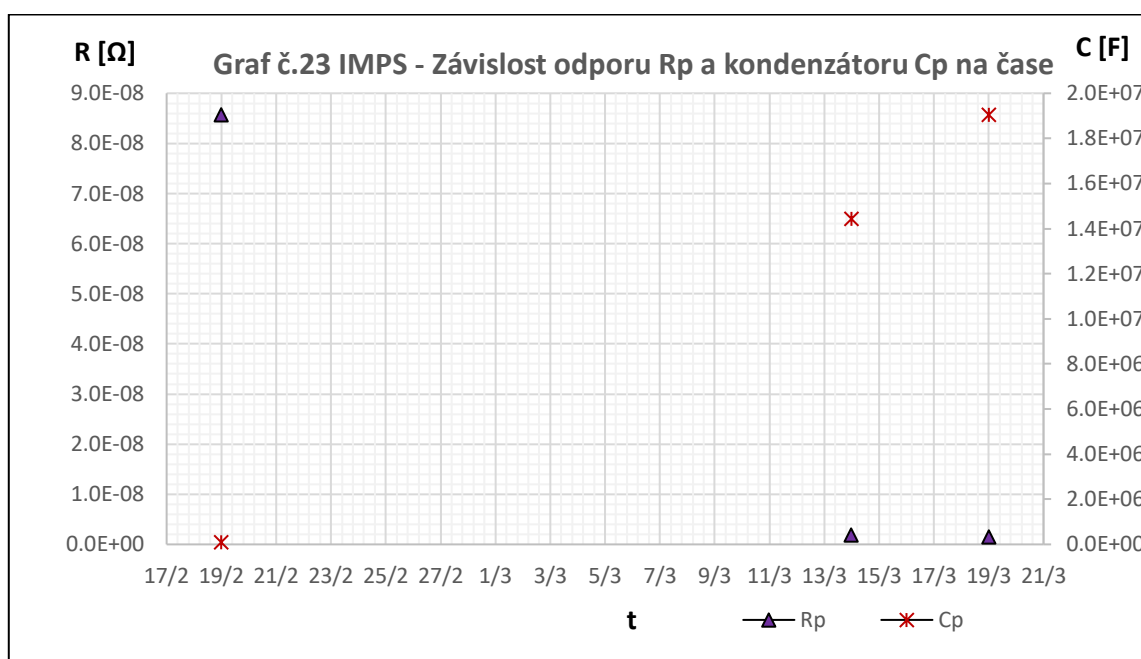
kde R_p je odpor paralelního rezistoru, C_p je přepočtená hodnota paralelního parametru CPE podle vztahu (7.1).

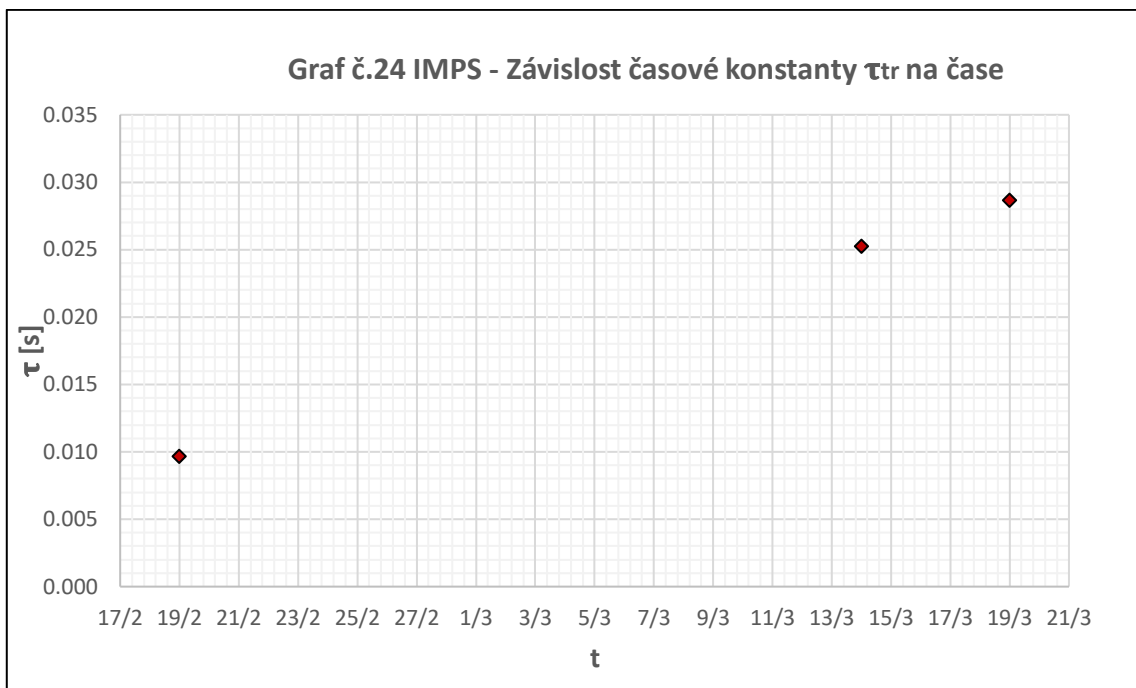
Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce Tab.6:

Tab.6. Naměřené a vypočtené hodnoty IMPS

Datum	R_s [Ω]	R_p [Ω]	CPE-T [$S.s^n$]	CPE-P [-]	C_p [F]	τ_{tr} [s]
19. února	9,01E-07	8,57E-08	3,37E+05	0,764	1,13E+05	0,010
14. března	1,13E-08	1,75E-09	1,50E+07	0,990	1,45E+07	0,025
19. března	7,36E-09	1,51E-09	2,25E+07	0,953	1,90E+07	0,029

Následně pro vybrané parametry R_s , C_p a τ_{tr} byli vytvořeny grafy závislosti na čase, které jsou znázorněny níže:

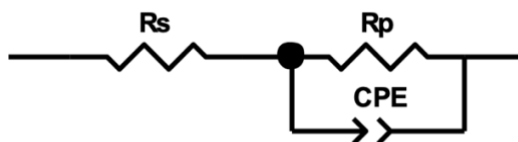




Ze stanovených a zobrazených výše hodnot lze konstatovat, že po uplynutí času transportní rychlost nosičů značně poklesla, což je pravděpodobně způsobeno degradačními jevy ve struktuře perovskitové vrstvy. Na ekvivalentním obvodu se to projevilo strmým poklesem paralelního a sériového odporu a zvýšením hodnoty kapacity.

7.2.2. IMVS

Podle dosažených hodnot z grafů Bodeho a Nyquistova diagramů byl sestaven následující ekvivalentní obvod:



Obr.21. Ekvivalentní obvod IMVS

Dále stejným postupem jako ve případě IMPS byli v programu ZView vypočteny parametry pro stanovení rekombinační doby nosičů τ_{rec} podle vztahu (7.3):

$$\tau_{rec} = R_p \cdot C_p \quad (7.3),$$

kde R_p je odpor paralelního rezistoru, C_p je přepočtená hodnota paralelního parametru CPE podle vztahu (7.1).

Stanovené údaje jsou uvedeny níže v tabulce Tab.7:

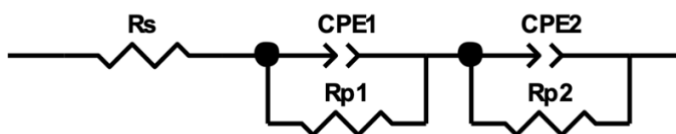
Tab.7. Naměřené a vypočtené hodnoty IMVS

Datum	R_s [Ω]	R_p [Ω]	CPE-T [$S \cdot s^n$]	CPE-P [-]	C_p [F]	τ_{rec} [s]
19. února	7,83E-05	2,1E-05	660	0,968	5,73E+02	0,012
14. března	-	-	-	-	-	-
19. března	-	-	-	-	-	-

Při provedení měření IMVS se bohužel nepodařilo získat potřebné údaje ze všech tří měření, poněvadž jak se později ukázalo, došlo k poškození používaných drátů. Takže tady na základě hodnot prvního měření lze jenom říct, že v porovnání s dobou transportní je rekombinační doba nosičů menší, což je dobrým projevem elektrických vlastností článku.

7.2.3. EIS

Použitím charakteristik Bodeho a Nyquistova diagramů z praktické části byl sestaven ekvivalentní obvod platný pro všechna napětí přiložená na systém (0 V až 0,6 V):



Obr.22. Ekvivalentní obvod EIS

Následně v programu ZView byli vypočteny parametry pro stanovení časové konstanty τ (τ_1 a τ_2 pro každou paralelní kombinaci) pro elektrochemické jevy konající se ve struktuře článku ze vztahu (7.4):

$$\tau = R_p \cdot C_p \quad (7.4),$$

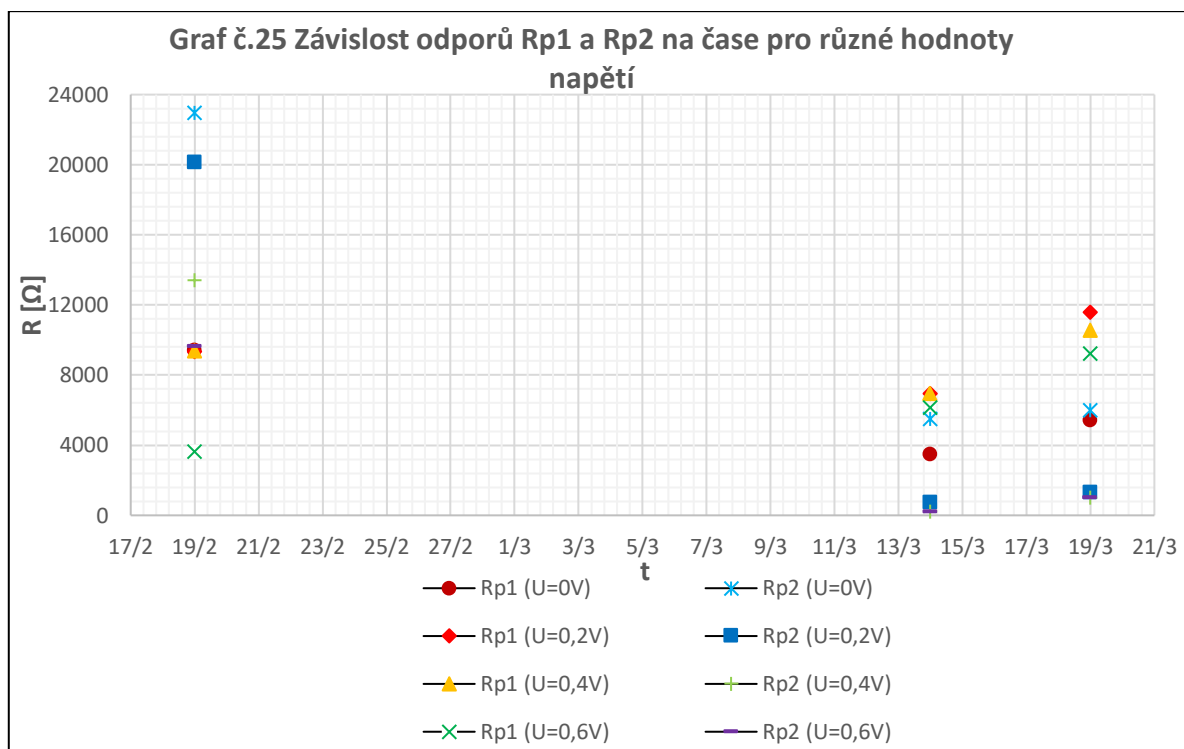
kde R_p je odpor paralelního rezistoru, C_p je přepočtená hodnota paralelního parametru CPE podle vztahu (7.1).

Dále jsou v tabulce Tab. 8 uvedeny vypočtené hodnoty odporů:

Tab.8. Stanovené hodnoty odporů při měření EIS

U [V]	Datum	Rs [Ω]	Rp1 [Ω]	Rp2 [Ω]
0	19. února	67	9396	22938
	14. března	54	3459	5502
	19. března	26	5400	6000
0,2	19. února	67	9320	20116
	14. března	60	6946	742
	19. března	42	11575	1318
0,4	19. února	82	9372	13384
	14. března	80	6922	199
	19. března	50	10546	1008
0,6	19. února	77	3622	9639
	14. března	52	6147	190
	19. března	36	9216	1015

Následně byl vytvořen graf závislosti R_{p1} a R_{p2} na čase:

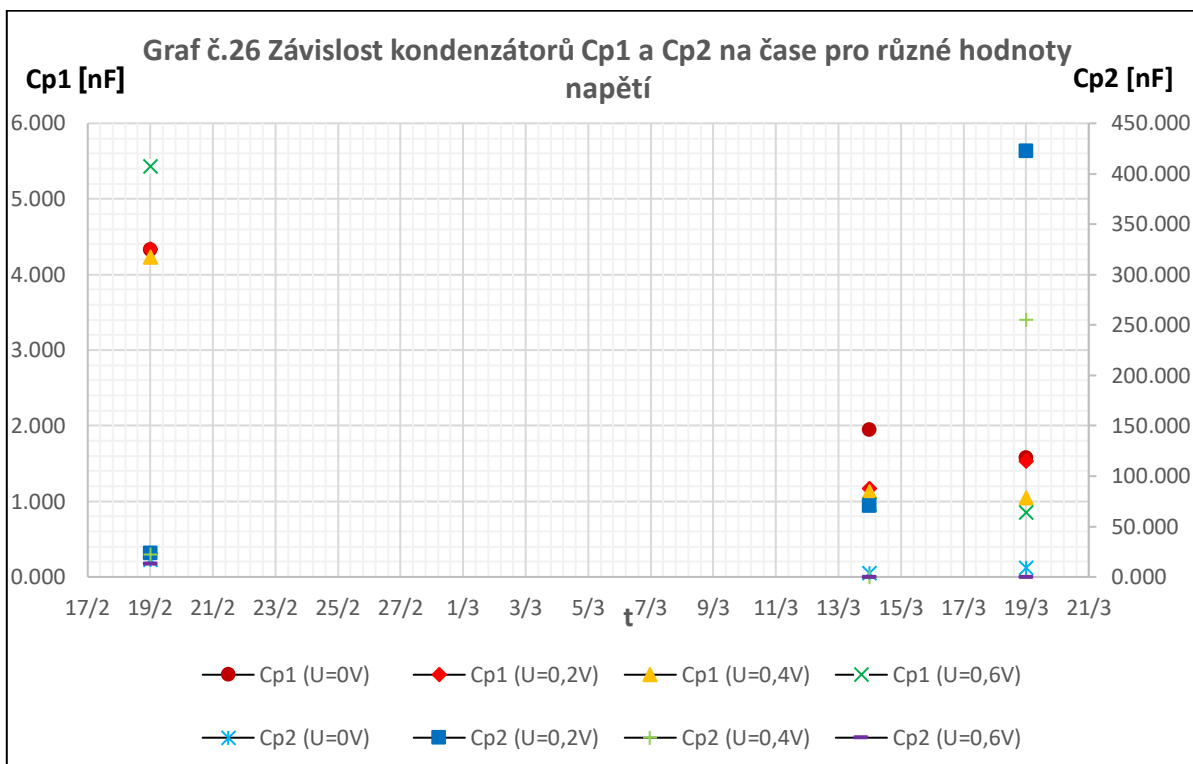


Dalším bodem byl výpočet hodnoty kapacity (Tab.9):

Tab.9. Stanovené hodnoty kapacity při měření EIS

U [V]	Datum	CPE1-T [S.s ⁿ]	CPE1-P [-]	CPE2-T [S.s ⁿ]	CPE2-P [-]	Cp1 [nF]	Cp2 [nF]
0	19. února	7,73E-08	0,7149	2,22E-08	0,966	4,329	16,999
	14. března	3,69E-09	0,9463	1,27E-07	0,674	1,947	3,780
	19. března	7,15E-09	0,8704	3,86E-07	0,6169	1,575	8,914
0,2	19. února	7,71E-08	0,7155	2,42E-08	0,998	4,336	23,833
	14. března	7,60E-09	0,8403	7,40E-08	0,995	1,169	70,441
	19. března	1,95E-08	0,7675	5,12E-06	0,667	1,533	422,173
0,4	19. února	8,27E-08	0,7067	2,43E-08	0,989	4,232	22,224
	14. března	9,68E-09	0,8171	3,72E-09	0,691	1,126	0,007
	19. března	1,90E-08	0,7462	1,63E-05	0,497	1,049	254,856
0,6	19. února	6,20E-08	0,7753	3,97E-08	0,876	5,432	13,034
	14. března	8,16E-09	0,8221	1,97E-08	0,567	0,958	0,001
	19. března	9,78E-09	0,7923	8,11E-08	0,496	0,851	0,006

Následně byla vytvořena časová závislost hodnoty kapacity $Cp1$ a $Cp2$:

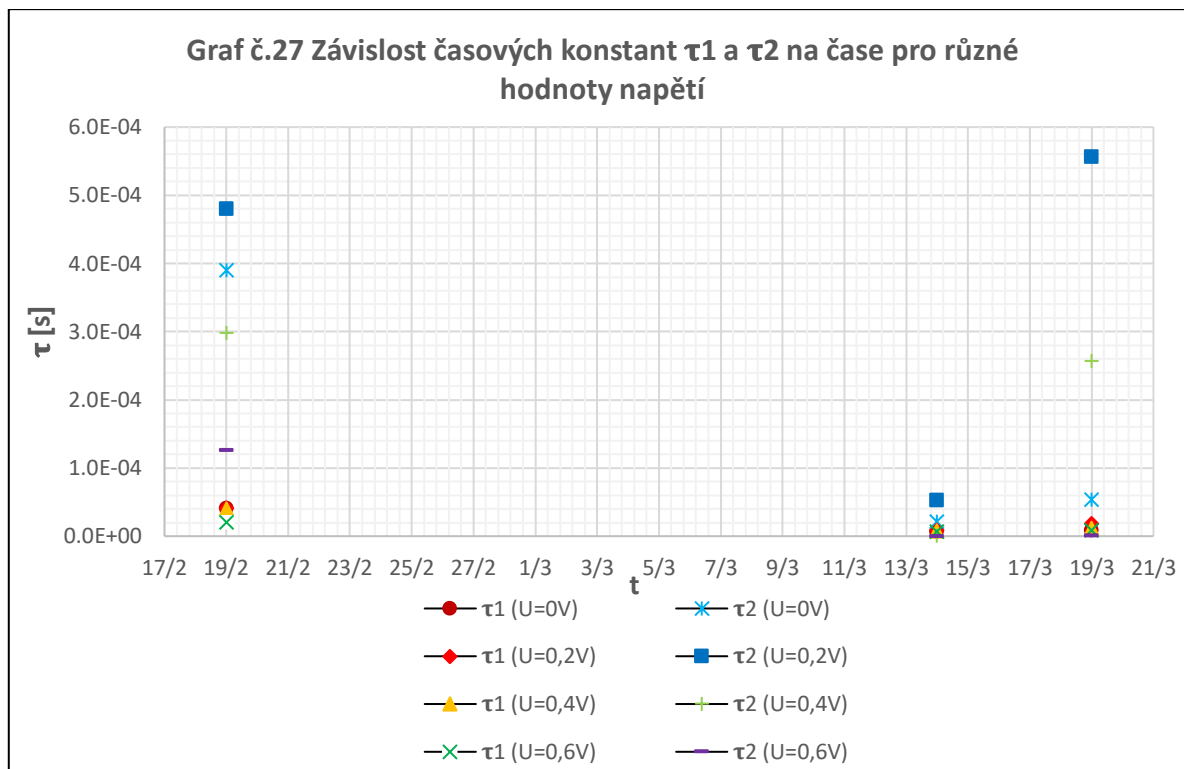


Poslední částí bylo stanovení hodnoty časových konstant (Tab.10):

Tab.10. Stanovené hodnoty časových konstant při měření EIS

U [V]	Datum	τ_1 (Rp1-CPE1) [s]	τ_2 (Rp2-CPE2) [s]
0	19. února	4,07E-05	3,90E-04
	14. března	6,73E-06	2,08E-05
	19. března	8,50E-06	5,35E-05
0,2	19. února	4,04E-05	4,79E-04
	14. března	8,12E-06	5,23E-05
	19. března	1,77E-05	5,56E-04
0,4	19. února	3,97E-05	2,97E-04
	14. března	7,80E-06	1,34E-09
	19. března	1,11E-05	2,57E-04
0,6	19. února	1,97E-05	1,26E-04
	14. března	5,89E-06	2,69E-10
	19. března	7,84E-06	5,82E-09

Stejně jako pro předchozí parametry byla následně vytvořena závislost časových konstant na čase:



Ze získaných a znázorněných charakteristik je vidět, že se nechovají závislosti hodnot ve případě EIS tak lineárně v čase, jak to bylo ve případě IMPS, ale lze tady také konstatovat tendenci, kdy s uplynutím času dochází ke klesání elektrických a elektrochemických vlastností v porovnání s prvním měřením.

ZÁVĚR

Táto Bakalářská práce se skládá z teoretické a praktické části. V její teoretické části byly popsány základní charakteristiky perovskitu a porovnaného s ním křemíku, rozebrány vlastnosti perovskitové struktury a vlastnosti solárních článků na perovskitové bázi, také byly popsány principy měření fotovoltaických článků.

V praktické části za použitím teoretických znalostí byly vyzkoušeny rozebrané statické a dynamické metodiky měření, které probíhaly za využitím zařízení ABS-1 CIMPS společnosti Zahner a softwaru ZView společnosti Scribner. Bylo tady prostudováno chování elektrických vlastností článku jako jsou V-A a Výkonová charakteristiky, chování činitele plnění FF a účinnosti článku. Také byli během měření stanoveny hodnoty časových konstant pro transportní a rekombinační doby nosičů spolu s dobou konání elektrochemických jevů.

Jak se ukázalo ze měření, na první pokus se článek choval dostatečně nadějně a ukazoval hodnotu účinnosti v rozmezí 10 až 15 % spolu s odpovídajícími transportními a rekombinačními dobami, ale po uplynutí času na další pokusy vzhledem k silně zvyšující se degradaci ve struktuře již hodnota účinnosti klesla téměř na nulu a zvýšila se doba transportu nosičů spolu s dobou probíhání elektrochemických jevů. Ovšem by bylo lepší pozorovat pokles elektrických a elektrochemických vlastností, kdyby těch měření bylo více a byly časově blíže k sobě, ale z technických a časových důvodů bylo možné použít jen výsledky ze měření popsaných výše v kapitole 6 a 7.

Na základě získaných a stanovených údajů lze říct, že metodiky výroby, které se používají dnes pro vytvoření fotovoltaických článků na bázi perovskitu stále nejsou vhodné pro komerční hromadní výrobu a nemohou najít spolehlivé uplatnění ve fotovoltaice. I když účinnost nového článku je velmi blízká k účinnosti solárních článků na bázi křemíku, není struktura perovskitové vrstvy tak odolná a stabilní. Ale další teoretický výzkum by mohl přispět nejen k dalším pokrokům ve stabilitě a vývoji netoxických perovskitových solárních článků, ale i ke zvýšení jejich účinností.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	...	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	...	Vysoké učení technické v Brně
PSČ	...	Perovskitový solární článek
IS	...	Impedanční spektroskopie
EIS	...	Elektrochemická impedanční spektroskopie
DIS	...	Dielektrická impedanční spektroskopie
IMPS	...	Intenzitou modulovaný fotoproud
IMVS	...	Intenzitou modulované fotonapětí
CIMPS	...	Controlled Intensity Modulated Photo Spectroscopy
OCVD	...	The open-circuit voltage decay
CELIV	...	Extrakce nosiče náboje lineárně zvyšujícím se napětím
CPE	...	Constant Phase Element

Symboly:

U	...	napětí	[V]
I	...	proud	[A]
I _{SC}	...	proud nakrátko	[A]
U _{OC}	...	napětí naprázdno	[V]
P _{MAX}	...	maximální výkon	[W]
P _{IN}	...	výkon dopadajícího záření	[W]
U _{MP}	...	napětí při P _{MAX}	[V]
I _{MP}	...	proud při P _{MAX}	[A]
FF	...	činitel plnění	[-]
η	...	účinnost	[%]
t	...	toleranční faktor	[-]
μ	...	oktaedrický faktor	[-]
τ _{tr}	...	transportní doba nosičů	[s]
τ _{rec}	...	rekombinační doba nosičů	[s]
Z	...	impedance	[Ω]
f	...	frekvence	[Hz]
f _{IMPS}	...	frekvence získaná u IMPS	[Hz]
f _{IMVS}	...	frekvence získaná z IMVS	[Hz]
φ	...	fáze	[°]
H	...	fotoproudová/fotonapěťová účinnost [AW ⁻¹ m ²] [VW ⁻¹ m ²]	

E	...	potenciál	[V]
E	...	intenzita záření	[Wm ⁻²]
CPE-T	...	hodnota parametru CPE	[S.s ⁿ]
CPE-P	...	index parametru CPE v rozmezi 0-1	[-]
R	...	odpor	[Ω]
C	...	kapacita	[F]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1. Diagram energetických pásem PN přechodu při osvětlení.....	10
Obr.2. Fotovoltaický jev.....	11
Obr.3. Stanovení pracovního bodu fotovoltaického článku.....	12
Obr.4. Monokrystalický a polykrystalický křemíkový článek.....	13
Obr.5. Perovskit nalezený v Německu (vlevo) a v Rusku (vpravo).....	15
Obr.6. Obecná struktura krystalu ve tvaru ABX ₃	16
Obr.7. Oblast možného vzniku perovskitové struktury.....	17
Obr.8. Schématické schéma mezoporézních(a) a rovinných(b) architektonických PSC.....	18
Obr.9. Absorpce světla vrstvou perovskitu.....	21
Obr.10. Syntéza použitím metody roztoků. A – jednostupňová metodika, B – dvoustupňová metodika.....	23
Obr.11. Metoda parní depozice	24
Obr.12. Metoda roztoků asistovaná parami.....	25
Obr.13. Nyquistova diagram (A) a Bodeho diagram (B) pro slitinu Ti ₆ Al ₄ V v roztoku NaCl, Elektrický ekvivalentní obvod používaný pro simulaci naměřených dat (C)....	27
Obr.14. Přehled podmínek měření pro IMPS a IMVS.....	28
Obr.15. Ukázka zobrazení odezvy IMPS.....	29
Obr.16. Ukázka zobrazení odezvy IMVS.....	30
Obr.17. Schéma principu CIMPS, kde RE – referenční elektroda, WE – pracovní elektroda, CE – pomocná elektroda. Reakční smyčka fotodiodového detektoru (photo-detector) / fotozesilovače (photo-sense amplifier) tady zesiluje intenzitu světla tak, aby přesně sledovala součet nastavených hodnot intenzity AC a DC.....	30
Obr.18. Ukázka V-A charakteristiky solárního článku při osvětlení.....	31
Obr.19. Zahner ABS-1 CIMPS.....	33
Obr.20. Ekvivalentní obvod IMPS.....	54
Obr.21. Ekvivalentní obvod IMVS.....	56
Obr.22. Ekvivalentní obvod EIS.....	57

SEZNAM TABULEK

Tab.1. Změřené hodnoty napětí a proudu a vypočtené hodnoty výkonu.....	34
Tab.2. Změřené hodnoty intenzity osvětlení a výstupního proudu.....	37
Tab.3. Změřené a vypočtené hodnoty statického měření dne 19.2.2019.....	51
Tab.4. Změřené a vypočtené hodnoty statického měření dne 14.3.2019.....	51
Tab.5. Změřené a vypočtené hodnoty statického měření dne 19.3.2019.....	52
Tab.6. Naměřené a vypočtené hodnoty IMPS.....	55
Tab.7. Naměřené a vypočtené hodnoty IMVS.....	57
Tab.8. Stanovené hodnoty odporů při měření EIS.....	58
Tab.9. Stanovené hodnoty kapacity při měření EIS.....	59
Tab.10. Stanovené hodnoty časových konstant při měření EIS.....	60

LITERATURA

- [1] „*Solární článek s duální funkcí*“ [online] – 03.11.2018. Dostupné z <http://www.techmagazin.cz/1541>
- [2] „*Komerční výroba perovskitových solárních článků začne v roce 2019*“ [online] – 03.11.2018. Dostupné z <http://www.solarninovinky.cz/?technologie/panely/2016042705/komercni-vyroba-perovskitovych-solarnich-clanku-zacne-v-roce-2019>
- [3] „*Nové fotovoltaické panely z Anglie*“ [online] – 03.11.2018. Dostupné z https://www.aldebaran.cz/bulletin/2013_33_rul.php
- [4] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka: J. Am. „*Chem. Soc.*“, 131, 6050 (2009).
- [5] „*Perovskites and Perovskite Solar Cells: An Introduction*“ [online] – 04.11.2018. Dostupné z <https://www.ossila.com/pages/perovskites-and-perovskite-solar-cells-an-introduction>
- [6] „*Perovskite introduction*“ [online] – 04.11.2018. Dostupné z <https://www.perovskite-info.com/perovskite-introduction>
- [7] „*Goldschmidt tolerance factor*“ [online]. Dostupné z http://reference.iucr.org/dictionary/Goldschmidt_tolerance_factor

- [8] Chonghea Li, X.L., Weizhong Ding, Liming Feng, Yonghui Gao, Ziming Guo. “*Formability of ABX₃ (X = F, Cl, Br, I) halide perovskites*”. *Acta crystallographica, Section B, Structural science*, January 2009. 64(702–707): p.8.
- [9] “*Teorie fotovoltaiky*” [online] – 31.10.2018. Dostupné z <<http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>>
- [10] G. Boyle. “*Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*”, 2nd ed. Oxford, UK: Oxford University Press, 2004.
- [11] Mr. Solar. “*Photovoltaic Effect*” [online] – 31.10.2018. Dostupné z <<http://www.mrsolar.com/photovoltaic-effect>>
- [12] E.A. Katz. “*Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion*” 2006, Pages 361-443
- [13] Jan Moravec. „*Polovodiče: Fotovoltaický jev a parametry fotovoltaického článku*“ [online] – 2.11.2018. Dostupné z <<http://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicky-jev-parametry-fotovoltaickeho-clanku/>>
- [14] Andrew Blakers, Ngwe Zin, Keith R. McIntosh, Kean Fong. “*Energy Procedia*”. Volume 33, 2013, Pages 1-10
- [15] Green MA, “*Silicon Solar Cells, Advanced Principles and Practice*”. University of New South Wales Sydney, N.S.W. 2052, 1995, ISBN 0-7334-0994-6.
- [16] Jan Moravec. „*Polovodiče: Fotovoltaické články z krystalického křemíku a tenkovrstvé články*“ [online] – 02.11.2018. Dostupné z <<http://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicke-clanky-krystalickeho-kremiku-tenkovrstve-clanky/>>
- [17] Prof. Ing. Vítězslav Benda, CSc. „*Solární články z krystalického křemíku*“ [online] – 02.11.2018. Dostupné z <<https://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>>
- [18] Di Zhou, Tiantian Zhou, Yu Tian, Xiaolong Zhu, and Yafang Tu. “*Perovskite-Based Solar Cells: Materials, Methods, and Future Perspectives*”. *Journal of Nanomaterials*, Volume 2018, Article ID 8148072, 15 pages.
- [19] E. Edri, S. Kirmayer, D. Cahen, and G. Hodes, “*High open-circuit voltage solar cells based on organic-inorganic lead bromide perovskite*”. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 4, no. 6, pp. 897–902, 2013.

- [20] D. Liu and T. L. Kelly, “Perovskite solar cells with a planar heterojunction structure prepared using room-temperature solution processing techniques” *Nature Photonics*, vol. 8, no. 2, pp. 133–138, 2014.
- [21] Kim, H., et al., “Electrical, optical, and structural properties of indium–tin–oxide thin films for organic light-emitting devices”. *Journal of Applied Physics*, 1999. 86(11): p. 6451-6461.
- [22] “Fluorine doped Tin Oxide (FTO) Glass” [online] – 18. 11.2018. Dostupné z <<https://www.sigmaldrich.com/materials-science/materialscienceproducts.html?TablePage=106837645>>
- [24] M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami, and H. J. Snaith, “Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites” *Science*, vol. 338, no. 6107, pp. 643–647, 2012.
- [25] K. Cao, J. Cui, H. Zhang et al., “Efficient mesoscopic perovskite solar cells based on the CH”, *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 3, no. 17, pp. 9116–9122, 2015.
- [26] F. Huang, A. R. Pascoe, W. Wu et al., “Perovskite Solar Cells: Effect of the Microstructure of the Functional Layers on the Efficiency of Perovskite Solar Cells (*Adv. Mater.* 20/2017)”, *Advanced Materials*, vol. 29, no. 20, 2017.
- [27] Y. Zhang, W. Liu, F. Tan, and Y. Gu, “The essential role of the poly(3-hexylthiophene) hole transport layer in perovskite solar cells”, *Journal of Power Sources*, vol. 274, pp. 1224–1230, 2015.
- [28] G. Peng, X. Xu, and G. Xu, “Hybrid Organic-Inorganic Perovskites Open a New Era for Low-Cost, High Efficiency Solar Cells”, *Journal of Nanomaterials*, vol. 2015, Article ID 241853, 10 pages, 2015.
- [29] Adriano Sacco, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, “Electrochemical impedance spectroscopy: Fundamentals and application in dye-sensitized solar cells”, Volume 79, November 2017, Pages 814-829
- [30] J.R. Macdonald, *Ann Biomed Eng.*, “Impedance spectroscopy”, 20 (1992), pp. 289-305
- [31] M.E. Orazem, B. Tribollet, “Electrochemical impedance spectroscopy” Wiley, Hoboken, New Jersey (2008)
- [32] N. Zaveri, G.D. McEwen, R. Karpagavalli, A.H. Zhou, “Biocorrosion studies of TiO₂ nanoparticle-coated Ti₆Al₄V implant in simulated biofluids” *J. Nanopart. Res.*, 12 (5) (2010), p. 1609
- [33] Ponomarev, E. A.; Peter, L. M., “A Comparison of Intensity Modulated Photocurrent Spectroscopy and Photoelectrochemical Impedance Spectroscopy in a Study of Photoelectrochemical Hydrogen Evolution at P-InP”. *J. Electroanal. Chem.* 1995, 397, 45-52.

- [34] “Dye Solar Cells – Part 3: IMPS and IMVS Measurements” [online] – 07.12.2018. <Dostupné z <https://www.gamry.com/application-notes/physechem/dye-solar-cells-imps-imvs/>>
- [35] Daesub Hwang, Dong Young Kim, Sung-Yeon Jang and Dongho Kim. “Superior photoelectrodes for solid-state dye-sensitized solar cells using amphiphilic TiO₂” *J. Mater. Chem. A*, 2013, 1, 1228-1238.
- [36] Behrang H. Hamadani and Brian Dougherty “Solar cell characterization”. Pages 1-18.
- [37] Zahner “Controlled Intensity Modulated Photo Spectroscopy”. Pages 5-9.
- [38] G. Juška, K. Arlauskas, M. Viliunas, and J. Kočka “Extraction current transients: New method of study of charge transport in microcrystalline silicon”. *Phys. Rev. Lett.*, page 4946, 2000.
- [39] J. Lorrmann, B. H. Badada, O. Inganas, V. Dyakonov, C. Deibel “Charge Carrier Extraction by Linearly Increasing Voltage: Analytic framework and ambipolar transients”. *Journal of Applied Physics* 108(11), January 2011.
- [40] Milan Tapajna, Jaroslav Pjenčák, Andrej Vrbický, Ladislav Harmatha, Pavol Kúdela “Application of open circuit voltage decay to the characterization of epitaxial layer”. *Journal of electrical engineering*, VOL. 55, NO. 9-10, 2004, 239–244
- [41] Di Zhou, Tiantian Zhou, Yu Tian, Xiaolong Zhu, and Yafang Tu “Perovskite-Based Solar Cells: Materials, Methods, and Future Perspectives”. *Journal of Nanomaterials* Volume 2018, Article ID 8148072, 15 pages.
- [42] Peng You Guanqi Tang Feng Yan “Two-dimensional materials in perovskite solar cells”. *Materials today energy* Volume 11, March 2019, Pages 128-158.
- [43] J. Burschka “Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells”. *Nature*, 499 (7458) (2013), pp. 316-319.
- [44] C. W. Chen, H. W. Kang, S. Y. Hsiao, P. F. Yang, K. M. Chiang, and H. W. Lin, “Efficient and uniform planar-type perovskite solar cells by simple sequential vacuum deposition”. *Advanced Materials*, vol. 26, no. 38, pp. 6647–6652, 2014.
- [45] H. J. Snaith, “Perovskites: the emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells” *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 4, no. 21, pp. 3623–3630, 2013.
- [46] M. A. Green, A. Ho-Baillie, and H. J. Snaith, “The emergence of perovskite solar cells” *Nature Photonics*, vol. 8, no. 7, pp. 506–514, 2014.
- [47] Q. Chen, H. Zhou, Z. Hong et al., “Planar heterojunction perovskite solar cells via vapor-assisted solution process” *Journal of the American Chemical Society*, vol. 136, no. 2, pp. 622–625, 2014.