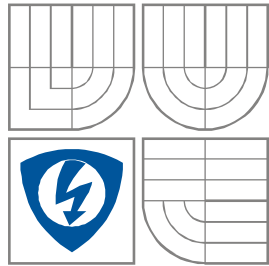


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELEKTROTECHNOLOGY

CHARAKTERIZACE OPTICKÝCH A ENERGETICKÝCH VLASTNOSTÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

PHOTOIMPEDANCE SPECTROSCOPY CHARACTERIZATION OF OPTICAL AND ELECTRICAL
PROPERTIES OF THE PHOTOVOLTAIC CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zuzana Mocharová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

BRNO, 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Studentka: Bc. Zuzana Mocharová

ID: 124159

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Charakterizace optických a energetických vlastností fotovoltaických článků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou fotovoltaických článků a s možnostmi měření jejich zatěžovacích charakteristik. Zaměřte se na vliv vlnové délky světla na účinnost solárních systémů. Seznamte se s dalšími metodami testování fotovoltaických článků, především s metodou impedanční spektroskopie a metodou fotospektroskopie. Provedte měření vybraných fotovoltaických článků na zařízení Zahner a výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

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

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

V diplomové práci jsou popsány teoretické poznatky k tématu charakterizace optických a energetických vlastností fotovoltaických článků pomocí fotoimpedanční spektroskopie, které zahrnují vývoj a princip článků, vlastnosti materiálů fotovoltaických článků, vysvětlení elektromagnetického vlnění, spektrofotometrie a impedanční spektroskopie, následně popis měřicího přístroje a použitých metod měření. V experimentální části je u každé měřicí metody popsán postup nastavení programu, dále jsou u některých metod vypracovány tabulky s naměřenými a dopočítanými hodnotami a součástí každé metody jsou pro přehled grafy z naměřených hodnot s následným vyhodnocením.

Klíčová slova

Fotovoltaický článek, účinnost, proudová účinnost, intenzita záření, frekvence, vlnová délka, impedanční spektroskopie, měření a metody.

Abstract

Diploma thesis mainly describes the theoretical knowledge of the topic photoimpedance spectroscopy characterization of optical and electrical properties of the photovoltaic cells, which contains development and princip of cells working, material properties of photovoltaic cells, explanation of electromagnetic waves, spectrophotometry and impedance spectroscopy, followed by a discription of the measuring device and used measuring methods. The experimental section for each measurement method describes the steps of setting the program, then the tables with measured values are involeved in some parts and a part of each method are summary graphs of measured values with subsequent evaluation.

Keywords

Photovoltaic cell, efficiency, current efficiency, light intensity, frequency, wavelength, impedance spectroscopy, measurement and methods.

MOCHAROVÁ, Z. *Charakterizace optických a energetických vlastností fotovoltaických článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 75 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Charakterizace optických a energetických vlastností fotovoltaického článku“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Vítězslavu Novákovi, Ph.D. a zejména panu prof. RNDr. Petru Vanýskovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, cenné rady a milé jednání v průběhu vypracování mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za pomoc při navrhování a výrobě kontaktních desek.

Obsah

Seznam obrázků.....	1
Seznam tabulek.....	2
Seznam grafů.....	3
Úvod.....	4
1 Teoretická část.....	5
1.1 Úvod do problematiky fotovoltaiky.....	5
1.1.1 Vývoj fotovoltaiky.....	5
1.1.2 Rozdělení FV článků podle generace.....	5
1.1.3 Princip fotovoltaických článků.....	7
1.2 Polovodičové materiály používané pro výrobu FV článků.....	7
1.2.1 Křemík Si.....	8
1.2.2 Další materiály méně používané pro výrobu FV článků.....	12
1.3 Elektromagnetické vlnění (záření).....	14
1.3.1 Elektromagnetické spektrum.....	15
1.3.2 Spektra látek.....	17
1.3.3 Spektrofotometrie.....	20
1.4 Elektrochemická impedanční spektroskopie.....	23
1.4.1 Potenciostatická metoda EIS.....	23
1.4.2 Galvanostatická metoda EIS.....	23
1.5 CIMPS – Controlled Intensity Modulated Photo Spectroscopy.....	26
1.5.1 Software.....	26
1.5.2 Základní funkce a měřící metody CIMPS.....	27
2 Experimentální část.....	33
2.1 Popis vzorků.....	33
2.1.1 Vzorek 1.....	33
2.1.2 Vzorek 2.....	33
2.1.3 Vzorek 3.....	34
2.1.4 Vzorek 4 a 5.....	34
2.1.5 Vzorek 6.....	34

2.2	Příprava vzorků k měření	35
2.3	Popis přístroje CIMPS.....	36
2.3.1	Zapojení	36
2.3.2	Světelné zdroje.....	37
2.4	Příprava přístroje a postup nastavení	38
2.5	Výsledky jednotlivých metod měření	39
2.5.1	Voltampérová charakteristika	39
2.5.2	Statické měření – proudová odezva v závislosti na intenzitě záření.....	54
2.5.3	Dynamické měření – fáze a proudová odezva v závislosti na frekvenci ..	57
2.5.4	Extrakce náboje.....	64
2.5.5	Proudová odezva na jednotlivé vlnové délky spektra.....	66
	Závěr	69
	Použitá literatura	72

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Princip práce fotovoltaických článků	7
Obrázek 1.2: Závislost energie záření na vlnové délce spektra pro křemík.....	9
Obrázek 1.3: Závislost transmitance na vlnové délce	9
Obrázek 1.4: Závislost transmitance na vlnové délce.	12
Obrázek 1.5: Elektromagnetická vlna	15
Obrázek 1.6: Druhy elektromagnetického záření.....	16
Obrázek 1.7: Vyzařované nebo pohlcované spektra látek	17
Obrázek 1.8: Energetické přechody elektronů	19
Obrázek 1.9: Schematické znázornění spektrofotometru.....	22
Obrázek 1.10: Schematické znázornění elektrického obvodu pro Randlesovu celu	24
Obrázek 1.11: Nyquistův graf zobrazující imaginární část impedance v závislosti na reálné části impedance	26
Obrázek 1.12: IMVS měření při konstantní vlnové délce 627 nm a třech různých intenzitách záření	29
Obrázek 1.13: Znázornění IMVS měření imaginární složky v závislosti na frekvenci	30
Obrázek 1.14: Graf znázorňující závislost napětí a náboje na čase	31
Obrázek 2.1: Testovací článek (vlevo zepředu, vpravo zezadu).....	33
Obrázek 2.2: Organické články.....	34
Obrázek 2.3: Desky plošných spojů pro kontaktování a uchycení článků (vlevo přední část s otvorem, uprostřed zadní část, vpravo spojené desky).....	35
Obrázek 2.4: Desky plošných spojů s patičkami s nulovou silou pro uchycení a měření organických článků (vlevo přední strana, vpravo zadní strana).....	36
Obrázek 2.5: Tradiční uspořádání měřících přístrojů jako je IMPS (nalevo), schéma uspořádání přístroje CIMPS (napravo)	37
Obrázek 2.6: Zapojení světelného zdroje, článku a potenciostatu	37
Obrázek 2.7: Měřítka pro určení vzdálenosti světelného zdroje a měřeného vzorku	38
Obrázek 2.8: Spektrum slunečního záření dopadajícího na zemský povrch vyjádřené ve výkonu v závislosti na vlnové délce	67

Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Druhy elektromagnetického záření	15
Tabulka 2.1: Naměřené hodnoty vzorku 1 při různých intenzitách záření	40
Tabulka 2.2: Naměřené hodnoty vzorku 2 při různých intenzitách záření	41
Tabulka 2.3: Naměřené hodnoty vzorku 3 při různých intenzitách záření	42
Tabulka 2.4: Naměřené hodnoty vzorku 4 při různých intenzitách záření	43
Tabulka 2.5: Naměřené hodnoty vzorku 5 při různých intenzitách záření	44
Tabulka 2.6: Naměřené hodnoty vzorku 6 při různých intenzitách záření	45
Tabulka 2.7: Srovnání účinnosti a výkonu vzorků diodovým zdrojem	46
Tabulka 2.8: Naměřené hodnoty vzorku 1 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj	47
Tabulka 2.9: Naměřené hodnoty vzorku 2 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj	48
Tabulka 2.10: Naměřené hodnoty vzorku 4 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj	49
Tabulka 2.11: Naměřené hodnoty vzorku 6 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj	50
Tabulka 2.12: Srovnání účinnosti a výkonu vzorků osvícených wolframovým zdrojem.....	51

Seznam grafů

Graf 2.1: Voltampérová charakteristika vzorku 1 při různých intenzitách záření	40
Graf 2.2: Voltampérová charakteristika vzorku 2 při různých intenzitách záření	41
Graf 2.3: Voltampérová charakteristika vzorku 3 při různých intenzitách záření	42
Graf 2.4: Voltampérová charakteristika vzorku 4 při různých intenzitách záření	43
Graf 2.5: Voltampérová charakteristika vzorku 5 při různých intenzitách záření	44
Graf 2.6: Voltampérová charakteristika vzorku 6 při různých intenzitách záření	45
Graf 2.7: Voltampérová charakteristika - srovnání vzorků 1-6 při intenzitě záření $300\text{W}/\text{m}^2$	46
Graf 2.8: Voltampérová charakteristika vzorku 1 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj.....	47
Graf 2.9: Voltampérová charakteristika vzorku 2 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj.....	48
Graf 2.10: Voltampérová charakteristika vzorku 4 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj	49
Graf 2.11: Voltampérová charakteristika vzorku 6 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj	50
Graf 2.12: Voltampérová charakteristika (wolframový zdroj) srovnání vzorků při intenzitě záření $1000\text{ W}/\text{m}^2$	51
Graf 2.13: Voltampérová charakteristika srovnání světelných zdrojů - vzorek 1.....	52
Graf 2.14: Voltampérová charakteristika srovnání světelných zdrojů - vzorek 4.....	52
Graf 2.15: Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 1.....	54
Graf 2.16: Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 2.....	55
Graf 2.17: Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 4.....	56
Graf 2.18: Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 5.....	56
Graf 2.19: Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 6.....	57
Graf 2.20: Proudová účinnost v závislosti na frekvenci - vzorek 1	59
Graf 2.21: Proudová účinnost v závislosti na frekvenci - vzorek 2	60
Graf 2.22: Proudová účinnost v závislosti na frekvenci - vzorek 4	61
Graf 2.23: Proudová účinnost v závislosti na frekvenci - vzorek 6	62
Graf 2.24: Srovnání hodnot dynamického měření proměřených vzorků při intenzitě záření $100\text{ W}/\text{m}^2$	63
Graf 2.25: Generované napětí a náboj v závislosti na čase - vzorek 4.....	64
Graf 2.26: Generované napětí a náboj v závislosti na čase (delší vybíjecí čas) - vzorek 4	65
Graf 2.27: Srovnání proudové odezvy vzorků v závislosti na vlnové délce	68

Úvod

Fotovoltaika je již pár let žhavě diskutovaným tématem. Od objevení fotovoltaického jevu uběhla nějaká doba a s tím stále dochází k vývinu fotovoltaických článků. Vědci neustále zkoumají materiály, které mají malou šířku zakázaného pásu, nebo mají skvělé absorpční vlastnosti, anebo jsou nízké náklady na jejich výrobu. Důvodů proč se zabývat materiály vhodnými pro fotovoltaiku je spousta. V neposlední řadě proto, že fotovoltaické panely patří do skupiny obnovitelných (nevyčerpatelných) zdrojů energie. Pro zjišťování vlastností materiálů článků slouží mnoho metod. Zjišťuje se účinnost článků, výkon, absorpční vlastnosti, délka života nosičů a mnoho dalších parametrů. Je velmi důležité znát parametry článků a to jak z hlediska běžného uživatele, který si pořídí vlastní elektrárnu, tak z hlediska vědců, kteří se snaží dosáhnout co nejlepších výsledků a nových objevů v této oblasti.

Hlavním cílem mé diplomové práce je proměřit vzorky fotovoltaických článků pomocí různých měřících metod, které umožňuje přístroj CIMPS a následné vyhodnocení získaných výsledků. Tomu předchází seznámení se s teoretickými poznatky z oblasti fotovoltaiky, se způsoby měření fotovoltaických článků a dále s technickými parametry a obsluhou nově pořízeného přístroje typu CIMPS od výrobce ZAHNER, který je mimo jiné touto prací testován. Přístroj CIMPS umožňuje proměření základních parametrů článků i složitější měření pomocí elektrochemické impedanční spektroskopie.

Diplomová práce bude obsahovat část teoretickou a experimentální. V teoretické části budou popsány základní informace a poznatky o fotovoltaice, o materiálech, ze kterých mohou být vyráběny fotovoltaické články a o vlastnostech těchto materiálů. Další dvě kapitoly budou zaměřeny na elektromagnetické vlnění a elektrochemickou impedanční spektroskopii. V poslední kapitole teoretické části bude popsán přístroj CIMPS a jeho měřící metody. V experimentální části budou popsány přístroj CIMPS, vzorky použité k měření, výsledky jednotlivých měření a jejich vyhodnocení.

1 Teoretická část

1.1 Úvod do problematiky fotovoltaiky

1.1.1 Vývoj fotovoltaiky

Fotovoltaický jev byl objeven v roce 1839 Edmondem Becquerelem, který pozoroval vznik elektrického napětí mezi osvětlenými elektrodami. V roce 1877 byl vyroben první selénový článek schopný dodávat elektřinu a až v roce 1954 byl vyroben křemíkový fotovoltaický článek. Po roce 1970 byl vyroben první fotovoltaický článek na bázi GaAs heterostruktury. První článek na bázi amorfního křemíku byl vyroben v roce 1976. Po rozvoji polovodičové technologie se přišlo na to, jak zvládnout přípravu monokrystalického křemíku a začalo se uvažovat o fotovoltaice jako o zdroji energie. Základním prvkem fotovoltaiky se stal křemík, který je vhodný materiál pro výrobu solárních článků, protože díky své šířce zakázaného pásu je u něj možné dosáhnout vysoké účinnosti generace volných nosičů. Mezi lety 1950 – 2000 lze vidět pokroky ve zvyšování účinnosti fotovoltaických článků na základě intenzivního výzkumu. Od poloviny sedmdesátých let jsou fotovoltaické články využívány jako nezávislý zdroj energie. Později se přišlo na to, že je potřeba vyrábět hromadně a levně fotovoltaické články, aby mohly ekonomicky konkurovat ostatním zdrojům energie [2, 3, 4].

Účinnost je velmi důležitý parametr na trhu s fotovoltaikou. Rozsáhlý výzkum zkoumá zlepšování účinnosti fotovoltaických článků pro komerční použití. Účinnost monokrystalického křemíku se rok od roku zvyšuje. Původně v roce 1950 byla účinnost při laboratorním měření pouze 15 %, v roce 1970 se zvýšila na 17 % a v současné době převyšuje 28 %. Polykrystalický křemík dosáhl účinnosti při laboratorním měření 19,8 %, ale pro komerční použití je to pouze mezi 12 až 15 %. Maximální teoretická hodnota jednovrstvého článku je dána Schockley-Quisserovou hranicí a činí 33,7 %. V roce 2010 materiál GaAs oproti jiným materiálům dosáhl účinnosti 40,7 %. Nové materiály pro fotovoltaické články jako například barvocitlivé a organické články mají stále nízkou účinnost okolo 5% [10].

Díky vývoji fotovoltaiky se neustále zvyšuje instalovaný výkon na celém světě. V roce 2013 byl instalovaný výkon na celém světě cca 139 GW, což dokazuje, že stále dochází k navyšování instalací fotovoltaických panelů a elektráren. Podle redakce *Nazeleno.cz* se do roku 2018 očekává až trojnásobný nárůst celkového instalovaného výkon (374 GW) než v loňském roce. Největší zájem o solární energetiku je v Asii, v Evropě se očekává nárůst ze současných 81,5 GW na 119 GW, což by pokrývalo zhruba 4% evropské spotřeby elektřiny [5].

1.1.2 Rozdělení FV článků podle generace

Fotovoltaické články lze rozdělit na tři generace podle vývoje a materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Pokrok ve fotovoltaice se však touto klasifikací neřídí. Nejúčinnější je křemík, proto se dál vyvíjí další způsoby jak použít křemík (např. ztenčením vrstev, články z křemíkových kuliček).

1. Generace – první generací jsou označovány křemíkové desky, jsou kvůli náročné výrobě drahé. Ve výsledku je důležitý podíl ceny na instalovaný výkon. Křemíkové desky jsou dnes nejrozšířenější technologií na trhu.

- Monokrystalický křemík
- Multikrystalický křemík
- Polykrystalický křemík

2. Generace – kvůli velké spotřebě materiálu a vysokým nákladům na výrobu křemíkových desek se objevil další způsob výroby fotovoltaických článků pomocí tenkých vrstev. Při výrobě tenkovrstvých článků se spotřebuje 100x až 1000x méně materiálu než u křemíkových desek první generace, což vede k cenové výhodě, nicméně jsou drahé potřebné vakuové technologie a při daných objemech výroby nejsou oproti křemíkovým deskám ve výsledku nějak zvláště výhodné. Nevýhodou tenkovrstvých článků je nízká dosahovaná účinnost fotovoltaické přeměny.

- Amorfni křemík
- Mikrokrystalický křemík
- Amorfni Ge, SiGe
- GaAs, InP
- CdTe/CdS
- Cu, In, Se, Ga, S – směsné polovodiče obecně označované CIS

3. Generace – pomocí alternativních přístupů je snaha o dosažení účinnosti nad Shockley-Queisserovu hranici omezující fotovoltaické přeměny. Podstatou omezení je předpoklad, že jeden foton vytvoří jeden exciton o energii rovné zakázanému pásu a přebytečná energie se mění na teplo.

Oblasti, kterými se výzkum zabývá:

- Tandemové tenkovrstvé články
- Články s vícenásobnými pásy
- Články s využitím horkého nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr
- Termofotovoltaická přeměna, kde absorbér je současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii
- Termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí
- Články využívající kvantových jevů v kvantových jamách
- Prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní hmoty
- Organické články

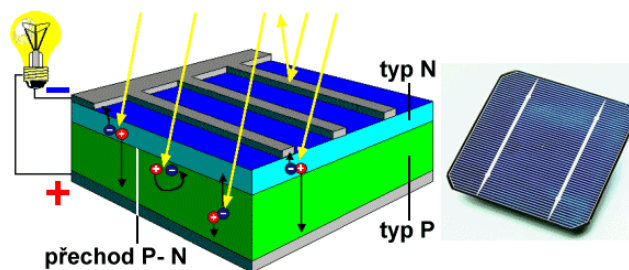
Zatím jediným fungujícím článkem třetí generace jsou tandemové vícevrstvé články, z nichž každá substruktura absorbuje určitou část spektra a tím se maximalizuje energetická využitelnost fotonů.

Materiály 3. generace:

- Gratzel, DSSC
- Polymerní materiály
- Barvocitlivé články
- Fullereny [2, 6, 7]

1.1.3 Princip fotovoltaických článků

Fotovoltaika se zabývá přeměnou slunečního záření na elektrickou energii. Základním prvkem systému je fotovoltaický článek, který je polovodičovou součástí alespoň s jedním PN přechodem. Přední strana článku pohlcuje sluneční záření. Při dostatečně velké energii fotonů dochází při interakci s polovodičem k uvolnění vazebních elektronů a na základě toho dochází ke vzniku párů elektron-díra. Ty jsou poté separovány působením vnitřního elektrického pole PN přechodu, což má za následek napěťový rozdíl mezi předním a zadním kontaktem článku a na základě toho je možné odebírat proud. Velikost stejnosměrného proudu, který protéká vnějším obvodem, závisí na ploše článku a na intenzitě dopadajícího záření. Pro zvýšení získaného napětí se články spojují jednotlivě do série, naopak pro zvýšení získaného proudu se články spojují paralelně. Ve výsledku vzniká modul, který zároveň musí být chráněn před nepříznivými vlivy okolního prostředí. Je také potřeba minimalizovat ztráty. Ty se dělí na optické a rekombinační ztráty. Optické ztráty jsou způsobené odražením záření zpět do prostoru, proto se používají antireflexní vrstvy a povrchy se různě upravují. Rekombinační ztráty jsou způsobené dřívější rekombinací než u vývodů součástky [1, 7, 8].



Obrázek 1.1: Princip práce fotovoltaických článků [44]

1.2 Polovodičové materiály používané pro výrobu FV článků

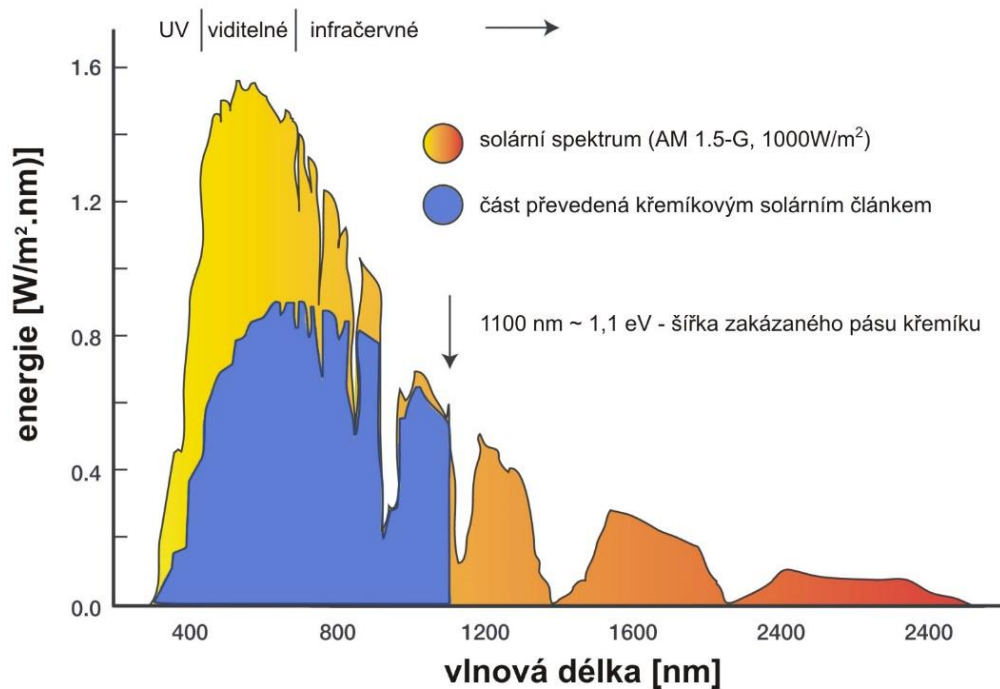
Stručný přehled používaných materiálů pro výrobu fotovoltaických článků je popsán v předešlé kapitole. Křemík je prvek, který vede ve výrobě článků díky své vysoké účinnosti. Avšak kvůli vysokým nákladům na výrobu se vyvinuly a stále dál vyvíjí tenkovrstvé technologie. Při této technologii se spotřebuje mnohem méně materiálu, proto je výroba levnější. Jenže účinnost takto vyrobených článků je stále nízká. Další materiály, kterým byla věnována velká pozornost, jsou amorfní křemík, telurid kademnatý, sulfid kademnatý a CIS, ale výzkum se stále snaží pokračovat ve zvyšování účinnosti těchto materiálů, protože není dost vysoká. Do 3. generace potom patří organické a polymerní materiály, které by neměly mít takový dopad na životní prostředí jako předešlé zmíněné materiály. Polymerní materiály

mají mnoho výhod, jako například nízké náklady a nízkou hmotnost. Jediný a zásadní problém je zatím velmi nízká účinnost [10].

1.2.1 Křemík Si

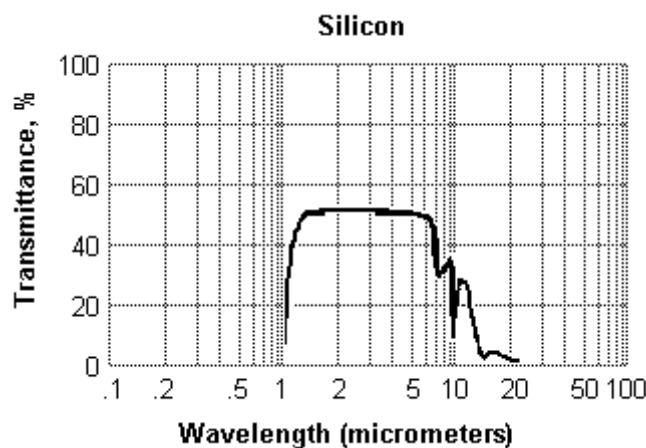
Křemík je v současnosti nejvýznamnější materiál ve fotovoltaice, hlavně co se týče výkonnostních modulů. Jde o polovodič, kde dochází k PN přechodu. Křemík může být vlastním polovodičem (intrinsický) nebo nevlastním polovodičem (extrinsický). U křemíku, který je vlastním polovodičem, je potřeba dodat energii vyšší než je šířka zakázaného pásu k tomu, aby se uvolnily valenční elektrony a přeskočily z valenční energetické hladiny do vodivostní energetické hladiny. Tím vznikne ve valenčním pásu díra o stejné energetické hodnotě s opačným znaménkem než elektron, který se uvolnil a přeskočil do vodivostního pásu, jinak řečeno vznikne pár elektron-díra. Šířka zakázaného pásu křemíku je 1,12 eV. Koncentrace volných nosičů náboje je u vlastních polovodičů závislá na teplotě. Nevlastní polovodič křemíku obsahuje další prvek ve své krystalické mřížce ze III. nebo IV. skupiny prvků periodické soustavy. Podle toho se nevlastní polovodič křemíku dělí na polovodič typu N a polovodič typu P. U polovodiče typu N se do čtyřmocných atomů polovodiče přidávají pětímocné atomy, které mají pět valenčních elektronů. To znamená, že díky těmto nadbytečným elektronům vzniká záporný náboj v polovodiči a způsobuje elektronovou vodivost. Nevlastních elektronů je mnohem více než elektronů vlastních, elektrony jsou tedy majoritními nosiči náboje. Nevlastní nosiče náboje nejsou závislé na teplotě. Naopak děr je stejně množství jako vlastních elektronů, je jich méně než součet vlastních i nevlastních elektronů, proto jsou minoritními nosiči náboje. Počet děr je v tomto případě teplotně závislý. Prvek, který je přidán do krystalické mřížky křemíku, se nazývá donor (dárce elektronu). U polovodiče typu P se přidává do krystalické mřížky křemíku trojmocný prvek, který má pouze tři valenční elektrony, to znamená, že vznikají neobsazené volné díry a díky tomu získává polovodič kladný náboj. Majoritními nosiči náboje jsou díry, minoritními nosiči náboje jsou elektrony. Prvkům, které dotují polovodič typu P, se říká akceptory (přijímají elektron) [32].

Křemík má vynikající optické a elektrické vlastnosti. Koncentrace elektronů a děr ve vlastním polovodiči je $1,45 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Pohyblivost elektronů je $0,135 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ a pohyblivost děr se rovná $0,048 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Efektivní hustota stavů ve vodivostním pásu je $2,8 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$, ve valenčním pásu je efektivní hustota stavů $1,04 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$.



Obrázek 1.2: Závislost energie záření na vlnové délce spektra pro křemík [33]

Křemík je schopný absorbovat sluneční záření jen do určité hodnoty a v rozmezí určité vlnové délky zhruba 300 nm až 1100 nm. Na obrázku 2.1 je modrou barvou znázorněna část, která je převedená fotovoltaickým článkem na elektrickou energii.



Obrázek 1.3: Závislost transmittance na vlnové délce [36]

1.2.1.1 Monokrystalický křemík

Za počátek využití fotovoltaického jevu se považuje rok 1954, kdy se podařilo zrealizovat solární články na monokrystalickém křemíku. Další pokrok byl v roce 1975, kdy cílem bylo dosáhnout nízké ceny. Okolo roku 1981 se expertům zdála být hranice účinnosti 17 % pro monokrystalický křemík bariérovou a až do roku 1992 se ohledně účinnosti moc velkých změn nedosáhlo. V roce 1992 čínská akademie věd v Pekingu vyvinula solární článek s účinností 35,2 %. Toto výrazné zvýšení bylo způsobeno zlepšením

hodnot napětí naprázdno, zdokonalením optického návrhu článků a pokrokem v samotné křemíkové technologii i technologii montáže. Monokrystalický křemík je však drahý, i výroba je energeticky náročná. Pro využití monokrystalického křemíku se tehdy nemuselo dosahovat takové čistoty křemíku jako u mikroelektroniky, tím by byla výroba méně náročná a levnější. V počátcích byla návratnost okolo desítek let [7, 8].

Výroba monokrystalického křemíku

Polovodivá vlastnost křemíku je lepší u polykrystalických článků, ale u těch mohou vznikat ztráty na rozhraní krystalů, proto se zejména u vysoce integrovaných obvodů používá téměř dokonalý monokrystal. Velké monokrystalové se nejlépe získávají pěstováním z taveniny, růst z plynné fáze se používá jen u tenkých monokrystalických vrstev [7].

a) Czochralského metoda (tažení z kelímku)

V zařízení s názvem tažička dochází ke zpracování polykrystalického křemíku na monokrystalický. Důležitými částmi tažičky jsou křemenný kelímek, grafitový kelímek, systém přívodu a odvodu plynu, vakuová pumpa, otočné zařízení kelímku a krystalu, monitorovací systém a topná část. Kusový polykrystalický křemík je vsazen do křemenného kelímku. Křemenný kelímek se používá pro svou vysokou teplotu tání, která je mnohem vyšší než teplota tání křemíku. Křemenný kelímek je ale při vysokých teplotách měkký, dochází k jeho deformaci. Proto se podkládá grafitovým kelímek, který je složen ze tří oddělených částí vkládajících se pod křemenný kelímek jednotlivě. Po každém ukončeném procesu tažení se musí použít nový křemenný kelímek. Do tažičky je horní komorou přiváděn argon, který je důležitý z hlediska odnášení nečistot, zejména par SiO₂, od rostoucího ingotu a zabraňuje tak vzniku karbidů křemíku SiC na grafitových částech topné zóny. Průtok argonu se řídí tak, aby co nejtěsněji obtékal vznikající ingot. Tlak, rychlost proudění a teplota argonu jsou jedny z velice sledovaných veličin. Pohyb krystalu je zajištěn pomocí hřídele nebo lanko. Lanko je v současné době nejpoužívanějším držákem zárodku. Kvůli možnosti vzniku defektů monokrystalu křemíku se sleduje rychlost posuvu, která na to má vliv. Monitorovací systém zaznamenávající výšku menisku se nazývá pyrometr, u novějších typů tažiček se používají videokamery. Topná část je složena z grafitového topného tělesa, grafitových kelímků a izolací. Tažička je opatřena dutým pláštěm chlazeným vodou. Teplota tání na rozhraní se pohybuje okolo 1410 – 1420 °C [7, 12].

b) Metoda zónového (pásmového) tavení

Při této metodě se nepoužívá kelímek, ale využívá se poměrně vysokého povrchového napětí křemíkové taveniny. Tavné pásmo drží mezi konci dvou svislých křemíkových tyčí. K tavení slouží vysokofrekvenční indukční ohřev, kdy se do tavné tyče přenáší energie z vysokofrekvenční cívky. Tavné pásmo vzniká na spodním konci svisle držené tyče z krystalického křemíku. Posouváním tyčí nebo vysokofrekvenční cívky může tavné pásmo projít od očkovacího krystalu až po horní konec tyče. Výhodou metody zónového tavení je eliminace znečištění stěnami tavící nádoby. Nečistoty se v pohybujícím se tavném pásmu přemísťují ke konci tyče, protože má jejich směs s čistým křemíkem nižší bod tání než samotný křemík. Vysoce čistý křemík se dá

získat několikanásobným pásmovým tavením. Pokud je proces realizován ve vakuu, tak je čistící efekt ještě podporován odpařováním. Křemík vyrobený metodou zónového tavení je používán hlavně pro výrobu elektronických součástek výkonové elektroniky s vysokými provozními napětími, například usměrňovače, tyristory atd. Při této metodě se téměř nevyskytují poruchy typu deformace a posuny jader zrn, avšak absolutně dokonalý monokrystal nelze vyrobit, protože přetrvávají poruchy, jako jsou bodové defekty krystalické mřížky a jejich shluky [7].

c) Dotování

Dotace příměsí způsobuje v polovodičovém materiálu vytvoření oblastí s rozdílnou koncentrací příměsí a tedy i PN přechody. Dotování se provádí difúzí a iontovou implantací. Po implantování dopantu do polovodičové desky se dopant začne pohybovat v krystalické mřížce. Pro difúzi je potřeba zajistit vysokou koncentraci difundující příměsí a dodat potřebnou energii [7].

1.2.1.2 Multikrystalický křemík

Na základě výzkumů se v roce 1981 objevily první články z multikrystalického křemíku, které jsou levnější než monokrystalické články, ale mají menší účinnost. Primární metoda výroby multikrystalického křemíku je lití do kokyl. Ingoty jsou poté povrchově opracovány a řezány na desky. Multikrystalické křemíky mají oproti monokrystalickým menší účinnost, která je dána ztrátami na hranicích zrn. Aby nevznikaly ztráty při přechodě elektronů rozhraním mezi krystaly, vyrábí se články s co největšími krystaly. Účinnost tohoto materiálu se také dá zvýšit chemickou pasivací vodíkem, což snižuje rekombinaci nosičů způsobenou defekty a hranicemi zrn [7, 8].

1.2.1.3 Polykrystalický křemík

Polykrystalický křemík se používá hlavně v praktické fotovoltaice. Je tvořený z většího množství krystalů, což snižuje náklady na výrobu, ale také účinnost přeměny sluneční energie na elektrickou. Jako u multikrystalického křemíku je nižší účinnost způsobena ztrátami, které vznikají na rozhraní jednotlivých krystalů [8, 10].

1.2.1.4 Hydrogenizovaný amorfní křemík

Amorfní křemík se využívá v tenkovrstvých člancích. Pro účely slunečních elektráren se využívá přibližně od roku 1985. Amorfní látky mají oproti krystalickým látkám nepravidelnou strukturu. Další rozdíl oproti krystalickému křemíku spočívá ve výrobě. Amorfní křemík se vyrábí napařením vrstvy amorfního křemíku na skleněnou tabuli (i plasty nebo kov) ve vakuové komoře při teplotě 200 °C. Vrstva amorfního křemíku nepřesahuje tloušťku 1 μm, kdežto tloušťka krystalického křemíku je cca 0,3 mm. Výroba amorfního křemíku je tedy levnější, avšak méně účinná. Účinnost naměřená v laboratořích je okolo 10 % a komerční se pohybuje od 5 do 8 %. Pro stejný výkon jako u krystalických panelů je potřeba nainstalovat dvakrát tolik panelů. Šířka zakázaného pásu materiálu je okolo 1,7 eV a součinitel absorpce je větší než 10^{-6} m^{-1} , což znamená, že velká část dopadající sluneční energie se absorbuje ve vrstvě tenčí než 1 μm. Hydrogenizovaný amorfní křemík se též lehko

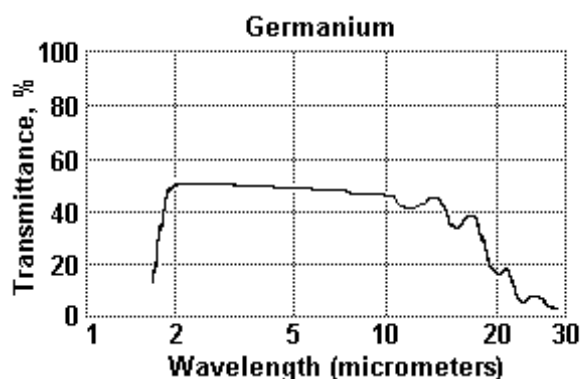
kombinuje dopováním a legováním jinými prvky, jako například uhlíkem, dusíkem, cínem nebo germaniem, a tím se vytváří slitiny s různou šířkou zakázaného pásu. V čistém amorfním křemíku vyrobeném napařováním nebo naprašováním je hustota stavů v zakázaném pásu okolo $10^{21} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$. Tato vysoká hustota stavů v zakázaném pásu má za následek zkrácení doby života volných nosičů náboje a tím znemožňuje posun Fermiho hladiny pro dopování. Proto je čistý amorfní křemík nevhodný pro použití v elektronických součástkách [7, 9].

1.2.2 Další materiály méně používané pro výrobu FV článků

1.2.2.1 Germanium Ge

Germanium objevil v roce 1886 německý chemik Clemens A. Winkler a pojmenoval je podle své vlasti. Germanium je polovodič a díky tomu má velký význam v elektrotechnice. Používalo se pro výrobu integrovaných obvodů s vysokou rychlostí přenosu signálu, tranzistorů a další součástek, ale později bylo nahrazen křemíkem, který se v přírodě vyskytuje ve větším množství než germanium. V současné době se germanium používá jako germanid křemíku SiGe. Samotné germanium je však velmi významným prvkem pro výrobu fotovoltaických článků, protože má velmi nízkou šířku zakázaného pásu, která se rovná 0,67 eV. Z tohoto hlediska je germanium lepší než křemík, protože je k přechodu nosiče náboje potřeba menší energie.

Optické a elektrické vlastnosti se udávají při teplotě 300 K. Koncentrace elektronů a děr ve vlastním polovodiči je u germania $2,29 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$. Pohyblivost elektronů je $0,39 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ a pohyblivost děr je $0,19 \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Efektivní hustota stavů ve vodivostním pásu je $1,04 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ a ve valenčním pásu se efektivní hustota stavů rovná $6,0 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ [34].



Obrázek 1.4: Závislost transmittance na vlnové délce [36].

Výroba germania

Germanium se vyrábí zpracováním odpadních produktů z výroby zinku nebo z popela uhlí. Odpadní prach ze zinku se louhuje kyselinou sírovou, germanium přejde do roztoku, ze kterého se vysráží, sraženina se podrobí chloraci a germanium přejde na těkavý chlorid germaničitý, který se redukuje zinkem na kovové germanium. Druhým způsobem je výroba germania z popela, kdy se jemný popílek z elektrostatických odlučovačů nejprve přetaví

v peci a poté se destiluje v prostředí chlorovodíku za vzniku těkavého chloridu germaničitého. Chlorid germaničitý se několikanásobnou destilací zbaví příměsí arsenu a poté se hydratuje, při čemž vzniká oxid germaničitý. Kovové germanium se z bezvodého oxidu vyredukuje při teplotě 600-700 °C vodíkem nebo uhlím v peci. Surové kovové germanium je čištěno zonální rafinací podobně jako křemík [35].

1.2.2.2 Arsenid gallitý GaAs

Arsenid gallitý je druhým nejčastěji používaným materiálem pro výrobu fotovoltaických článků. Vývoj na bázi GaAs probíhá již mnoho let, avšak tento materiál je znevýhodněn vysokou cenou a také křehkostí. Na druhou stranu byly vyvinuty články s účinností nad 20 %, při sériové výrobě je však účinnost průměrně 17,5 %. Další vývoj tohoto materiálu by měl umožnit kombinaci s hliníkem GaAlAs, což by zvýšilo účinnost pravděpodobně až nad 25 %. Kromě hliníku se GaAs dá kombinovat s indiem In, fosforem P a antimonem Sb. GaAs má velmi vysokou hustotu oproti křemíku. Proto je možnost vyrábět o mnoho tenčí články GaAs a to až o 60 % oproti křemíkovým. Články mají také větší odolnost proti kosmickému záření, proto jsou využívány také v kosmu. Při vyšších teplotách okolo 100 °C se u GaAs článků neprojevuje výrazné snížení účinnosti jako u křemíkových článků, výhodou je použití článků za vysokých teplot. Šířka zakázaného pásu GaAs je 1,43 eV [7, 8, 10].

1.2.2.3 Telurid kademnatý CdTe

Telurid kademnatý má velmi dobrou schopnost absorpce a větší šířku zakázaného pásu (1,5 eV při pokojové teplotě). Díky těmto vlastnostem se z něj stává nadějný materiál pro přeměnu sluneční energie na elektrickou. Také dosahuje vysoké proudové hustoty i vysokého napětí. Typická struktura fotovoltaických článků se skládá z n-CdS a p-CdTe heteropřechodů nanesených na skleněném substrátu a pokrytých průhlednou oxidovou vrstvou TCO (transparent conducting oxide). Silně dopovaná vrstva CdS je pouze tenkou vrstvou n-polovodiče a je fotovoltaicky neaktivní. Nános této extrémně tenké vrstvy CdS při co největší účinnosti článku je nejkritičtějším bodem pro vytváření velkoplošných struktur. Nejvíce nosičů elektrického náboje je generováno ve spodní p-vrstvě, která leží pod vrstvou CdS v heteropřechodu, což může způsobovat velké ztráty účinnosti, pokud není nanášecí technologie velice dobře zvládnutá. Přes všechny uvedené přednosti se telurid kademnatý nedá využívat pro rozsáhlou výrobu energie pomocí velkých slunečních elektráren, protože je ho nedostatečné množství v zemské kůře. Jeho uplatnění spočívá především ve spotřební elektronice, telekomunikačních a navigačních zařízeních [7, 8, 10].

1.2.2.4 Sulfid kademnatý CdS

Sulfid kademnatý má velmi nízkou hmotnost, proto se uplatňuje hlavně v kosmických aplikacích. Nejvíce se CdS uplatnil v podobě tenkých vrstev v kombinaci s Cu₂S. Toho bylo dosaženo poměrně jednoduchými a levnými postupy. Nadějnější je kombinace s teluridem kademnatým, buď v podobě monokrystalů, nebo vrstev [7, 8].

1.2.2.5 Materiály CIS a CIGS

Polykrystalické polovodičové materiály s přímým přechodem a s velmi vysokou hodnotou optického absorpčního koeficientu jsou například měď-indium-diselenid CuInSe_2 a měď-indium-galium-selenid CuInGaSe . Oba materiály jsou polovodiče typu p a jsou využívány v heteropřechodové konstrukci. Jako n-typ se často využívá tenká vrstva sulfidu kadmennatého CdS. Šířka zakázaného pásu těchto sloučenin je 1,68 eV [10, 11].

1.2.2.6 Organické a polymerní materiály

Organické solární články jsou nová technologie a jsou stále ve fázi vývoje jako CIS/CIGS. Účinnost je zatím nízká, pohybuje se okolo 4-5 %, ale díky mechanické flexibilitě a nízkým nákladům je organický materiál pro výrobu článků zajímavý. Ohledně polymerních materiálů se prováděl výzkum, který byl zaměřený na hustotu, sílu, UV stabilitu, teplotu, tloušťku atd. Na závěr vyšlo, že některé polymery vykazují lepší hodnoty než křemík a v budoucnu by ho mohly nahradit díky nižším nákladům na výrobu a hmotnostní redukci [10].

1.2.2.7 Hybridní materiál

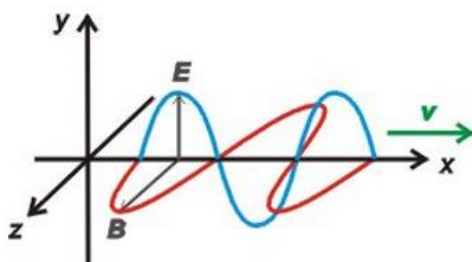
Myšlenkou hybridního materiálu je skombinovat krystalický křemík a multikrystalický křemík nebo amorfní křemík s krystalickým křemíkem. Jeden z největších výrobců solárních článků z Japonska vynalezl hybridní článek s účinností zhruba 21 %. Jde o kombinaci heteropřechodu a vnitřní tenké vrstvy solárního článku s označením HIT. Základem tohoto článku je n-typ CZ křemík, který slouží pro absorpci světla [10].

1.2.2.8 Barvocitlivý materiál

Na základě výzkumu se přišlo s myšlenkou produkovat nové barvocitlivé články, protože články z předešlých uvedených materiálů mají buď nízkou účinnost, nebo je výroba drahá, anebo není materiál a výroba článků úplně nezávadná vůči životnímu prostředí. Barvocitlivé články se skládají z pěti částí. Skládají se z 1) mechanického ochranného obalu s transparentním vodivým oxidem, 2) polovodivé vrstvy, většinou z oxidu titaničitého TiO_2 , 3) citlivého absorbéru povrchu polovodiče, 4) elektrolytu obsahujícího redoxní mediátor, 5) elektrody schopné regenerace redoxního mediátoru jako platina [10].

1.3 Elektromagnetické vlnění (záření)

Elektromagnetické vlnění má dvě složky, které jsou navzájem kolmé. Jedna složka je elektrická, kterou charakterizuje vektor intenzity elektrického pole E , a druhá složka je magnetická, kterou charakterizuje vektor magnetické indukce B . Tyto vektory mají souhlasnou fázi a jejich kmity probíhají kolmo ke směru, kterým se vlnění šíří, což znamená, že každé elektromagnetické vlnění je příčné.



Obrázek 1.5: Elektromagnetická vlna [21]

Na obrázku 3.1 se vektor magnetické vlny promítá do osy z a vektor elektrické vlny do osy y . Celkové elektromagnetické vlny se šíří ve směru osy x . Platí, že oba vektory jsou synchronizované, to znamená, že dosahují svého maxima ve stejném okamžiku.

Rychlost šíření elektromagnetického vlnění ve vakuu je asi $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, přesně $299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro rychlost šíření elektromagnetického záření platí vztah (1.1) [21, 22, 26].

$$c = f \cdot \lambda \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.1)$$

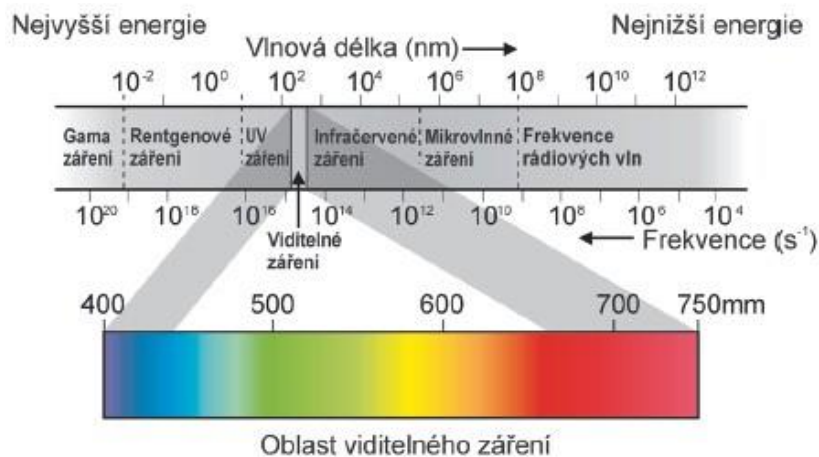
kde λ je vlnová délka světla a f je frekvence.

1.3.1 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum obsahuje soubor záření různých barev, kde každá barva odpovídá určité vlnové délce. Spektrum elektromagnetického záření může být také nazýváno Maxwellova duha. Podle vlnové délky tedy rozlišujeme několik druhů elektromagnetického záření, mezi nimiž není ostrá hranice [22].

Tabulka 1.1: Druhy elektromagnetického záření [dle 24]

Elektromagnetické záření	Vlnová délka ve vzduchu	Frekvence [Hz]
Rádiové záření	30 km – 1 m	$10^4 - 3 \cdot 10^8$
Mikrovlny	1 m – 0,3 mm	$3 \cdot 10^8 - 10^{13}$
Infračervené záření	0,3 mm – 790 nm	$10^{13} - 3,8 \cdot 10^{14}$
Světlo	790 nm – 390 nm	$3,8 \cdot 10^{14} - 7,7 \cdot 10^{14}$
Ultrafialové záření	400 nm – 10 nm	$7,7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$
Rentgenové záření	10 nm – 1 pm	$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$
Záření gama	< 300 pm	$> 10^{18}$



Obrázek 1.6: Druhy elektromagnetického záření [23]

Druhy elektromagnetického záření jsou vypsané v tabulce 3.1. Sluneční záření dopadající na zemský povrch se dělí pouze na ultrafialové, viditelné a infračervené spektrum.

1.3.1.1 Ultrafialové záření UV

Ultrafialové záření je vymezeno vlnovými délkami od 390 nm do 10 nm, což znamená, že tento druh záření má kratší vlnovou délku než viditelné spektrum a jeho horní hranice sousedí s fialovou barvou viditelného spektra a spodní hranice sousedí s rentgenovým zářením. UV záření se podle vlnové délky dělí ještě na tři typy a to: UV A, kde jsou vlnové délky v rozmezí od 390 nm do 320 nm; UV B, kde jsou vlnové délky v rozmezí od 320 nm do 280 nm; UV C, kde jsou vlnové délky v rozmezí od 280 nm do 10 nm.

Zdrojem ultrafialového záření jsou tělesa s velmi vysokou teplotou, například Slunce, hvězdy, proces sváření, elektrický oblouk atd. Při dopadu na určitý druh látek se ultrafialové záření mění na viditelné světlo, což je vyvoláno luminiscencí. Ultrafialové záření způsobuje ionizaci vzdušného kyslíku, dále mezi jeho chemické účinky patří zčernání fotocitlivé vrstvy [21, 22].

1.3.1.2 Viditelné světlo

Viditelné světlo je vymezeno vlnovými délkami 760 nm až 390 nm. Lidské oko dokáže vnímat pouze spektrum v tomto rozmezí vlnových délek. Vlastnosti viditelné světla jsou svítivost (amplituda), barva (frekvence) a polarizace (úhel vlnění). Barva světelného spektra je závislá na vlnových délkách: červená 650 nm, oranžová 600 nm, žlutá 580 nm, zelená 525 nm, modrá 450 nm, fialová 400 nm. Uvedené hodnoty jsou střední hodnoty vlnových délek jednotlivých barev spektra.

U slunečního záření je důležitá jeho intenzita, která závisí na pozici Slunce vůči Zemi. Velikost sluneční energie dopadající na zemský povrch se vypočítá ze sluneční konstanty a průměru Země. Sluneční konstanta je celkové množství sluneční energie dopadající za jednotku času [s] na jednotku plochy [m²], která je umístěná kolmo ke směru paprsků ve střední vzdálenosti Země od Slunce. Výkon slunečního záření, které vyzařuje k Zemi, je tedy 172 000 TW. Rozprostření tohoto slunečního výkonu je následující: 31% odraz od horních

vrstev atmosféry, 17,5% pohlceno atmosférou, 32,7% dopadá na oceány, 14,4% je pohlceno souší, 4,3% odraz od souše, 0,1% spotřeba na fotosyntézu. Při využití slunečního záření ve fotovoltaice nás zajímá výkon a záření, který dopadá na zemskou souši [22].

Intenzita slunečního záření dopadajícího na zemský povrch je množství sluneční energie v kWh dopadající na povrch v m^2 . Vliv na intenzitu má zeměpisná šířka, počasí a další okolnosti. Záření můžeme dělit na přímé a difúzní, kde přímé záření není při průchodu atmosférou odraženo ani pohlceno, kdežto difúzní záření se odráží od částic obsažených v atmosféře. Při velké oblačnosti dopadá na zem pouze difúzní záření, proto přes oblačnost není umožněno přímé záření [25].

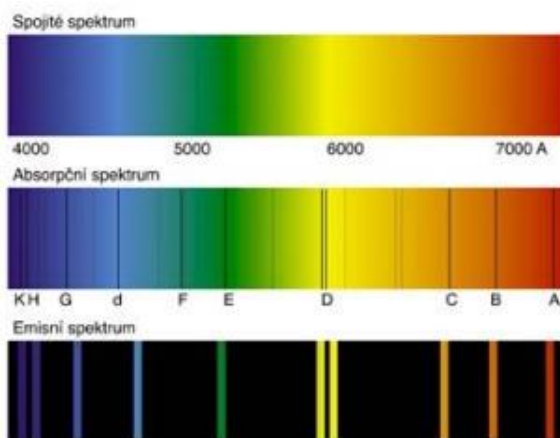
1.3.1.3 Infračervené záření IR

Infračervené záření je vymezeno vlnovými délkami 0,1 mm až 760 nm. Díky infračervenému záření dochází k šíření tepla a zahřívání zemského povrchu. Infračervené záření je způsobeno změnami elektromagnetického pole vyvolanými pohybem molekul, který je způsoben vnitřní energií závisící na teplotě. Zdrojem infračerveného záření jsou tedy tělesa s vysokou teplotou, speciální výbojky nebo diody [21, 22].

1.3.2 Spektra látek

Spektrum, které je vyzařované látkou, se nazývá emisní spektrum. Emisní spektrum se dále dělí podle zobrazení na čárové spektrum a spojité spektrum. Čárové spektrum je tvořeno spektrálními čarami o diskretních vlnových délkách. Zobrazují se jen určité barvy podle vlnové délky. Spojité spektrum vzniká rozkladem vyzařujícího světla rozžhavené pevné látky.

Naopak při pohlcování záření jde o absorpční spektrum, které vzniká procházením složeného světla se spojitém spektrem látkou. Pokud prochází spojité spektrum látkou, která by sama vyzařovala určité vlnové délky, nastane stav, kdy se ze spojitěho spektra pohltí ty vlnové délky, které by daná látka sama vyzařovala. Sluneční spektrum je také absorpční spektrum, protože obsahuje řadu temných čar [22].



Obrázek 1.7: Vyzařované nebo pohlcované spektra látek [22]

1.3.2.1 Absorpční spektroskopie

Absorpční spektroskopie sleduje pohlcování elektromagnetického záření analyzovaným vzorkem. Množství pohlceného světla se vyjadřuje buď absorpční A nebo transmitancí T vztahem, kde transmitance je dána poměrem intenzity záření prošlého vzorkem a intenzity záření vycházejícího ze zdroje. Absorbance je definována jako záporný dekadický logaritmus transmitance [28].

IR spektroskopie

Infračervená spektroskopie je metoda určená pro zjišťování strukturní charakterizace zkoumané látky. Jde o nedestruktivní metodu. Tato technika měří pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem. Principem metody je tedy absorbování infračerveného záření při průchodu vzorkem, při čemž dochází ke změně rotačních či vibračních energetických stavů molekuly a to v závislosti na změnách dipólového momentu. Grafické zobrazení probíhá pomocí funkční závislosti energie vyjádřené buď v procentech transmitance T, nebo v jednotkách absorbance A na vlnové délce dopadajícího záření.

Pro infračervenou spektroskopii se využívá hlavně infračervených spektrometrů s Fourierovou transformací FTIR, které pracují na principu interference spektra. Při Fourierově transformaci se zpracovaný signál prošlý přístrojem převede na absorpční infračervené spektrum. Pomocí této metody se dají měřit i silně absorbující vzorky, které dříve, než se objevila tato metoda, nebylo možné změřit. Dále se dá měřit s nástavci pro analýzu pevných nebo kapalných vzorků v odraženém světle, což je reflektanční infračervená spektroskopie.

FTIR metodou lze měřit vzorky v pevném i kapalném skupenství. Tyto vzorky jsou měřeny v kyvetách určených pro měření vzorků v kapalném skupenství. Dále se u kapalných vzorků, které jsou nerozpustné v klasických rozpouštědlech (CHCl_3 , CCl_4 , CS_2), můžou pro měření využít KBr nebo NaCl okénka. Nejvíce se v poslední době uplatňuje technika zeslabené úplné reflektance ATR. U pevných vzorků je v případě nerozpustnosti v klasických rozpouštědlech možnost připravit tenký film vzorku, který se nechá odpařit a jako okénko se používají například ZnSe, Si nebo AgCl. Vzorky v pevném skupenství se též melou ve vibračním mlýnku s KBr a tento prášek je poté slisován a analyzován. U nujolové techniky je práškový vzorek homogenizován s malým množstvím parafinového oleje a výsledná suspenze je měřena mezi dvěma KBr nebo NaCl okénky v podobě tenké vrstvy. U reflektančních technik lze průhledné tenké filmy, povrchové laky, folie na lesklém kovovém podkladu a rovné tenké výbrusy měřit zrcadlovou odrazností, což se jinak též nazývá zrcadlová reflektance. Pro vzorky s nerovným a nepravidelným povrchem nebo práškové látky se používá difúzní reflektance DRIFT. Na rozdíl od zrcadlové reflektance je zde měřena difúzně rozptýlená složka záření. DRIFT technika spočívá v přenosu vzorku na papírový kotouček, který na povrchu obsahuje práškový karbid křemíku. Vzorek je jednoduše nabroušen na brusnou vrstvu a poté měřen [28].

UV/VIS spektroskopie

UV/VIS spektroskopie studuje elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek 200 až 800 nm. Při absorpci elektromagnetického záření dochází k excitaci valenčních elektronů z vazebných molekulových orbitalů. Látky absorbující záření s vlnovou délkou do 380 nm se projevují jako bezbarvé, kdežto látky absorbující záření s vlnovou délkou nad 380 nm se projevují jako barevné. V ultrafialové oblasti je zdrojem světla vodíková nebo deuteriová výbojka, ve viditelné oblasti je zdrojem lampa se žhnoucím kovovým vláknem.

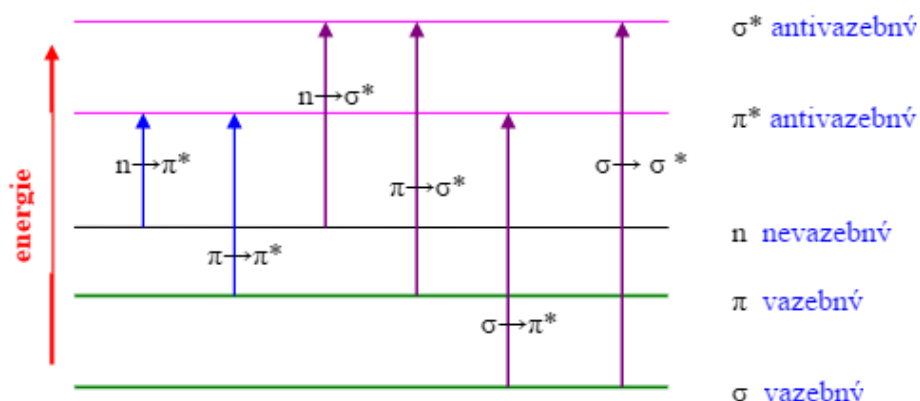
- Elektronová absorpční spektroskopie

Při této metodě se využívá závislosti logaritmu molárního absorpčního koeficientu na vlnové délce. Součtem elektronové, vibrační a rotační energie je dána vnitřní energie molekuly a tyto energie nabývají pouze určitých diskrétních hodnot, které odpovídají hladinám energie. Mezi hladinami jsou různě velké rozdíly. Největší rozdíl je mezi základní a excitovanou elektronovou hladinou, menší rozdíl je mezi sousedními vibračními hladinami a nejmenší rozdíl je mezi energiemi rotačních hladin.

Za běžných podmínek se molekula nachází na základní vibrační hladině a elektrony této molekuly nejsou excitovány. Přijetím energie z absorpce fotonu dojde k přechodu elektronu na excitovanou hladinu a molekula přejde na vibrační a rotační hladinu.

- Elektronové přechody

Existují 4 druhy energetických přechodů elektronů. K prvnímu přechodu dochází ve sloučeninách s násobnou vazbou a v konjugovaných sloučeninách, značí se $\pi \rightarrow \pi^*$. K druhému typu přechodů dochází v nasycených sloučeninách obsahujících heteroatomy O, N, S a halogeny, značí se $n \rightarrow \sigma^*$. Dalším typem přechodu je přechod ve sloučeninách s volným elektronovým párem a π -elektrony, značí se $n \rightarrow \pi^*$. Poslední druh přechodu se vyskytuje ve sloučeninách absorbujících záření o vlnové délce do 200 nm měřitelné ve vakuové oblasti ultrafialové spektroskopie a značí se $\sigma \rightarrow \sigma^*$. [29].



Obrázek 1.8: Energetické přechody elektronů [29]

1.3.2.2 Emisní spektroskopie

Emisní spektroskopie je metoda měřící emisní spektra atomů nebo molekul, díky fotonům vzniklým přechody valenčních elektronů z vyšších energetických stavů na nižší. Počet čar ve spektru roste s počtem elektronů na valenčních hladinách. Zdrojem energie bývá dodání tepla nebo světla jiskrovým výbojem, obloukovým výbojem nebo plazmovým zdrojem, díky čemuž se přemění vzorek do plynného skupenství a nastane excitace elektronu. Poté se měří emitované elektromagnetické záření vzorku. Zdrojem záření je tedy sám vzorek. Elektromagnetické záření se rozloží na spektrální čáry, poloha (frekvence) spektrálních čar určuje chemické složení vzorku a intenzita čar určuje koncentraci látek. Mezi nejpoužívanější emisní spektrální metody patří plamenová fotometrie a fluorescenční spektrofotometrie [30, 31].

1.3.3 Spektrofotometrie

Spektrofotometrie je metoda, jejímž principem je měření intenzity zeslabeného prošlého monochromatického záření na základě absorpce různých vlnových délek světla. Spektrofotometrie je založená na Lambertově – Beerově zákoně.

1.3.3.1 Lambert-Beerův zákon

Vztah mezi tloušťkou absorbující vrstvy a transmitancí je exponenciální, proto se zavedla veličina absorbance A , která je definována jako logaritmus převrácené hodnoty transmitance nebo jako záporný dekadický logaritmus transmitance. Bylo též prokázáno, že absorbance je lineární funkcí koncentrace absorbující látky. Absorbance je tedy přímo úměrná tloušťce absorbující vrstvy a koncentraci absorbující látky. Pro hodnotu absorbance je důležitá vlnová délka použitého světla. Měření koncentrace látky se zpravidla provádí na maximu absorpční křivky. Lambert-Beerův zákon je použitelný na zředěné roztoky při použití přísně monochromatického světla [31].

1.3.3.2 Základní veličiny spektrofotometrie

Absorbance

Absorbance je množství světelného záření, které pohltí vzorek. Průchodem světla látkou dojde k pohlcení a zeslabení záření. U většiny vzorků je absorbance lineární funkcí koncentrace absorbující látky.

Transmitance

Transmitance vyjadřuje procento světla, které prochází vzorkem v poměru k světelnému množství vstupujícímu do vzorku. Množství propuštěného světla vzorkem je vyjádřeno v procentech.

Koncentrace

Koncentrace látky v roztoku se zjišťuje pomocí série roztoků s různými koncentracemi stejné látky. Koncentrace lze zjistit dvěma způsoby a to použitím Lambert-Beerova zákona a kalibrací z roztoku o známé koncentraci.

Reflektance

Reflektance je zpětný odraz záření beze změny vlnové délky. Odraz záření může být zrcadlový, kdy se úhel dopadu rovná úhlu odrazu nebo naopak difuzní, kdy se úhel dopadu nerovná úhlu odrazu. Každý povrch odráží záření oběma způsoby. Množství odraženého záření je vyjádřeno v procentech [37].

Difrakce

Pokud je vzorek umístěn mezi zdroj světelného záření a bílé pozadí, tak se stín za vzorkem rozptýlí z dokonalé ostrosti, která je předpokládána geometrickou optikou, dojde tedy ke změně šíření světla (k ohybu světla). Měření ostrosti stínu ukazuje, že některé světelné paprsky jdou skrz tmavou zónu stínu a iluminovaná zóna se zobrazuje jako tmavé pásy. Rozostřování stínu je také spojeno s rozptýlením světla po průchodu velmi malou štěrbínou, což je Youngův experiment [38, 39].

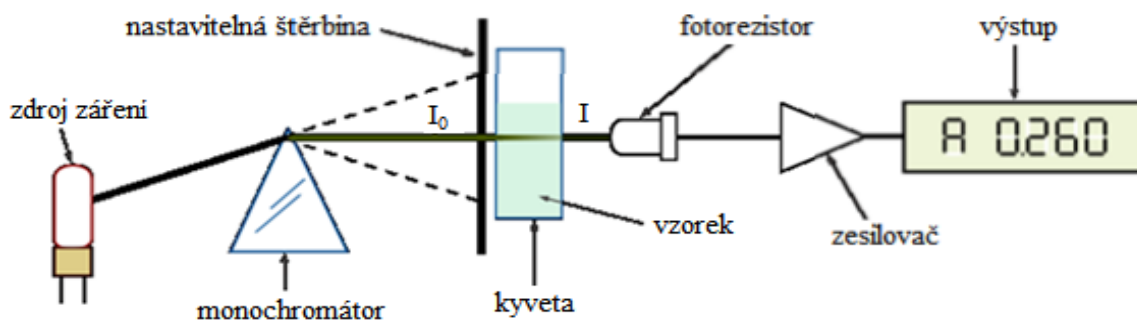
Interference

Teorie interference je založena na principu lineární superpozice elektromagnetického pole, kde působí více světelných zdrojů vlnových délek, které se postupně propouští a následně se skládají dohromady. Toho se docílí zesilováním nebo zeslabováním intenzity světla v různých místech. Zjednodušeně lze říct, že jde o skládání světla. Interference může nastat pouze tehdy, pokud je splněna podmínka koherence. To znamená, že paprsky musí mít stejnou frekvenci, musí být navzájem rovnoběžné a musí mít na sobě nezávislý dráhový rozdíl [38, 39].

1.3.3.3 Spektrofotometr

Spektrofotometr slouží pro měření absorbance, transmitance a dalších veličin. Fotometry jsou zařízení, která pro měření využívají jedné nebo přesně definovaných vlnových délek monochromatického světla. Spektrofotometry jsou technicky lepší přístroje, které používají mřížkový monochromátor, a ten dovoluje měnit vlnovou délku pro měření v širokém intervalu a také měřit část absorpčního spektra v určitém úseku. Spektrofotometry mohou být jednopaprskové nebo dvoupaprskové. Jednopaprskové spektrofotometry měří pouze měřený vzorek, kdežto u dvoupaprskového spektrofotometru se měří zároveň slepý i měřený vzorek ve dvou optických drahách za pomoci dvou detektorů.

Světelný zdroj vysílá svazek světelného záření v omezeném rozsahu vlnových délek. Pomocí filtru je korigován světelných svazek na určité části spektra. Za filtr se umístí květa se vzorkem, jehož vlastnosti detektor zjišťuje pomocí zachyceného či propuštěného světla. Na výstupu detektoru je elektrický signál [37].



Obrázek 1.9: Schematické znázornění spektrofotometru [37]

Zdroj záření

Jako zdroj záření se používá žárovka nebo výbojka. Halogenové a wolframové žárovky lze použít pro měření pouze ve viditelné a infračervené oblasti, poskytují záření spojitého spektra. Pro měření v ultrafialové oblasti se používají vodíkové nebo deuteriové výbojky.

Monochromátor

Světlo vyzářené zdrojem následně prochází monochromátorem, který slouží jako filtr pro světelné spektrum. Vhodný interferenční filtr se zařadí do optické dráhy. Existuje několik druhů filtrů, například filtr s dolní propustí propouští světlo kratších vlnových délek, naopak filtr s horní propustí propouští světlo s delší vlnovou délkou, než je hraniční vlnová délka filtru. Pro propuštění určitého rozsahu vlnových délek se používají pásmové filtry.

Jako monochromátor mohou sloužit optické mřížky nebo hranoly. U optických mřížek dochází k přeměně z polychromatického světla na monochromatické za pomoci ohybu světla. Difrakční mřížka je destička s rovnoběžnými stejně velkými a stejně vzdálenými vrypů. Při dopadu světla na mřížku dochází k difrakci, tedy ohybu světla v místech vrypů, a dojde k interferenci. Z mřížky prochází koherentní paprsky a po vložení čočky do soustavy se zobrazují tenké čáry. Při použití hranolu jako monochromátoru dochází k lomu světla a rozložení na jednotlivé vlnové délky, tedy disperzi. Různé vlnové délky světelného záření se po průchodu hranolem lámou pod různými úhly [31, 37].

Kyveta

Vzorek se umísťuje do kyvety, která zajistí přesnou polohu vzorku pro procházející monochromatický paprsek. Kyveta je ve spektrálním přístroji umístěna mezi monochromátorem a detektorem. Po průchodu monochromatického světla kyvetou se vzorkem se část světla vzorkem pohltí, část světla se odrazí a zbylá část projde vzorkem, která poté dopadne na detektor [31].

Detektor

Na detektor dopadá zbylá část světla, která prochází vzorkem. Díky tomu lze přeměnit energii světelného záření na jiné měřitelné formy za pomoci čidel. Čidlo mění energii světelného záření na elektrickou energii, která vystupuje pomocí elektrického signálu.

Pro měření v infračervené oblasti se používají termické, termoelektrické a pneumatické detektory. Pro měření ve viditelné a ultrafialové oblasti se používají fotoelektrické nebo fotografické detektory, kterými jsou fotonásobiče, polovodičové elektrické články nebo diodová pole [31].

1.4 Elektrochemická impedanční spektroskopie

Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS; Electrochemical Impedance Spectroscopy) je technika pro výzkum objemových a mezifázových elektrických vlastností materiálů v pevném nebo kapalném skupenství spojených s vhodným elektrochemickým převodníkem (elektrodovým podkladem).

1.4.1 Potenciostatická metoda EIS

Potenciostatická impedanční spektroskopie je metoda, při které se na pracovní elektrodu vkládá konstantní potenciál se superponovaným střídavým napětím o určité amplitudě v rozsahu 5 až 10 mV a měří se střídavá složka proudové odezvy. Potenciál je buď zvolen, nebo se měří vlastní potenciál proudově nezátížené elektrody. Frekvence střídavého napětí se mění s časem a pohybuje se v rozmezí od 1 MHz do 0,1 mHz. Obvykle se měří od vyšších frekvencí k nižším. Frekvence se vkládají postupně (Single-sine technika) nebo superpozicí více frekvencí (Multi-sine technika). Při postupném vkládání frekvencí je výhodou vyšší kvalita naměřených dat, ale nevýhodou je pomalá rychlost měření při nízkých frekvencích. Při superpozici více frekvencí je jejich frekvenční rozsah shora omezen 3 kHz až 300 Hz. Pomocí Fourierovy transformace se separují jednotlivé signály. Výhodou je možnost měření i méně stabilních systémů [17, 18, 19].

1.4.2 Galvanostatická metoda EIS

Galvanostatická metoda je obrácený postup potenciostatické metody. Vložením konstantního stejnosměrného proudu se superponovaným střídavým proudem o malé amplitudě lze získat impedanční charakteristiky měřeného systému. Měřenou veličinou je střídavá složka napětí vybuzeného průchodem proudu. Tato metoda je méně častá, než potenciostatická metoda, avšak je vhodnější pro měření s vodivými polymery, které jsou komplexními materiály s měnícími se vlastnostmi v závislosti na vloženém potenciálu.

Obě metody elektrochemické impedanční spektroskopie se používají především ke kvalitativnímu popisu elektrochemického chování systému. Na materiálu je způsobeno jen malé podráždění. Charakteristika děje ani průběh probíhající na elektrodovém systému se nezmění po vložení malé změny potenciálu. Výsledek měření současně popisuje faradaické i nefaradaické děje. Jelikož při této metodě nedochází ke změně potenciálu během měření, lze měřit v roztocích o malé vodivosti, což u stejnosměrných technik nelze z důvodu vzniku problému s kontrolou potenciálu [17, 18, 19].

1.4.2.1 Interpretace a zobrazení dat

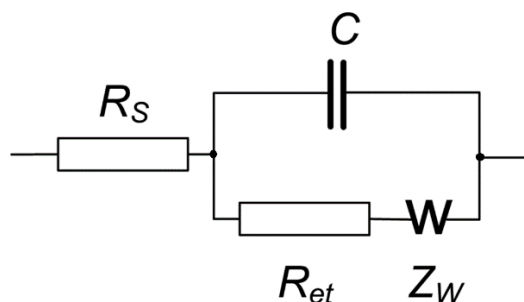
Na elektrodu je vkládáno napětí a následně měřena proudová odezva, je tedy měřen odpor systému, což se kvůli střídavému vkládanému napětí nazývá impedance. Impedance se vyjadřuje pomocí komplexních čísel, má reálnou a imaginární složku.

Při interpretaci naměřeného spektra se postupuje tak, že se hledá ekvivalentní obvod popisující chování systému a naměřená data jsou proložena křivkou popsanou rovnicí odpovídající uvedenému modelu. Výsledný obvod by měl mít co nejmenší počet elektrických prvků, které nahrazují skutečný děj probíhající na fázovém rozhraní elektroda-elektrolyt.

Ekvivalentní obvod se skládá ze sériově a paralelně řazených elektrických prvků, které se ztotožňují s reálnými prvky. Jedná se o rezistor, kondenzátor a cívku, kde fyzikální interpretací rezistoru je odpor roztoku označený R_s nebo odpor k přenosu náboje R_{ct} a kondenzátor představuje kapacitu elektrické dvojvrstvy C_{dl} . Interpretace indukčnosti je nejednoznačná, objevuje se zřídka.

Imaginární část představuje elektrochemie, elektrochemie specifických prvků je například Warburgova impedance, Gerisherova impedance, člen konstantního fázového posunu CPE, tangentský člen (Finite Warburg) atd. Fyzikální interpretace těchto prvků vychází z řešení Fickových zákonů pro konkrétní geometrii povrchu, z kinetických rovnic popisující elektrochemické reakce na fázovém rozhraní a z termodynamických heterogenních rovnováh.

Jednotlivé prvky ekvivalentního obvodu popisují celkové chování systému a ovlivňují průběh měřeného proudu (potenciostatické EIS) nebo napětí (galvanostatické EIS). Impedance rezistoru se s frekvencí nemění, fázový posun napětí a proudu je nulový, naopak kapacitance kondenzátoru je na frekvenci závislá a fázový posun napětí a proudu je 90° . Na základě pravidel pro sériovou a paralelní kombinaci impedancí lze získat matematický popis chování systému. Výsledkem je tedy ekvivalentní obvod včetně parametrů (odpor roztoku, kapacita dvojvrstvy). Nejjednodušším ekvivalentním obvodem je Randlesova cela s paralelní kombinací kondenzátoru a odporu. Při vysokých frekvencích se kondenzátor chová jako vodič, celková impedance je tedy dána odporem R_s . Při nízkých frekvencích se kondenzátor chová jako izolant, celková impedance je dána součtem odporu R_s a R_{ct} [17, 18, 19].



Obrázek 1.10: Schematické znázornění elektrického obvodu pro Randlesovu celu [15]

1.4.2.2 Matematický popis jednotlivých prvků ekvivalentního obvodu (1.2)-(1.8)

$$\text{Odpor } R \quad Z_R = R \quad (1.2)$$

$$\text{Kapacitance } C \quad Z_c = -\frac{j}{\omega C} \quad (1.3)$$

$$\text{Induktance } L \quad Z_L = j\omega L \quad (1.4)$$

$$\text{Konstantní fázový posun} \quad Z_Q = \frac{1}{Y_0} \quad (1.5)$$

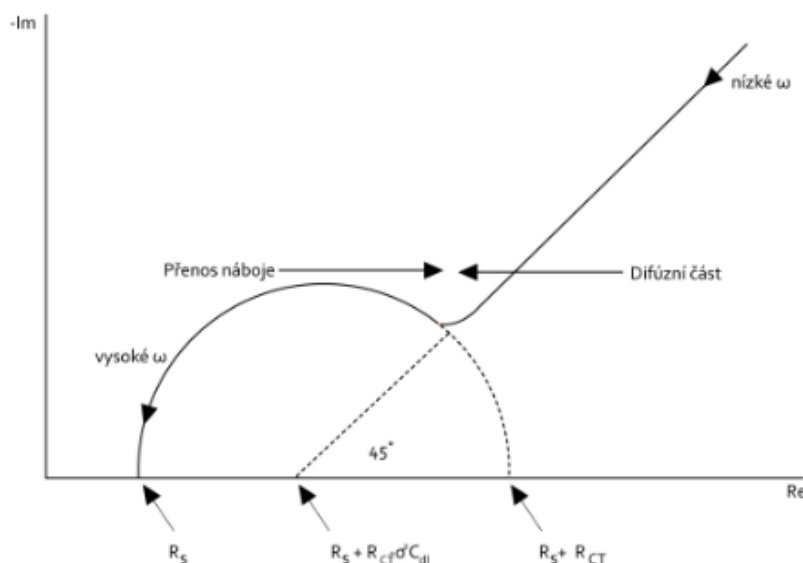
$$\text{Warburgova impedance} \quad Z_W = \frac{1}{Y_0 \sqrt{j\omega}} \quad (1.6)$$

$$\text{Tangenciální člen} \quad Z_O = \frac{\tanh(B\sqrt{j\omega})}{Y_0 \sqrt{j\omega}} \quad (1.7)$$

$$\text{Gerisherova impedance} \quad Z_G = \frac{1}{Y_0 \sqrt{k_a + j\omega}} \quad (1.8)$$

Impedance Z se získá vydělením vkládaného napětí vzorkovaným proudem nebo vydělením vzorkovaného napětí vkládaným proudem při galvanostatické elektrochemické impedanční spektroskopii. Impedanci Z lze přepočítat na fázový posun $\tan\theta = \text{Im}/\text{Re}$ a absolutní hodnotu impedance $|Z| = \sqrt{(\text{Re})^2 + (\text{Im})^2}$, kde Re je reálná část impedance a Im je imaginární část.

Pro komplementární zobrazení se používají grafy Nyquistův a Bodeův. U Nyquistova grafu vynášíme imaginární složku v závislosti na reálné složce, v grafu není obsažena nezávislá proměnná frekvence. U Bodeova grafu se nanáší absolutní hodnota impedance v závislosti na frekvenci, která je v logaritmickém měřítku nebo se vynáší fázový posun v závislosti na frekvenci. V Nyquistově grafu se pro Randlesovu celou projeví změna vodivosti roztoku R_s pouze posunem kruhu po ose x . Odpor k přenosu náboje R_{ct} mění velikost půlkruhu. Změna kapacity C_{dl} se projeví změnou rozložení bodů na půlkruhu v grafu. Při příliš velké kapacitě chybí druhá půlka půlkruhu, naopak při příliš malé kapacitě chybí první část půlkruhu [17, 18, 19].



Obrázek 1.11: Nyquistův graf zobrazující imaginární část impedance v závislosti na reálné části impedance [18]

1.5 CIMPS – Controlled Intensity Modulated Photo Spectroscopy

CIMPS je přístroj, který slouží k charakterizaci optických a energetických vlastností fotovoltaických článků, ale také slouží ke zjišťování vlastností různých jiných materiálů. Velkou výhodou tohoto přístroje je schopnost změřit závislost optické impedance nebo fotoproudu na vlnové délce světelného spektra. Přístroj dokáže nasimulovat jakékoli jednotlivé spektrum na vstupu a poté změřit výslednou hodnotu proměřovaného materiálu nebo je možno nasimulovat sjednocené celkové spektrum slunečního záření. Pro simulaci spektra se využívá vysokovýkonná bílá LED dioda, dále se dá využít 50-ti monochromatických světelných zdrojů (od ultrafialového záření až po infračervené záření). Intenzita záření je kontrolována a ovládána pomocí obvodu se zpětnou vazbou, kde se nachází kalibrovaný senzor. Simulace intenzity záření je docílena potenciostatickým uzavřeným zpětným obvodem v kombinaci se speciálním citlivým zesilovačem. Automatický bezpečnostní okruh chrání LED diody před nadměrným proudem v případě odpojení obvodu se zpětnou vazbou a senzorem. Software CIMPS podporuje kromě přímého vstupu intenzity záření taky reálné monitorování aktuálních hodnot. Přístroj CIMPS je oproti ostatním přístrojům založených na generaci fotoproudu pomocí LED diod mnohem spolehlivější [13].

1.5.1 Software

Součástí standartního vybavení přístroje CIMPS je Thales Software Package, který poskytuje velké množství měřících a analytických metod. Nejvýznamnějším příkladem je SCRIPT a SIM. SCRIPT nabízí kombinaci elektrochemických měření, matematických analýz, algoritmy, dokumentaci a automatický export dat. SIM umožňuje vytvořit ekvivalentní obvod a sloučit data s tímto modelem. ZHIT pomáhá SIM vytvořit impedance spektrum [40].

1.5.2 Základní funkce a měřicí metody CIMPS

1.5.2.1 Standardní testy fotovoltaických článků

- Maximální výkon
- Fill factor
- Účinnost
- IPCE [41]

Mezi standardní testování fotovoltaických článků patří měření Voltampérové charakteristiky, která udává hlavně velikost závislosti proudu na napětí článku. Pomocí této metody lze zjistit mnoho veličin.

Proud nakrátko je získán při nulovém napětí a je ve své fyzikální podstatě roven maximálnímu proudu generovaném na článku. Velikost maximálního proudu je závislá na intenzitě osvětlení, spektrální citlivosti, ozářené ploše a teplotě. Maximální hodnota proudu na krátko je přibližně 3,5 A, pohybuje se však v rozmezí mA až A.

Napětí naprázdno se získává při nulovém proudu a je zároveň i maximálním napětím, které lze na článku při daném ozáření dosáhnout bez připojené zátěže. U článků z monokrystalické křemíku se napětí naprázdno pohybuje okolo 0,6 V.

Bod voltampérové charakteristiky s maximálním výkonem se značí MPP podle anglického názvu Maximum Power Point. Tento bod se udává pomocí napěťové a proudové souřadnice s indexem m .

Maximální výkon se nachází přibližně uprostřed ohybu voltampérové charakteristiky, jde o maximální výkon, který může článek dodávat. Hodnota maximálního výkonu je dána vztahem (1.9):

$$P_m = U_m \cdot I_m \quad (1.9)$$

kde U_m je maximální napětí na článku a I_m maximální proud procházející článkem.

Faktor plnění neboli Fill factor FF udává poměr mezi maximálním výkonem a výkonem daným napětím naprázdno a proudem nakrátko. Faktorem plnění se dá zjistit kvalita fotovoltaického článku. Vždy dosahuje hodnotu menší než 1, obvyklá hodnota tohoto parametru na článku je 0,7 až 0,85. Faktor plnění je vyjádřen vztahem (1.10):

$$FF = \frac{P_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.10)$$

kde P_m je maximální výkon daný součinem maximálního napětí U_m a maximálního proudu I_m , U_{oc} je napětí naprázdno a I_{sc} proud nakrátko.

Účinnost fotovoltaického článku η vyjadřuje, kolik procent slunečního záření dopadajícího na článek se přemění na elektrickou energii. Účinnost je ovlivňována vlastnostmi materiálu, konkrétně jejím rozložením spektrální citlivosti na dopadající záření. To znamená, že článek využívá různých vlnových délek s různou účinností. Účinnost fotovoltaického článku je dána vztahem (1.11):

$$\eta = \frac{P_m}{P_{rad}} = \frac{P_m}{E \cdot A_c} \quad (1.11)$$

kde P_m je maximální výkon, P_{rad} je výkon dopadajícího záření, A_c je plocha článku v m^2 a E je intenzita záření [42].

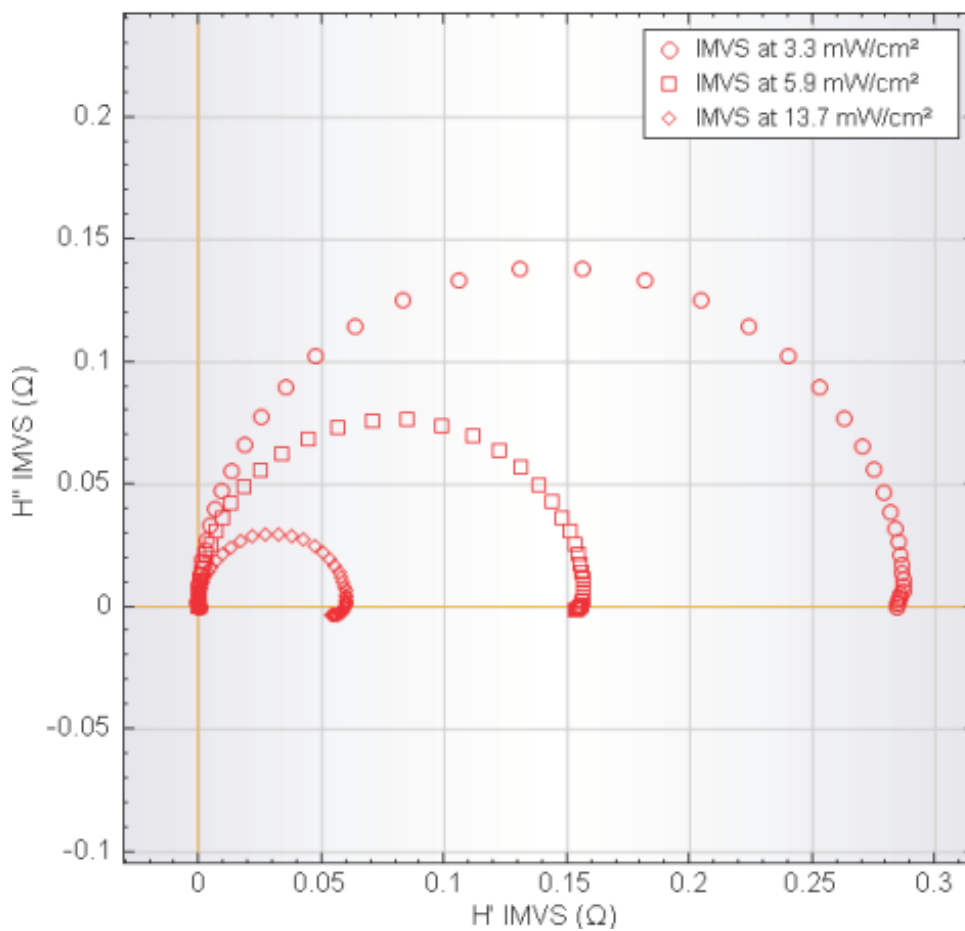
1.5.2.2 Dynamické fotoelektrické přechodné funkce

- Dynamické měření napětí v závislosti na frekvenci IMVS
- Dynamické měření proudu v závislosti na frekvenci IMPS [41]

Pro charakterizaci fotovoltaických článků a vlastností se může použít metoda, která je založená na modulaci intenzity záření. Odezva článku je měřena v podobě napětí nebo proudu a přitom záleží na podmínkách IMVS (Intensity modulated photovoltage spectroscopy), což znamená měření přechodné funkce mezi modulovanou intenzitou záření a generovaným střídavým napětím a IMPS (Intensity modulated photocurrent spectroscopy), což naopak znamená měření přechodné funkce mezi modulovanou intenzitou záření a generovaným střídavým proudem.

IMVS měření

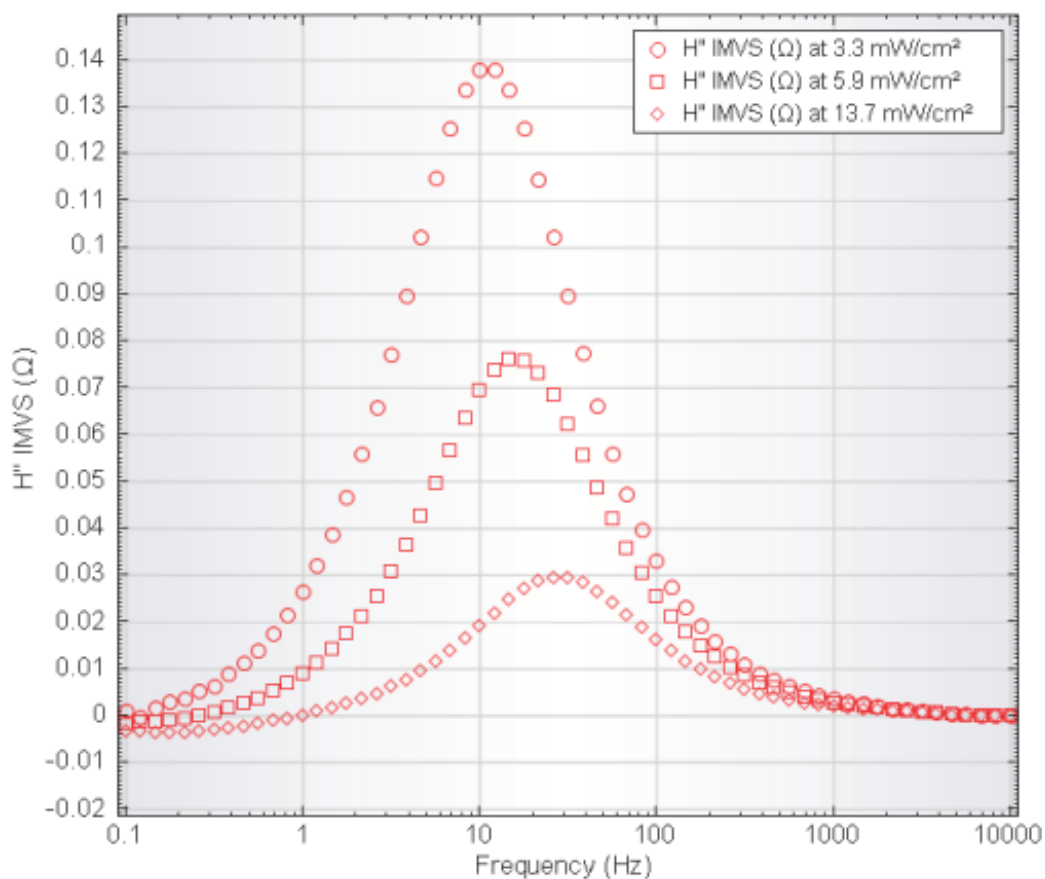
Měření napětí pomocí modulované intenzity záření poskytuje doplňkové informace o článku jako například doba života elektronů a děr a jejich rekombinace. IMVS data odpovídají hodnotám přechodné funkce mezi modulovanou intenzitou záření a měřeným střídavým napětím na článku. Pro výpočet přechodné funkce je třeba znát veličiny jako změna napětí na článku, změna toku fotonů a fázový úhel. Na obrázku 5.2 jsou znázorněna data imaginární složky přechodné funkce v závislosti na reálné části přechodné funkce při různé intenzitě záření a stejné vlnové délce osvětlení [43].



Obrázek 1.12: IMVS měření při konstantní vlnové délce 627 nm a třech různých intenzitách záření [43]

Při zvětšující se intenzitě záření dochází ke zmenšování výsledného půlkruhu v grafu. Frekvence odpovídající minimu se v komplexní rovině zvyšuje se zvětšující se intenzitou záření, což znamená, že se zmenšuje délka života elektronů. Z toho důvodu je elektronová rekombinace výraznější při vysoké intenzitě záření.

Stejný závěr může být také odvozen znázorněním závislosti imaginární složky na frekvenci. Zvyšování intenzity záření vede ke zvyšování frekvence elektronové rekombinace, což vede k poklesu délky života elektronů [43].



Obrázek 1.13: Znárodnění IMVS měření imaginární složky v závislosti na frekvenci [43]

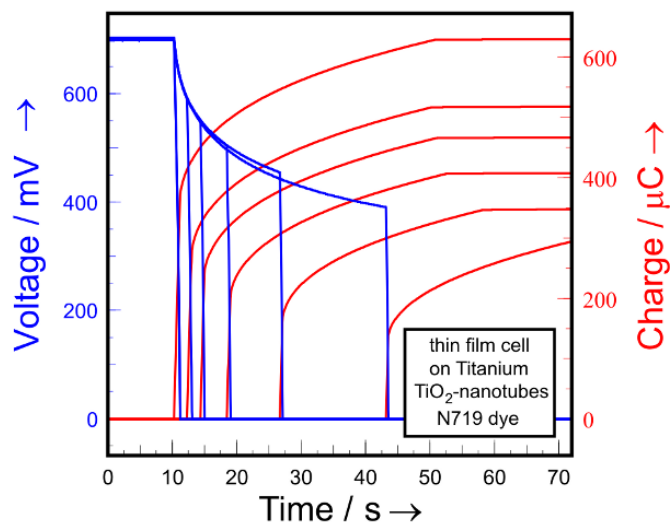
IMPS měření

Měření proudu, který je modulovaný intenzitou záření, poskytuje dodatečné informace o délce života elektronů a rekombinaci elektron-díra. IMPS data odpovídají hodnotám přechodné funkce mezi modulovanou intenzitou záření a měřeným proudem na článku. Pro výpočet přechodné funkce jsou potřeba veličiny jako změna proudu na článku, změna toku fotonů a fázový úhel.

IMPS data jsou podobná jako u měření IMVS. Ve vysokých frekvencích se modulovaný proud přibližuje nule, což značí, že modulovaná frekvence je rychlejší než relaxace hustoty nosičů náboje. Zobrazení měření je podobné jako u IMVS měření [43].

1.5.2.3 Extrakce náboje (Charge Extraction)

Tato metoda studuje přenos, zachycení a zpětnou reakci elektronů. Článek je osvětlen do té doby, dokud se neustálí požadovaný stav, ve kterém jsou frekvence fotogenerace a zpětné reakce elektronů vyrovnané. Poté je osvětlení přerušeno a elektronové hustotě je umožněn rozklad po dobu zatmění. Časová prodleva mezi přerušením osvětlení a vyextrahováním zkratového náboje se systematicky mění, aby sledovala úbytek koncentrace elektronů. Analýza časové závislosti elektronového náboje ukazuje, že zpětná reakce elektronů je sekundárním dějem v elektronové hustotě. Současné měření náboje a napětí ukazuje, že hustota zachycených stavů exponenciálně klesá s hloubkou [45].



Obrázek 1.14: Graf znázorňující závislost napětí a náboje na čase[41]

1.5.2.4 Voltametrie s přerušovaným vyzařováním světla CLV

Metoda CLV je často používaná technika pro získání prvních charakteristik fotoelektrické odezvy neznámého netestovaného systému. Tato metoda poskytuje voltampérovou charakteristiku průběhu, kdy dochází k periodickému vypínání a zapínání světelného zdroje. DC charakteristika se překrývá s periodicky se měnícím fotoproudem. CLV metoda pomáhá zjišťovat potenciální citlivý rozsah a odhadnout podobnou fotoelektrickou odezvu srovnatelnou se stejnosměrným proudem.

Z chování znamének proudu po osvětlení lze fotoelektrický proces shrnout tak, že polovodič typu N způsobuje anodový tok elektrického proudu a polovodič typu P způsobuje katodový tok elektrického proudu. Vedení elektrického proudu může být identifikováno, pokud se změní znaménko fotoproudu i přesto, že protéká stejnosměrný proud [47].

1.5.2.5 Statické fotoelektrické přechodné funkce

- Statické měření napětí v závislosti na intenzitě záření

Tato metoda umožňuje změřit generované napětí na článku při různé intenzitě záření, kterou je článek ozařován postupně.

- Statické měření proudu v závislosti na intenzitě záření

Metoda měření proudu v závislosti na intenzitě záření zjišťuje proudovou odezvu článku při postupném ozařování zvyšující se intenzitou záření. Pokud je v program nastavena a zapnuta intenzita záření dříve než nastavení rozmezí proměřované intenzity, tak program bere přednastavenou intenzitu jako výchozí a proto je při měření do této intenzity proud v záporných hodnotách (proud je odebírán) a až poté se generuje.

- Statické měření proudu v závislosti na napětí článku při konstantní intenzitě záření

1.5.2.6 Měření v závislosti na čase

- Měření napětí v závislosti na čase při konstantní intenzitě záření
- Měření proudu v závislosti na čase při konstantní intenzitě záření [41]

2 Experimentální část

V experimentální části je popsán přístroj a jeho zapojení, proměřované vzorky fotovoltaických článků, postup a nastavení měření a výsledky s vyhodnocením.

2.1 Popis vzorků

K měření a hodnocení přístroje a vzorků se použily vzorky z monokrystalického a polykrystalického křemíku a organické články. V následujícím textu budou vzorky uvedeny pod názvy:

- Vzorek 1 – testovací článek z monokrystalického křemíku
- Vzorek 2 – článek z monokrystalického křemíku ve tvaru obdélníku
- Vzorek 3 – článek z monokrystalického křemíku ve tvaru trojúhelníku
- Vzorek 4 – článek z organického materiálu 1
- Vzorek 5 – článek z organického materiálu 2
- Vzorek 6 – článek z polykrystalického křemíku

2.1.1 Vzorek 1

Testovací článek z monokrystalického křemíku byl dodán jako příslušenství s přístrojem CIMPS. Jeho rozměry jsou 20 mm x 20 mm, článek je připevněn a připájen k desce plošných spojů (DPS), která je z druhé strany speciálně upravená pro jiné měření. Po upevnění desky s článkem do držáku optické lavice se zapojí referenční, testovací a pomocná elektroda, které jsou napojeny na hlavní potenciostat.



Obrázek 2.1: Testovací článek (vlevo zepředu, vpravo zezadu)

2.1.2 Vzorek 2

Vzorek z monokrystalického křemíku ve tvaru obdélníku byl pořízen z laboratoře pro MOZE a MAZE předměty na FEKTu. Jde o úlomek s rozměry 27 mm x 46 mm. Tvar se již nijak neupravoval, jedním rozměrem téměř odpovídá rozměrům testovacího článku, druhým rozměrem přesahuje. Bylo však potřeba vyrobit upevnění a vymyslet nakontaktování. To bylo provedeno pomocí dvou desek pro výrobu plošných spojů, v jejichž měděných vrstvách byl vyleptán jednoduchý motiv tak, aby při vložení článku o rozměrech zhruba 20 mm x 20 mm

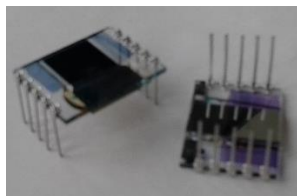
mezi desky docházelo ke kontaktu na jedné i druhé desce. Do přední desky byl vyříznut otvor o rozměrech 20 mm x 20 mm, aby byla osvětlena světelným zdrojem pouze tato část článku. Postup výroby těchto desek je popsán v odstavci 2.2.

2.1.3 Vzorek 3

Tento vzorek byl obdržen od pana doc. Vaňka, pravděpodobně též z laboratoře MOZE, MAZE. Elektrické vlastnosti vzorku byly panem docentem Vaňkem proměřeny a vzorek by měl být v pořádku. Je to úlomek článku z monokrystalického křemíku nepravidelného tvaru, nejbližší vystihující trojúhelník. Jeho rozměry jsou 100 mm x 100 mm x 150 mm. Pro tento vzorek lze též použít uchycení v přípravku vyrobeném pro ploché křemíkové články ze dvou desek s vrstvou mědi na povrchu.

2.1.4 Vzorek 4 a 5

Články z organického materiálu byly obdrženy z Centra pro výzkum materiálů VUT od paní Ing. Honové. Vzorek 4 má rozměr 8 mm x 9 mm a vzorek 5 má rozměr 9 mm x 9 mm. Oba vzorky jsou zality v epoxidu a pevně umístěny mezi skleněnými destičkami. Kontakty jsou provedeny pomocí vývodů podobně jako u integrovaných obvodů typu DIP (dual in-line package). Materiál vzorků 4 a 5 není znám. Mohou to být buď inverzní, nebo klasické organické články. V případě inverzních vzorků by složení od spodu mělo být: sklo -> ITO -> ZnO -> organická vrstva -> MoO₃ -> Al -> epoxidový polymer -> krycí sklo. V případě klasických struktur je složení vzorku od spodu následující: sklo -> ITO -> PEDOT-PSS/MoO₃ -> organická vrstva -> Al -> epoxidový polymer -> krycí sklo. Organická vrstva je tvořena akceptorním materiálem PC60BM, pokud je donorem derivát diketopyrrolopyrrolu (např. DPP(TBFu₂)), tak je vzorek ve spektru modré, zelené nebo fialové barvy, pokud je donorem P3HT, tak je vzorek hnědofialové barvy. Pro měření bylo potřeba vymyslet a vyrobit uchycení pro organické články umístěné ve skle s trčícími vývody. Zatímco rozteč vývodu na jedné straně je stejná jako u integrovaných obvodů (0,1 palce, 2,54 mm), vzdálenost protilehlých stran je nestandardní, 18 mm. Za pomoci odborníků byla navržena deska plošných spojů tak, aby na ni bylo možno umístit dvě patice s nulovou silou zasunutí s patřičnou roztečí. Deska s paticemi byla umístěna v držáku optické lavice tak, aby články byly vhodně vystaveny záření ze světelného zdroje.



Obrázek 2.2: Organické články

2.1.5 Vzorek 6

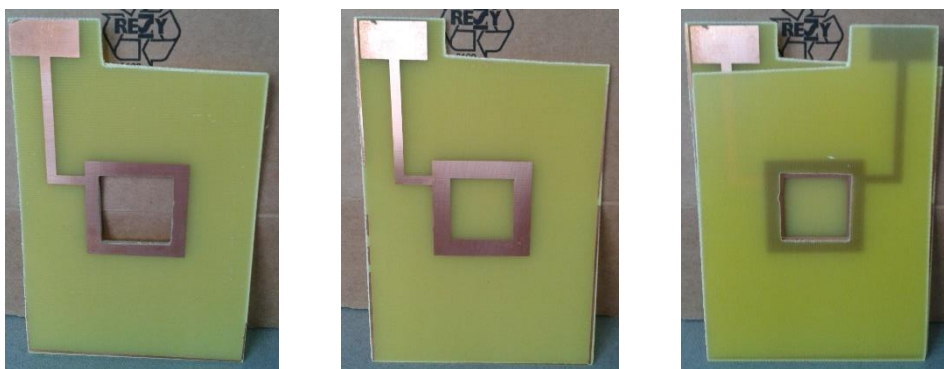
Nalámané články z polykrystalického křemíku byly pořízeny přes internet. Jde o kousky s různými rozměry, jeden z nich byl nalámán a použit pro měření, zbylé úlomky budou k dispozici na fakultě. Rozměry vzorku 6 jsou 30 mm x 30 mm, tvar byl nalámán tak,

aby se co nejvíce podobal čtverci rozměrově 20 mm x 20 mm. Články vypadají být staršího typu a ne příliš kvalitně zpracované, sběrnice je pravděpodobně z hliníku a je v podobě tenkého plechu připevněná k povrchu článku. Pro uchycení byly použity ty samé dvě desky s měděným pokovením jako u vzorků 2 a 3 z monokrystalického křemíku.

2.2 Příprava vzorků k měření

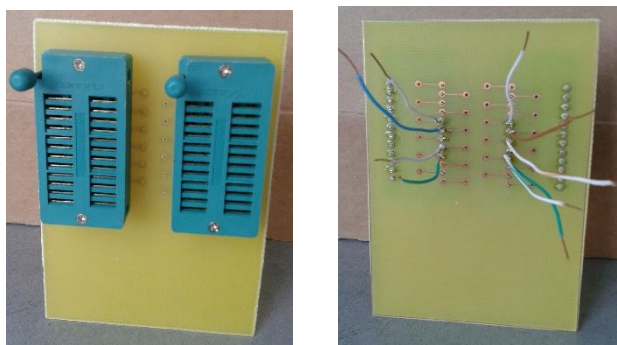
Pro některé vzorky bylo potřeba navrhnout a vyrobit uchycení s kontakty. To bylo provedeno pomocí desky plošných spojů. U vzorků 2, 3 a 6 se používá tentýž způsob uchycení, což jsou dvě desky s měděným pokovením, kde byl vyleptán potřebný motiv. Zbytek měděné vrstvy na desce okolo vodivých cest byl odleptán proto, aby nedocházelo po vložení článku mezi pokovené desky s vrstvou mědi ke kontaktu i mezi samotnými deskami a nedocházelo tak ke zkratu. Pro vzorky 4 a 5 bylo potřeba do desky zakomponovat dvě patice s nulovou silou TEXTOOL 24. Pro výrobu desek byl použit materiál FR4 pokovený mědí z jedné strany. Postup pro výrobu desek v obou případech je stejný a skládá se z následujících kroků:

- 1) Návrh potřebného motivu
- 2) Tisk na transparentní folii – negativ (osvíceno to, co zůstalo na fólii)
- 3) Laminace fotorezistem DPS
- 4) Expozice fotorezistu přes folii s motivem světlem
- 5) Vyvolání – roztok uhličitanu sodného (odstraní se neexponovaný fotorezist, zůstane odkrytá měď)
- 6) Leptání mědi – peroxid vodíku + kyselina chlorovodíková + voda
- 7) Odstranění fotorezistu z neodleptané mědi – 1% hydroxid sodný + voda
- 8) Vyvrtání děr pro uchycení patic s nulovou silou
- 9) Pájení kontaktů



Obrázek 2.3: Desky plošných spojů pro kontaktování a uchycení článků (vlevo přední část s otvorem, uprostřed zadní část, vpravo spojené desky)

Zkušební patice s nulovou silou TEXTOOL 24 s aretační páčkou a 24 kontakty použité pro vzorky 4 a 5 mají rozteč 2,54 mm, jmenovitý proud 1A a pracovní napětí 500 V. Deska byla navržena tak, aby se na ní vešly dvě patice vedle sebe, do kterých se vloží organický článek. Ke kontaktům patice byly z druhé strany připájeny cínovou pájkou drátky pro uchycení krokodýlků, které byly připojeny na elektrody.



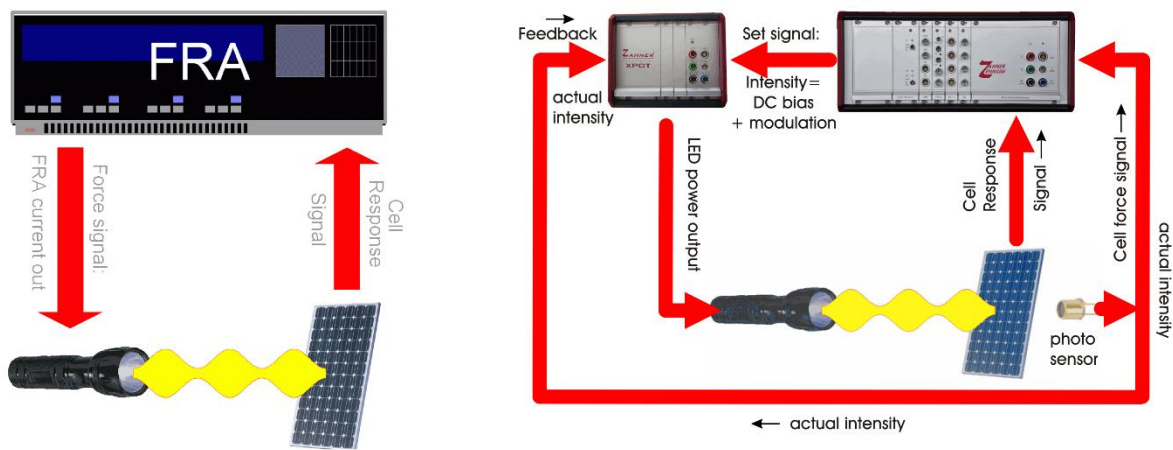
Obrázek 2.4: Desky plošných spojů s patičkami s nulovou silou pro uchycení a měření organických článků (vlevo přední strana, vpravo zadní strana)

2.3 Popis přístroje CIMPS

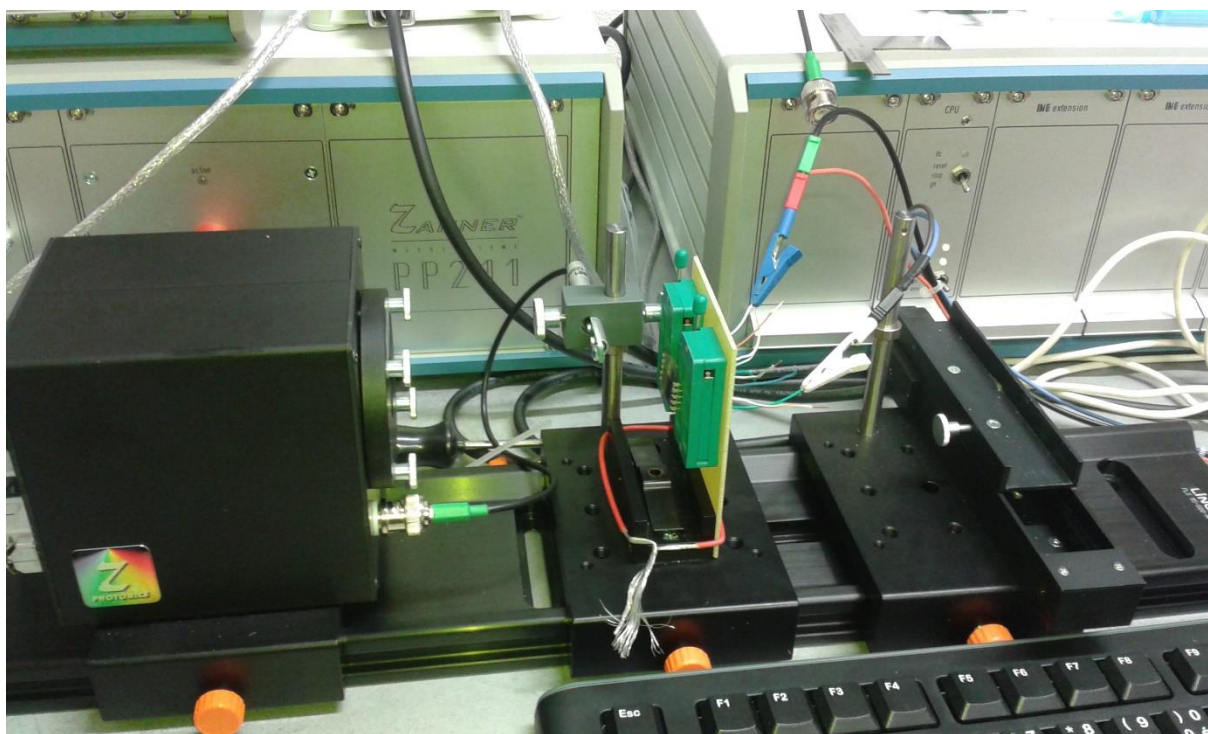
Přístroj CIMPS slouží k foto-elektrochemickému výzkumu různých materiálů. Je založen na elektrochemickém přístroji Zennium nebo IM6 a rozšířen o speciální hardware a software. Základní konfigurace byla navržena s důrazem na statické a dynamické foto-elektrochemické přechodné funkce měření, což je významné u měření fotovoltaických článků. Zvláště dynamické přechodné funkce mezi fotonapětím (metoda IMVS) nebo fotoproudem (metoda IMPS) a intenzitou světla jsou důležité pro zjišťování účinnosti barvocitlivých článků a organických článků.

2.3.1 Zapojení

Měření diplomové práce probíhalo na přístroji CIMPS od německé firmy Zahner. Schéma zapojení přístroje CIMPS je zobrazeno na obrázku 2.5 vpravo, vlevo je zobrazeno klasické schéma zapojení. V této diplomové práci bude popsána část přístroje, která se zabývá měřením fotovoltaických článků. Přístroj je vybaven velkým množstvím příslušenství pro měření dalších vlastností jiných materiálů. Část přístroje CIMPS pro měření fotovoltaických článků se skládá ze světelného zdroje napojeného na potenciostat, pomocí kterého je možné modulovat záření a ovládat tento světelný zdroj. Dále se přístroj skládá z uchycení pro fotovoltaické články se senzorem intenzity záření. Fotovoltaický článek je připojen k hlavnímu potenciostatu, který vkládá na článek střídavé napětí nebo střídavý proud a měří impedanci článku. Na článek se připojují tři elektrody – referenční, testovací a pomocná, význam však má pouze zapojení referenční a testovací elektrody. Z pravidla se vždy zapojuje referenční elektroda jako první a odpojuje se jako poslední z toho důvodu, na elektrodě musí být vždy nějaké napětí. Pokud se připojí dřív testovací elektroda a na referenční elektrodě není žádné napětí, tak se nulové napětí na referenční elektrodě snaží testovací elektroda dorovnat maximálním možným dovoleným napětím. Držák optické lavice na fotovoltaický článek a zdroj světelného záření jsou umístěny na optické lavici, ke které se pevně přišroubují.



Obrázek 2.5: Tradiční uspořádání měřících přístrojů jako je IMPS (nalevo), schéma uspořádání přístroje CIMPS (napravo) [41]



Obrázek 2.6: Zapojení světelného zdroje, článku a potenciostatu

2.3.2 Světelné zdroje

Pro měření vlastností fotovoltaických článků byly využity tři druhy světelných zdrojů. Nejvíce byl používán zdroj značený WLR02 s/n LS 1367 pro měření voltampérové charakteristiky, dynamických metod, statických metod a metodu extrakce náboje. Zdroj obsahuje širokopásmovou bílou LED diodu. Je možné osvětlení okamžitě přerušit nebo využít postupného snižování frekvence záření na článek a zjistit proudovou účinnost. Na zdroji je možné nastavit intenzitu záření v rozmezí 0 W/m^2 až 420 W/m^2 a též změřit proudovou odezvu při rostoucí intenzitě záření. Ke zdroji patří senzor se zpětnou vazbou pro regulaci intenzity záření a chránění přístroje před vysokým proudem. Senzor se značí zkratkou

S01 s/n 12505. Další použitý zdroj obsahuje wolframovou žárovku a značí se WOW01 s/n LS 1368. S tímto zdrojem byla měřena pouze voltampérová charakteristika, protože zdroj není laditelný, nedá se nastavit frekvence, ani postupné zvyšování intenzity záření. Na druhou stranu lze na zdroji nastavit intenzitu záření až 5200 W/m^2 . K wolframovému zdroji patří senzor se značením S02 s/n 12505. Vlnová délka zdroje s bílou LED diodou a wolframovou žárovkou není stejná. Pokud by nebyl senzor připojen, program nahlásí chybu. Třetí světelný zdroj, který byl použit, obsahuje monochromatické diody, díky kterým je možné proměřit spektrum od ultrafialové oblasti až do infračervené oblasti, konkrétně v rozmezí 290 nm až 1090 nm. Zdroj se značí TLS03 1366. U tohoto zdroje není senzor, vzorek se přiblíží do minimální vzdálenosti od zdroje světelného paprsku.

Při výměně světelných zdrojů je u prvního a druhého zmiňované zdroje nutná kalibrace, která se provede následovně. V hlavním menu se klikne na ikonu *CALIBRATE* -> vyskočí okno s různými možnostmi, kde zvolíme *open lightsource data* -> dohledáme složky *THALES* -> *cimps* -> podle čísel na zdroji se vybere příslušný soubor. Další automatická kalibrace je možná přímo v nastavení *SOURCE CONTROL* -> *CALIBRATE*.

2.4 Příprava přístroje a postup nastavení

Před měřením bylo potřeba přístroj sestavit a zkalibrovat, což provedli pan prof. Vanýsek a pan doc. Novák. Pro správné zapojení a umístění světelného zdroje a fotovoltaického článku do správné vzdálenosti slouží speciální pravítko, které dává určuje výšku senzoru a jeho vzdálenost od fotovoltaického článku atd. K hlavnímu potenciostatu se zapojí fotovoltaický článek, k potenciostatu ovládající světelný zdroj se připojí světelný zdroj a senzor pro zpětnou vazbu se připojí též na světelný zdroj. Před použitím je potřeba zapnout potenciostat pro ovládání světelného zdroje se značením PP211 a hlavní potenciostat pro ovládání impedančního měření atd. se značením IM6 (Impedance Measurement Unit).



Obrázek 2.7: Měřítka pro určení vzdálenosti světelného zdroje a měřeného vzorku

Pro spuštění programu pro měření pomocí optických metod v této práci se postupovalo následovně. Soubor na ploše *THALES USB* -> *Start* -> ikonka vlevo nahoře [*Z*] -> *Optional Methods* -> *Photo-Electrochemical Tests* -> *Controlled IMPS/IMVS*, kde se zobrazí hlavní menu s průběžnou hodnotou napětí a proudu na článku.

2.5 Výsledky jednotlivých metod měření

V této kapitole je nejprve u každé metody popsán postup nastavení pro měření, dále jsou zobrazeny naměřené grafy a následně vyhodnoceny a okomentovány naměřené hodnoty. Popis metod je vypracován v teoretické části práce.

2.5.1 Voltampérová charakteristika

Pro měření voltampérové charakteristiky se přístroj nastavuje následovně. V hlavním menu po spuštění programu se jako první nastaví intenzita záření v kolonce *Actual Average Intensity* -> pro spuštění měření též v hlavním menu *Start Max. P & FF* -> z měření se zobrazí graf, kde jsou napsány i údaje U_{\max} , I_{\max} , P_{\max} , FF, použitý zdroj, intenzita záření, jakou byl článek osvětlen atd. -> pro uložení grafu byl použit způsob přes *Export Graphics* -> ve formátu *save as EMF file* -> uložení do vybrané složky -> pro uložení dat byl použit způsob přes *Save data*, kde se objeví tabulka s ukládajícími informacemi -> klikne se na kolonku [$\sqrt{\quad}$] vpravo nahoře -> uložení do vybrané složky.

Pokud program při pokusu o spuštění měření kliknutím na tlačítko *Start Max. P & FF* hlásí *OCP(open circuit potencial) too low*, znamená to, že je na článku příliš malé napětí naprázdno, nejčastěji to bývá příčina chybného zapojení článku.

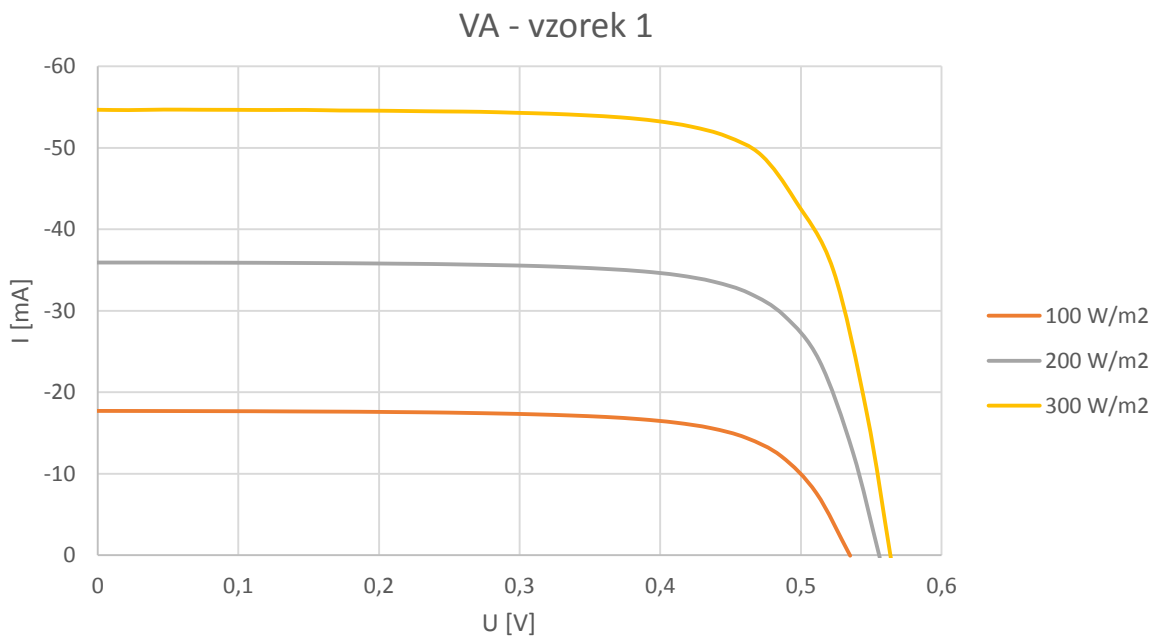
Pro proměření článků byly zvoleny intenzity 100 W/m^2 , 200 W/m^2 a 300 W/m^2 světelným diodovým zdrojem WLR02. Přístroj by měl umožňovat proměřit voltampérovou charakteristiku diodovým zdrojem až při 420 W/m^2 , avšak při pokusu nastavit intenzitu záření na 320 W/m^2 se světelný zdroj sám od sebe vypnul, zřejmě z důvodu vnitřní ochrany před přetížením. Při prvním pokusu o kalibraci světelného zdroje přes *SOURCE CONTROL* -> *CALIBRATE* se znovu dalo nastavit intenzitu záření na 420 W/m^2 , ale následující dny po opětovném spuštění již chyba nastala znovu a nepomohla ani kalibrace. Proto jsou zde uvedeny naměřené hodnoty při intenzitě záření $100 - 300 \text{ W/m}^2$. Dále byl pro změření voltampérové charakteristiky použit wolframový světelný zdroj WOW01. Tímto zdrojem byly proměřeny vzorky v rozmezí $100 - 5000 \text{ W/m}^2$.

Fill Factor neboli faktor plnění lze vypočítat vydělením součinu napětí při maximálním výkonu a proudu při maximálním výkonu součinem napětí naprázdno a proudu nakrátko. Faktor plnění je závislý na celé řadě aspektů, zejména na technologické kvalitě výroby panelu (kvalita kontaktů, odpor aktivní plochy). Účinnost přeměny světelného záření na elektrickou energii se vypočítá vydělením součinu faktoru plnění a napětí naprázdno a proudu nakrátko součinem intenzity záření a plochou fotovoltaického článku.

Vzorek 1 – diodový zdroj

Tabulka 2.1: Naměřené hodnoty vzorku 1 při různých intenzitách záření

E [W/m ²]	Uoc [V]	Isc [mA]	Pmax [mW]	Umax [V]	I _{max} [mA]	Fill Factor
100,00	0,54	-17,71	6,81	0,44	-15,60	0,72
200,00	0,56	-35,92	14,88	0,46	-32,17	0,75
300,00	0,56	-54,69	23,14	0,47	-49,07	0,75



Graf 2.1: Voltampérová charakteristika vzorku 1 při různých intenzitách záření

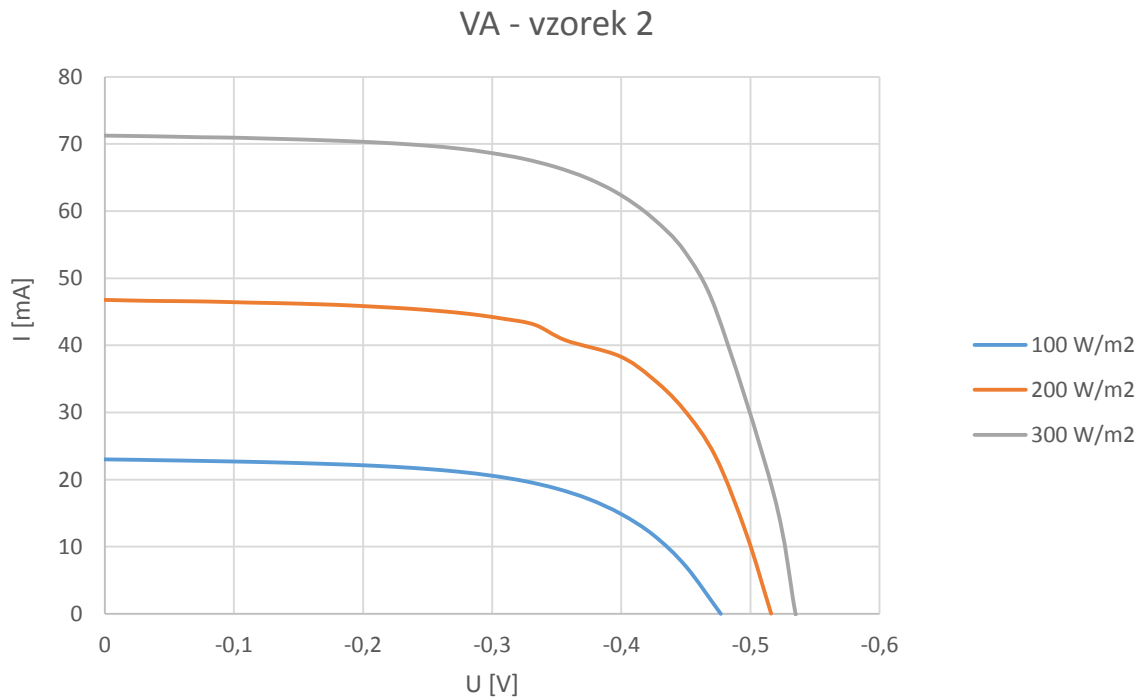
$$\mu = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} = \frac{0,75 \cdot 0,56 \cdot 0,055}{300 \cdot 0,0004} = 0,1925 \cdot 100 = 19,25 \%$$

Podle grafu 2.1 lze říct, že s rostoucí intenzitou záření roste i proud generovaný článkem a tím pádem i výkon. Napětí na článku odpovídá generovanému napětí při osvětlení fotovoltaických článků. Vzorek 1 s rozměry 20 mm x 20 mm byl osvětlen celý bez toho, že by byla část článku zastíněna. Proto se faktor plnění pohybuje okolo hodnoty 0,75, což je v rozmezí správně fungujícího článku. Účinnost tohoto článku je při intenzitě záření 300 W/m² rovna 19,25 %.

Vzorek 2 – diodový zdroj

Tabulka 2.2: Naměřené hodnoty vzorku 2 při různých intenzitách záření

E [W/m ²]	Uoc [V]	Isc [mA]	Pmax [mW]	Umax [V]	I _{max} [mA]	Fill Factor
100,00	-0,48	23,02	6,54	-0,35	18,66	0,60
200,00	-0,52	46,78	15,29	-0,40	38,45	0,63
300,00	-0,54	71,25	25,00	-0,42	59,00	0,66



Graf 2.2: Voltampérová charakteristika vzorku 2 při různých intenzitách záření

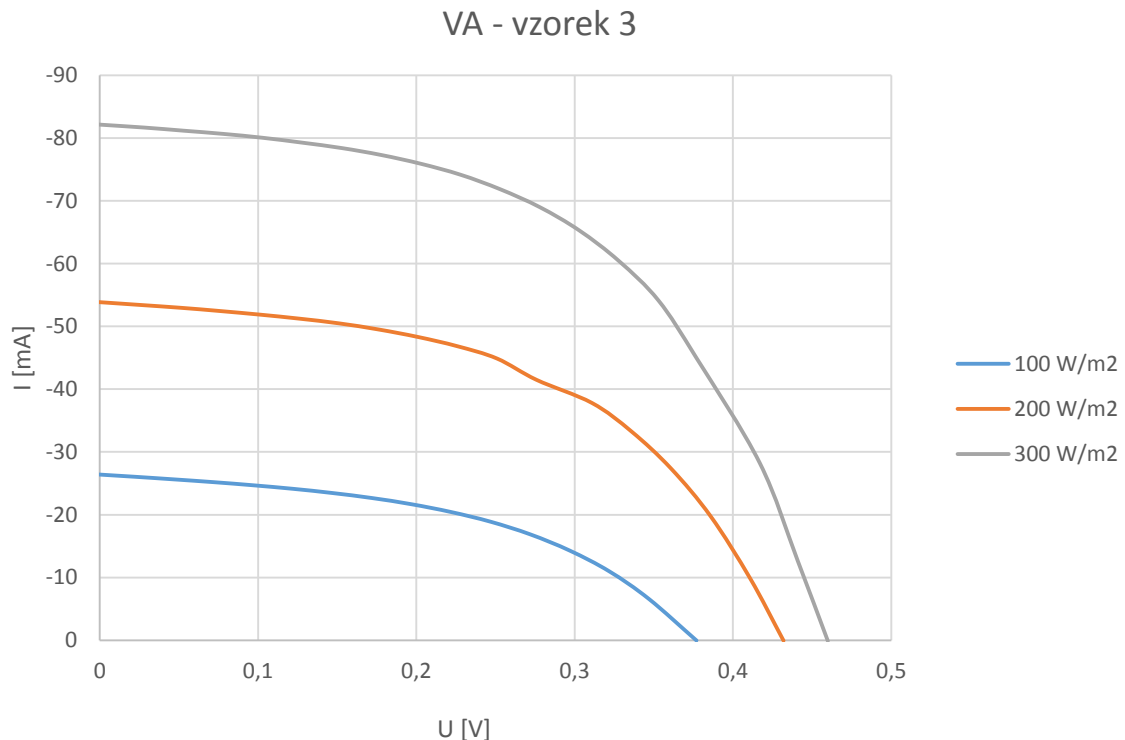
$$\mu = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} = \frac{0,66 \cdot 0,54 \cdot 0,071}{300 \cdot 0,001242} = 0,0679 \cdot 100 = 6,79 \%$$

Z výsledného grafu lze vyčíst totéž co z grafu předchozího a to, že s rostoucí intenzitou světelného záření roste proud i výkon. Vzorek 2 však vykazoval vyšší proudovou odezvu než vzorek 1, avšak kvůli nízkým hodnotám faktoru plnění, které se pohybují okolo 0,63, je i maximální výkon článku téměř srovnatelný se vzorkem 1 i přesto, že byl naměřený proud nakrátko na vzorku 2 o téměř jednu třetinu vyšší. Nižší hodnota faktoru plnění je pravděpodobně způsobena rozměry vzorku 2, které jsou 27 mm x 46 mm, a proto nebyl osvětlen celý článek. Tím pádem docházelo ke ztrátám, které se projeví na výsledném maximálním výkonu a na účinnosti článku, která činí 6,79 %. Dále jde o článek staršího typu (i vzorek 3) a je možné poškození článku. Pro přesnou diagnózu by bylo vhodné analyzovat defekty článku.

Vzorek 3 – diodový zdroj

Tabulka 2.3: Naměřené hodnoty vzorku 3 při různých intenzitách záření

E [W/m ²]	U _{oc} [V]	I _{sc} [mA]	P _{max} [mW]	U _{max} [V]	I _{max} [mA]	Fill Factor
100,00	0,38	-26,41	4,67	0,25	-18,88	0,47
200,00	0,43	-53,88	11,77	0,31	-37,80	0,51
300,00	0,46	-82,16	19,79	0,33	-60,42	0,52



Graf 2.3: Voltampérová charakteristika vzorku 3 při různých intenzitách záření

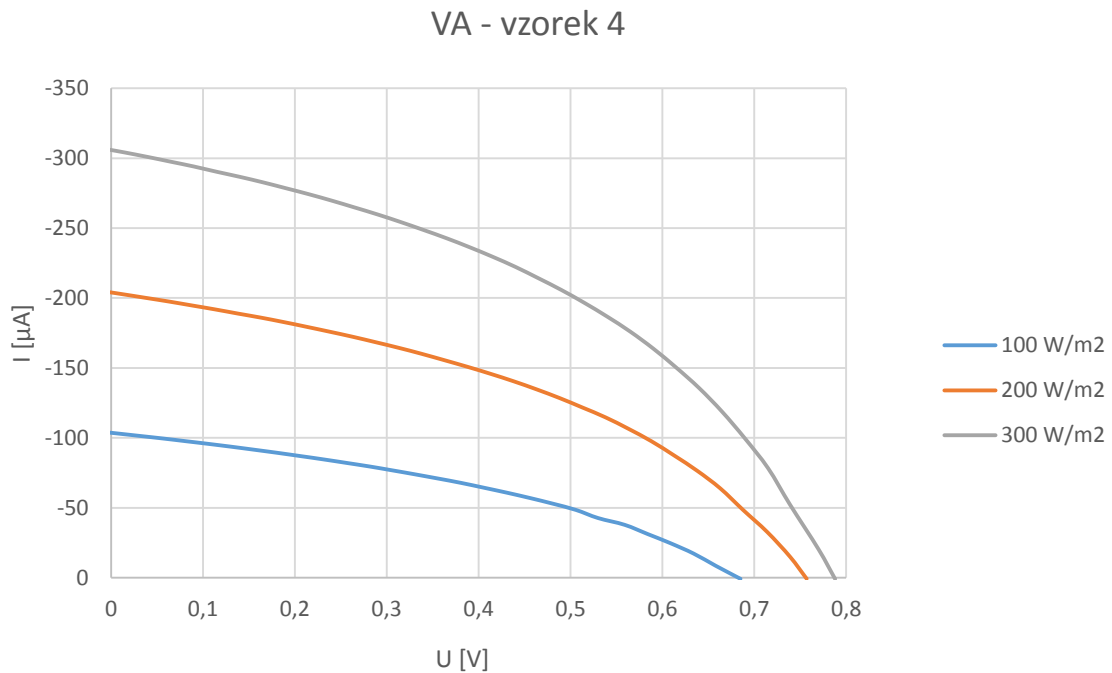
$$\mu = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} = \frac{0,52 \cdot 0,46 \cdot 0,082}{300 \cdot 0,005} = 0,013 \cdot 100 = 1,3 \%$$

Z grafu 2.3 je patrné, že křivky voltampérové charakteristiky nejsou ideální, protože jsou více zploštělé a není zřetelný ohyb, ve kterém se nachází maximální výkon. Je to z toho důvodu, že velká část článku je neosvícená. Při rozměrech 100 mm x 100 mm x 150 mm byla osvícena pouze část o rozměrech 20 mm x 20 mm. Zbytek článku působil jako zátěž a snižoval celkový výkon článku a účinnost článku, protože při výpočtu účinnosti mimo jiné záleží též na ploše článku. Účinnost článku byla 1,3 %. Podle literatury [33] zmenšuje zaoblení ohybu a maximální výkon článku sériový odpor, jehož zdrojem jsou kovové kontakty, zvláště přední mřížka a příčný tok proudu v článku emitující na přední mřížku. Z tohoto důvodu nebyl vzorek 3 použit pro další měření jako ostatní vzorky, pouze pro měření proudové odezvy v závislosti na vlnové délce.

Vzorek 4 – diodový zdroj

Tabulka 2.4: Naměřené hodnoty vzorku 4 při různých intenzitách záření

E [W/m ²]	U _{oc} [V]	I _{sc} [μA]	P _{max} [μW]	U _{max} [V]	I _{max} [μA]	Fill Factor
100,00	0,69	-103,70	26,17	0,43	-60,76	0,37
200,00	0,76	-204,20	62,73	0,49	-128,50	0,41
300,00	0,79	-306,00	101,20	0,52	-196,60	0,42



Graf 2.4: Voltampérová charakteristika vzorku 4 při různých intenzitách záření

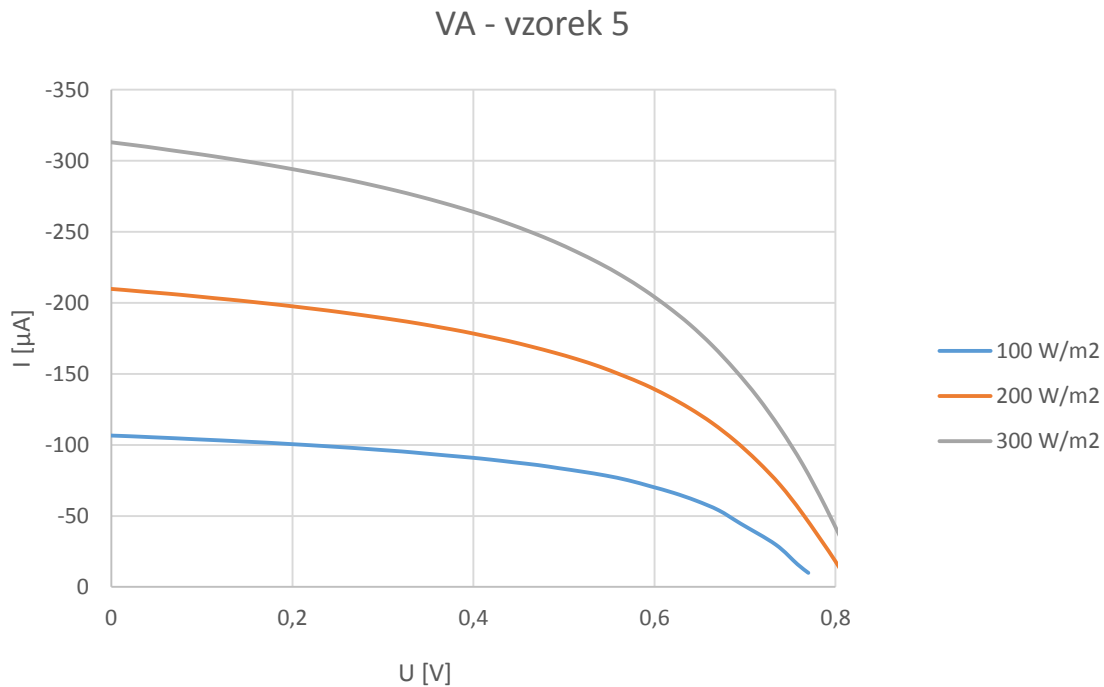
$$\mu = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} = \frac{0,42 \cdot 0,79 \cdot 0,000306}{300 \cdot 0,000036} = 0,094 \cdot 100 = 0,94 \%$$

Vzorek 4 je vyroben z organického materiálu, o kterém je známo, že vykazuje menší výkon než křemíkové články. Na grafu 2.4 lze vidět, že generovaný proud je v mikroampérech a ve srovnání například se vzorkem 1 při intenzitě záření 300 W/m² je generovaný proud vzorku 4 menší asi 180x. Musí se však zohlednit velikost vzorku 4, který má plochu 36 mm², tudíž je jeho plocha asi 11,1x menší než plocha vzorku 1. V přepočtu vzorku 4 s plochou 36 mm² by byla hodnota proudu nakrátko při intenzitě záření 300 W/m² rovna zhruba 3,4 mA, což znamená, že při srovnání se vzorkem 1 je hodnota proudu nakrátko asi 16x menší. Faktor plnění se pohybuje okolo hodnoty 0,4, což je velmi nízká hodnota. Faktor plnění závisí na kvalitě výroby článku, kvalitě kontaktů a odporu aktivní plochy. V případě našeho článku je pravděpodobné, že technologie výroby a stáří článku ovlivnily faktor plnění a účinnost článku. Výhodou je větší generované napětí vzorkem 4. Účinnost článku při intenzitě záření 300 W/m² je 0,94 %.

Vzorek 5 – diodový zdroj

Tabulka 2.5: Naměřené hodnoty vzorku 5 při různých intenzitách záření

E [W/m ²]	Uoc [V]	Isc [μA]	Pmax [μW]	Umax [V]	Imax [μA]	Fill Factor
100,00	0,77	-106,60	42,86	0,57	-75,10	0,52
200,00	0,82	-209,90	84,12	0,56	-149,10	0,49
300,00	0,83	-313,10	123,60	0,56	-219,10	0,48



Graf 2.5: Voltampérová charakteristika vzorku 5 při různých intenzitách záření

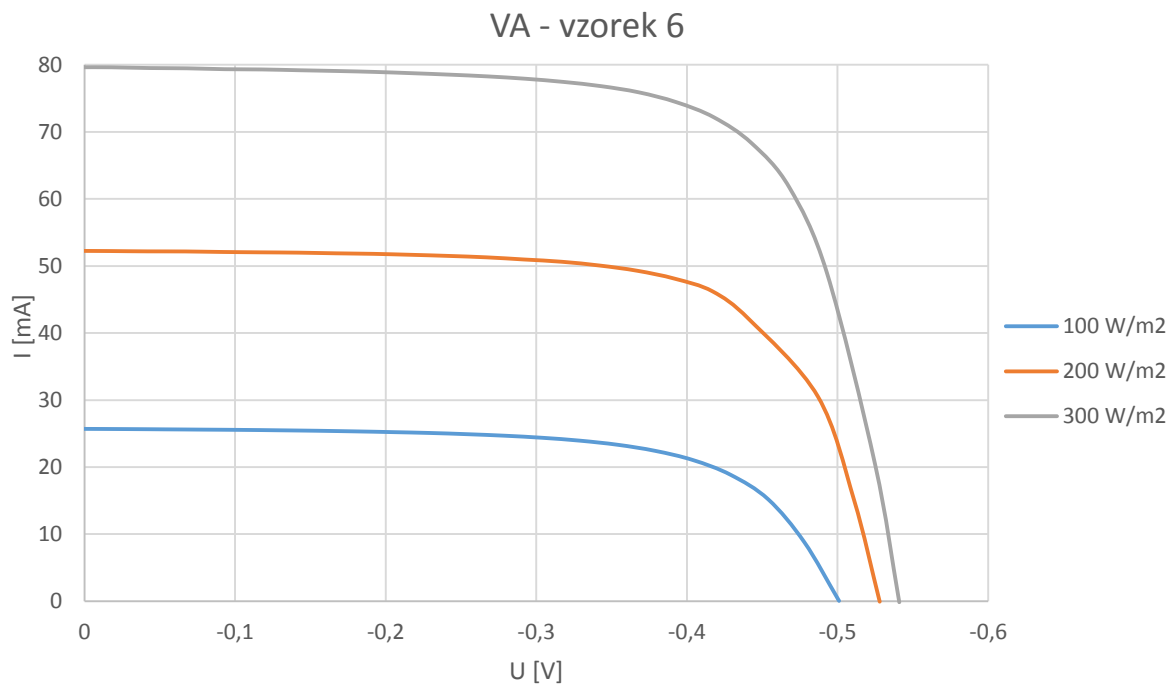
$$\mu = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} = \frac{0,48 \cdot 0,83 \cdot 0,000313}{300 \cdot 0,000276} = 0,015 \cdot 100 = 1,5 \%$$

Vzorek 5 vykazuje téměř shodné hodnoty jako vzorek 4 proto, že je článek z organického materiálu. Organický článek generuje 0,6x větší napětí po osvětlení světelným zdrojem než křemíkové články, ale výsledný výkon je menší, protože organické články generují mnohonásobně menší proud a vzorky 4 a 5 mají velmi nízkou hodnotu faktoru plnění pohybující se okolo čísla 0,4 - 0,5. Účinnost článku je 1,5 %, což je polovinu více než u vzorku 4. Je to z toho důvodu, že články vykazují podobné hodnoty, ale plocha vzorku 5 je menší než plocha vzorku 4. Plocha vzorku 5 se rovná 27,6 mm².

Vzorek 6 – diodový zdroj

Tabulka 2.6: Naměřené hodnoty vzorku 6 při různých intenzitách záření

E [W/m ²]	U _{oc} [V]	I _{sc} [mA]	P _{max} [mW]	U _{max} [V]	I _{max} [mA]	Fill Factor
100,00	-0,50	25,70	8,50	-0,40	21,05	0,66
200,00	-0,53	52,24	19,26	-0,42	46,21	0,70
300,00	-0,54	80,25	30,25	-0,44	68,29	0,70



Graf 2.6: Voltampérová charakteristika vzorku 6 při různých intenzitách záření

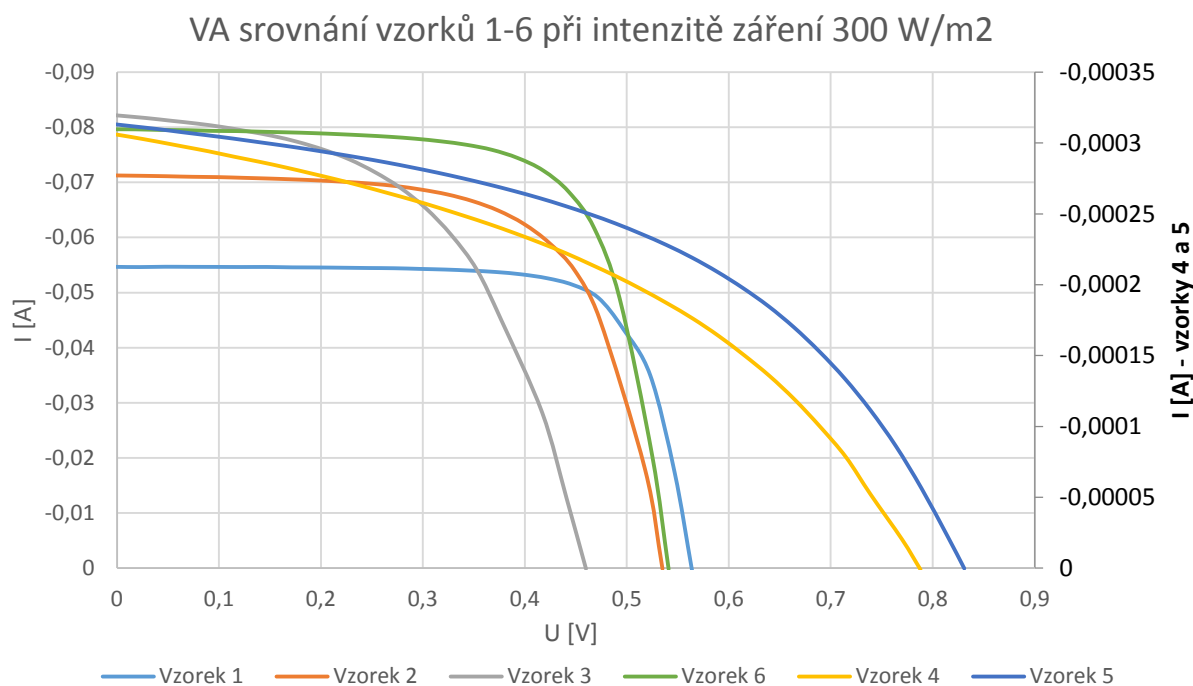
$$\mu = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} = \frac{0,7 \cdot 0,54 \cdot 0,08}{300 \cdot 0,0009} = 0,112 \cdot 100 = 11,2 \%$$

Vzorek 6 je článek z polykrystalického křemíku, který byl pořízen objednávkou ze zdroje nalezeného na internetových stránkách. Z grafu a tabulky naměřených hodnot vyplývá, že proud nakrátko i výkon dosahují vyšších hodnot než vzorky z monokrystalického křemíku. Za normálních okolností je výkon a účinnost článků monokrystalického křemíku vyšší, v tomto případě nejspíše hraje roli kvalita materiálu. Články pořízené fakultou byly staršího typu a mohou obsahovat vady, jejich účinnost byla definována v rozmezí 14 – 15 %, tím pádem lze vysvětlit, proč vykazuje polykrystalický článek lepší vlastnosti. Na grafu lze též vidět výraznější ohyb než u vzorků 3, 4 a 5, což znamená, že je na článku menší sériový odpor. Avšak hodnota účinnosti tohoto vzorku je pouze 11,2 %, protože při výpočtu je důležitá plocha článku, která se rovná 900 mm² a ozářená byla pouze plocha 400 mm², takže neosvícená část se chovala jako zátěž a spotřebovávala proud.

Srovnání vzorků VA charakteristiky – diodový zdroj

Tabulka 2.7: Srovnání účinnosti a výkonu vzorků

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Vzorek 6
Účinnost [%]	19,25	6,8	1,3	0,94	1,5	11,2
Výkon [mW]	23,14	25	19,79	0,1	0,12	30,25



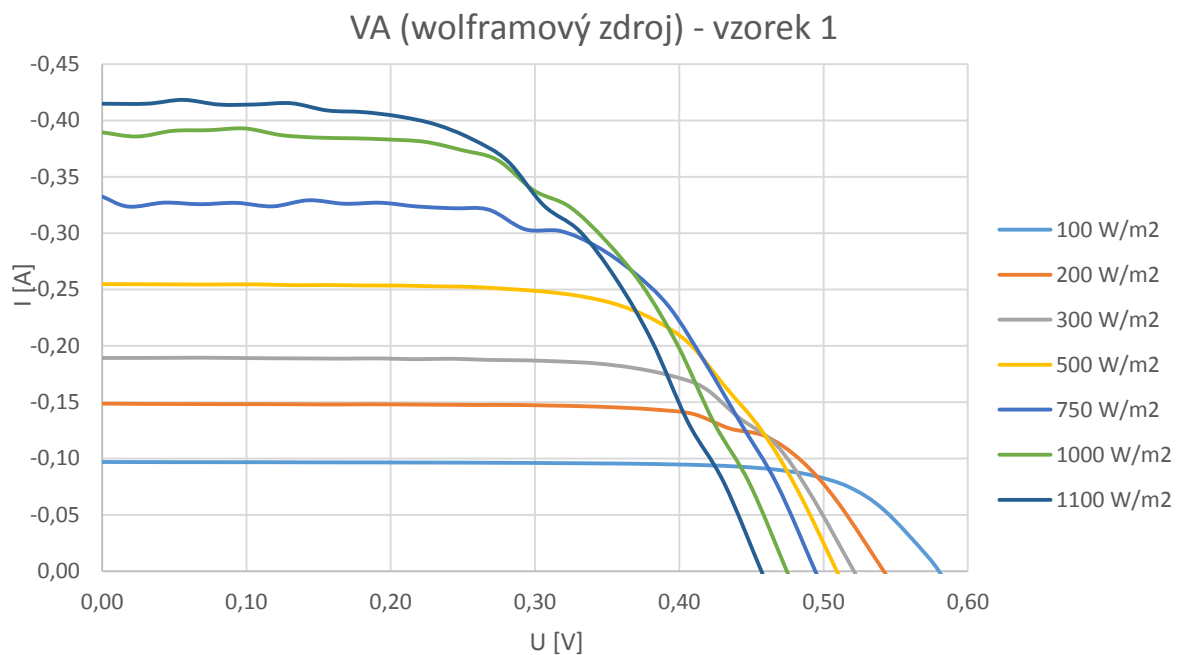
Graf 2.7: Voltampérová charakteristika - srovnání vzorků 1-6 při intenzitě záření 300W/m²

Měření voltampérové charakteristiky bylo provedeno u všech vzorků. Z grafu je patrné, že vzorky 4 a 5 vykazují nesrovnatelně menší proud nakrátko a výkon v porovnání s ostatními vzorky, zato však generují větší napětí. Z předešlých grafů lze vidět jejich průběhy, které nemají tak výrazné ohyby jako ostatní vzorky. Též charakteristika vzorku 3 není ideální, protože má méně výrazný ohyb, způsobený velkým zastíněním článku. Vzorky 1 a 6 jsou průběhem, co se týče ohybu, téměř ukázkové. Rozdílné výkony jsou dány materiálem a kvalitou článků. Účinnost článků je rozdílná, nejvíce vypovídající účinnost je u vzorku 1, 4 a 5, protože u zbylých vzorků bylo počítáno s větší plochou článku, než která byla ozářena světelným paprskem. Účinnost článků nelze srovnávat se veřejně publikovanými hodnotami z důvodu nesprávného nastavení a kalibraci intenzity záření, viz. níže.

Vzorek 1 – wolframový zdroj

Tabulka 2.8: Naměřené hodnoty vzorku 1 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj

E [W/m ²]	U _{oc} [V]	I _{sc} [mA]	P _{max} [mW]	U _{max} [V]	I _{max} [mA]	Fill Factor
100,00	0,58	-96,90	42,09	0,47	-89,97	0,74
200,00	0,55	-148,70	57,20	0,41	-139,40	0,71
300,00	0,52	-189,40	68,25	0,39	-174,20	0,69
500,00	0,51	-254,70	85,39	0,38	-223,40	0,66
1000,00	0,48	-392,80	104,80	0,32	-323,30	0,56



Graf 2.8: Voltampérová charakteristika vzorku 1 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj

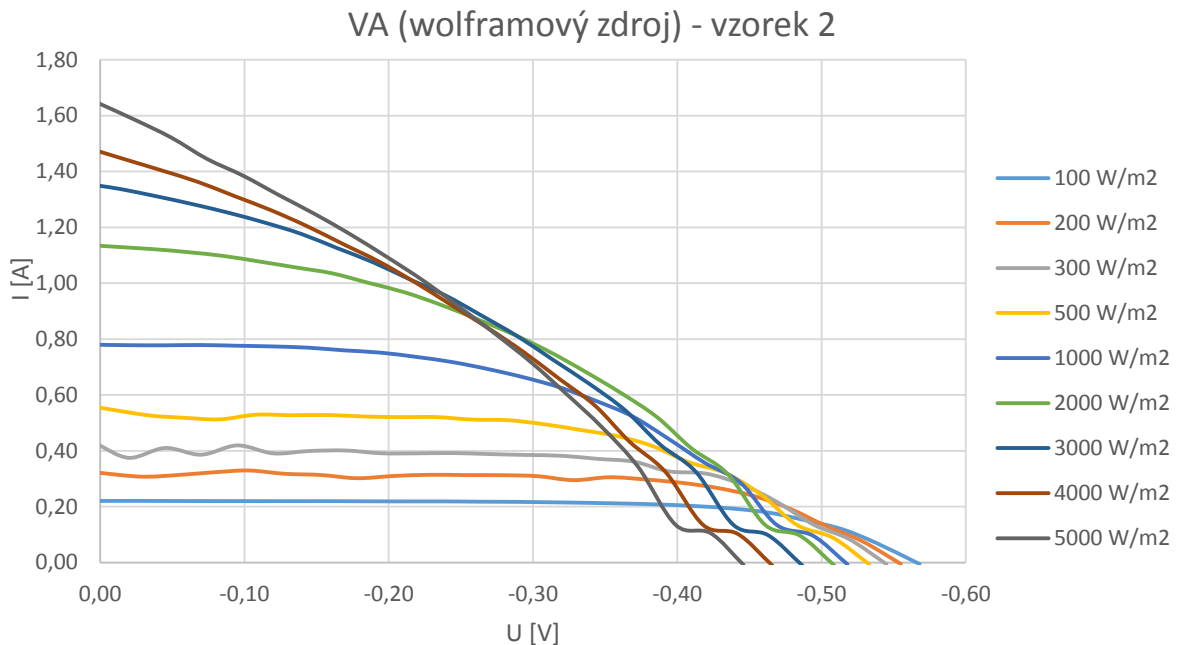
$$\mu = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} = \frac{0,56 \cdot 0,48 \cdot 0,393}{1000 \cdot 0,0004} = 0,2641 \cdot 100 = 26,41 \%$$

Z grafu 2.8 lze vyčíst, že s rostoucí intenzitou záření roste i proud nakrátko, ale naopak klesá napětí na prázdko. Napětí na prázdko klesá s rostoucí teplotou článku. Čím vyšší je intenzita, tím menší je hodnota faktoru plnění, což může být způsobeno zahříváním článku při vyšších intenzitách záření. Maximální výkon s rostoucí intenzitou rovnoměrně roste. S rostoucí intenzitou záření se mírně zmenšuje ohyb v průběhu charakteristiky, což je dáno menší hodnotou faktoru plnění. Vzorek 1 byl proměřen pouze do intenzity záření 1100 W/m², protože jde o testovací článek dodaný jako příslušenství přístroje CIMPS a proto by nebylo vhodné jej poškodit vystavením článku velmi vysoké teplotě. Důležité je proměření článku při intenzitě 1000 W/m², protože je to hodnota intenzity slunečního záření. Hodnota účinnosti článku je 26,41 %, což je vysoká hodnota v porovnání s komerčními články.

Vzorek 2 – wolframový zdroj

Tabulka 2.9: Naměřené hodnoty vzorku 2 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj

E [W/m ²]	Uoc [V]	Isc [A]	Pmax [mW]	Umax [V]	Imax [A]	Fill Factor
100,00	-0,57	0,22	84,53	-0,44	0,19	0,68
200,00	-0,56	0,33	115,00	-0,40	0,29	0,63
300,00	-0,55	0,42	133,60	-0,42	0,32	0,58
500,00	-0,53	0,56	162,20	-0,36	0,45	0,55
1000,00	-0,52	0,78	200,00	-0,32	0,63	0,50
2000,00	-0,51	1,13	234,80	-0,31	0,76	0,41
3000,00	-0,49	1,35	233,90	-0,29	0,81	0,36
4000,00	-0,47	1,47	225,30	-0,27	0,84	0,33
5000,00	-0,45	1,64	227,90	-0,25	0,92	0,31



Graf 2.9: Voltampérová charakteristika vzorku 2 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj

$$\mu = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} = \frac{0,5 \cdot 0,52 \cdot 0,78}{1000 \cdot 0,001242} = 0,1632 \cdot 100 = 16,32 \%$$

U vzorku 2 bylo provedeno měření pro intenzitu záření v rozmezí 100 – 5000 W/m². Sluneční záření za krásné viditelnosti je maximálně 1000 W/m². Při měření se trochu experimentovalo. Faktor plnění se s rostoucí intenzitou extrémně snižuje. Rozdíl faktoru plnění mezi počátečním a konečným měřením je více než 1x tolik. Kdežto maximální výkon článku do intenzity 2000 W/m² roste a poté začne klesat. Průběh charakteristiky se u vysokých hodnot intenzity záření podobá přímce, z důvodu vysokého zahřívání článku.

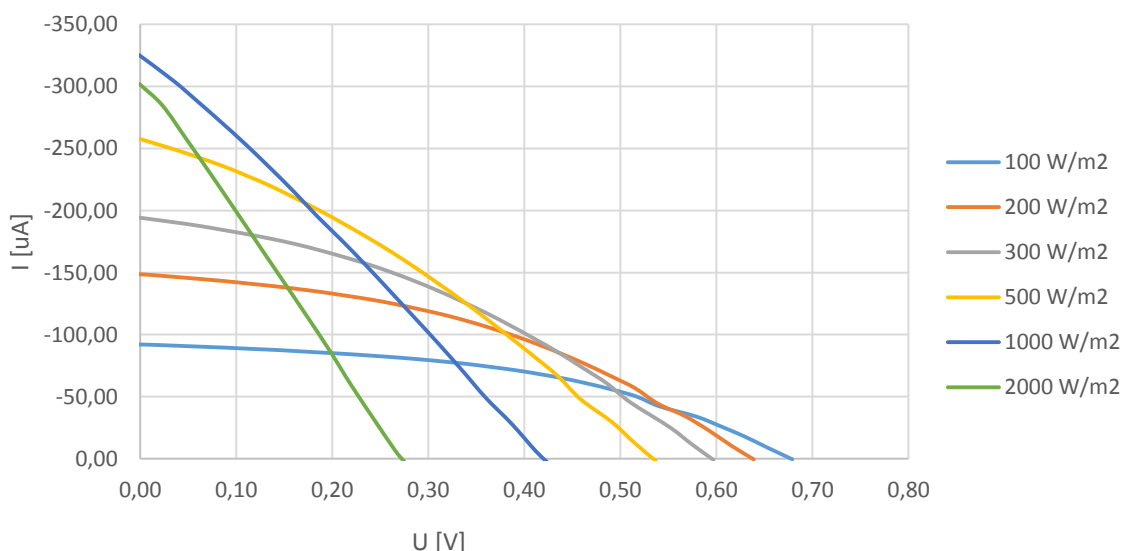
Účinnost článku je 16,32 %, co je o 10 % méně než u vzorku 1. Je to dáno kvalitou článku a též plochou článku a plochou, která byla osvětlená.

Vzorek 4 – wolframový zdroj

Tabulka 2.10: Naměřené hodnoty vzorku 4 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj

E [W/m ²]	Uoc [V]	Isc [uA]	Pmax [uW]	Umax [V]	Imax [uA]	Fill Factor
100,00	0,68	-92,09	28,51	0,44	-64,53	0,46
200,00	0,64	-148,70	38,56	0,39	-98,94	0,41
300,00	0,60	-194,30	42,42	0,34	-126,40	0,37
500,00	0,54	-257,90	44,04	0,29	-154,80	0,32
1000,00	0,42	-325,30	36,94	0,21	-175,90	0,27
2000,00	0,28	-302,20	21,31	0,15	-144,20	0,26

VA (wolframový zdroj) - vzorek 4



Graf 2.10: Voltampérová charakteristika vzorku 4 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj

$$\mu = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} = \frac{0,27 \cdot 0,42 \cdot 0,000325}{1000 \cdot 0,000036} = 0,001 \cdot 100 = 0,1 \%$$

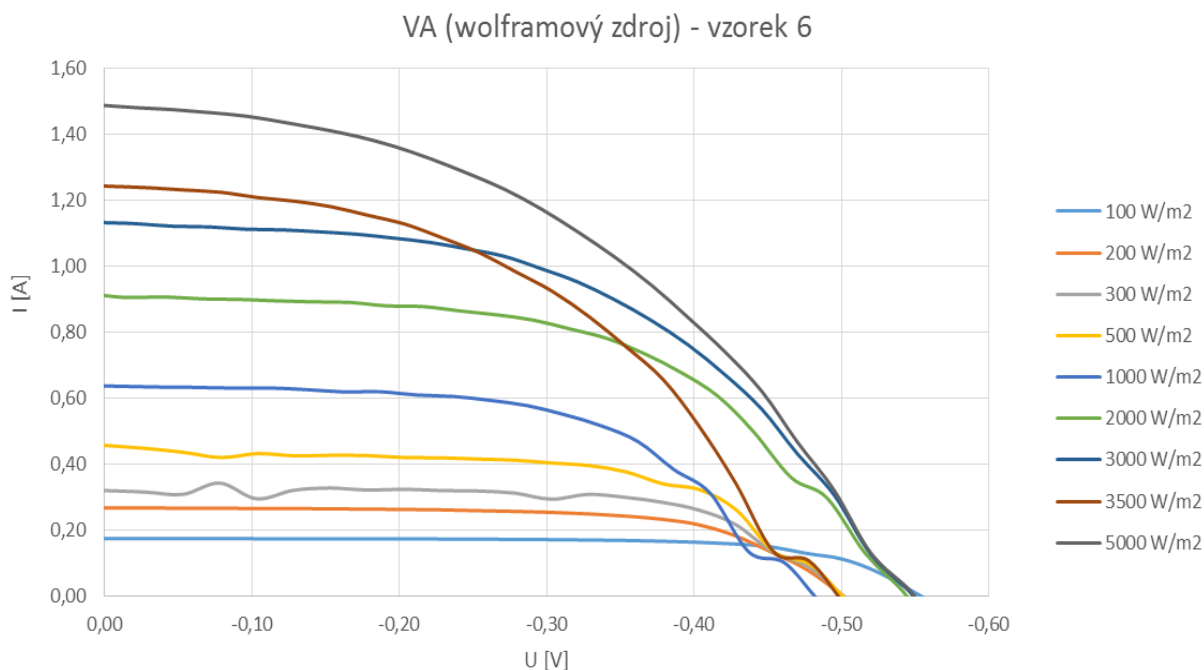
Z grafu 2.10 vzorku 4 je vidno, že organickým článkům neprospívá vysoká intenzita záření a že se tím tak nezvýší výkon článků. Do 500 W/m² se maximální výkon zvyšuje, ale poté extrémně klesá až pod výkon při měření s intenzitou záření 100 W/m². Při intenzitě 2000 W/m² je průběh charakteristiky ve tvaru přímky. Z těchto důvodů se neprovádělo měření vzorku 4 pro vyšší intenzity než 2000 W/m². K pozitivním výsledkům bychom se nedostali. U organických článků je výhodou, že jejich maximální výkon se pohybuje při nižších intenzitách záření než u křemíku, proto je vhodný pro použití hlavně

za ne dokonale slunečného počasí. Účinnosť tohoto článku pri intenzite záření 1000 W/m² je 0,1 %.

Vzorek 6 – wolframový zdroj

Tabulka 2.11: Naměřené hodnoty vzorku 6 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj

E [W/m ²]	U _{oc} [V]	I _{sc} [A]	P _{max} [mW]	U _{max} [V]	I _{max} [A]	Fill Factor
100,00	-0,56	0,17	67,62	-0,45	0,15	0,70
200,00	-0,50	0,27	88,01	-0,38	0,23	0,66
300,00	-0,50	0,34	107,70	-0,38	0,28	0,63
500,00	-0,50	0,46	133,40	-0,35	0,38	0,58
1000,00	-0,48	0,64	173,90	-0,34	0,52	0,56
2000,00	-0,55	0,91	269,10	-0,37	0,74	0,53
3000,00	-0,56	1,13	310,70	-0,35	0,90	0,49
3500,00	-0,50	1,24	280,60	-0,30	0,92	0,45
5000,00	-0,56	1,49	355,60	-0,35	1,03	0,43



Graf 2.11: Voltampérová charakteristika vzorku 6 při různých intenzitách záření - wolframový zdroj

$$\mu = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{E \cdot A} = \frac{0,56 \cdot 0,48 \cdot 0,64}{1000 \cdot 0,0009} = 0,1911 \cdot 100 = 19,11 \%$$

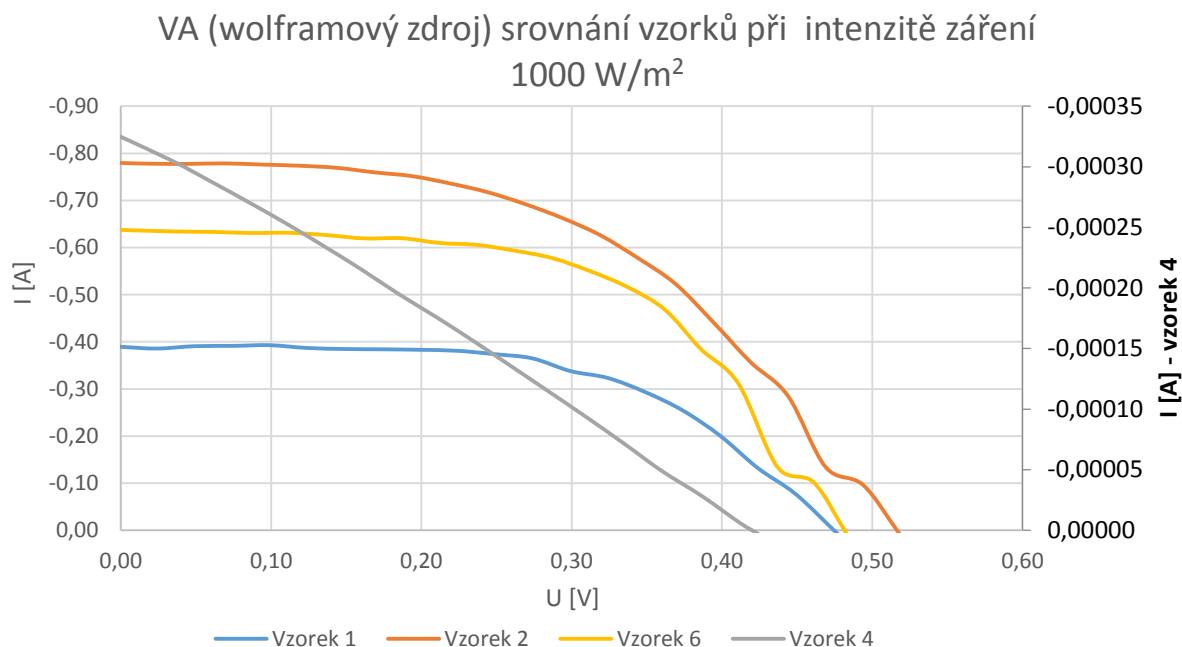
Vzorek 6 je zajímavý v tom, že maximální výkon stále stoupá se zvyšující se intenzitou záření jako u vzorku 1 s výjimkou jednoho měření při 3500 W/m² i přes to, že se faktor plnění stále snižuje. Zajímavý je průběh charakteristiky při intenzitě 3500 W/m², kde je viditelný neobjasněný skok. Napětí naprázdno skokem vzrostlo u intenzity 2000 W/m².

Proud nakrátko dosáhl hodnoty až 1,5 A při intenzitě 5000 W/m². Z tohoto měření plyne, že u polykrystalického křemíku roste výkon až do horní hranice proměřované intenzity záření. Za normálních okolností by v našich přírodních podmínkách článek s takovou intenzitou záření být osvětlen nemohl, protože hodnota 5000 W/m² je 5x větší jako intenzita záření Slunce za slunečného počasí. Účinnost vzorku 6 je 19,11 % i přes to, že ne celá plocha článku byla při měření osvětlena.

Srovnání vzorků VA charakteristiky – wolframový zdroj

Tabulka 2.12: Srovnání účinnosti a výkonu vzorků osvětlených wolframovým zdrojem

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 4	Vzorek 6
Účinnost [%]	26,41	16,32	0,1	19,11
Výkon [mW]	104,8	200	0,04	173,9

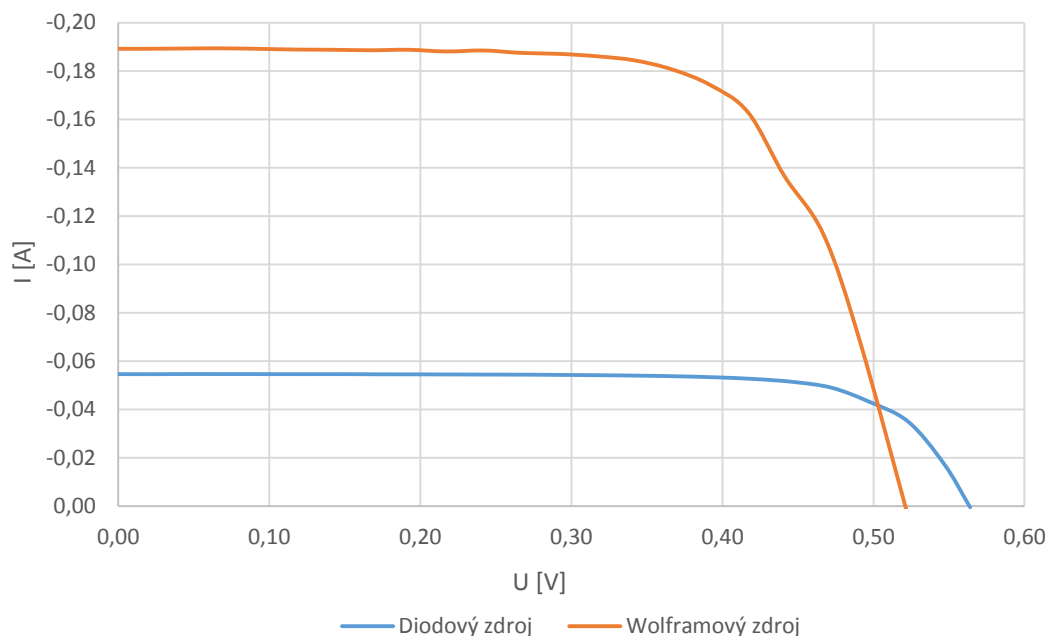


Graf 2.12: Voltampérová charakteristika (wolframový zdroj) srovnání vzorků při intenzitě záření 1000 W/m²

V grafu 2.12 je zobrazeno srovnání měřených vzorků wolframovým světelným zdrojem při intenzitě záření 1000 W/m². Podle grafu vykazuje vzorek 2 nejlepší hodnoty. Účinnost přeměny sluneční energie na elektrickou energii má nejvyšší vzorek 1 s hodnotou 26,4 %, dále vzorek 6 s hodnotou 19,1 % a až poté vzorek 2 s hodnotou 16,3 %. Vzorek 4 vykazuje při intenzitě záření 1000 W/m² skoro nulovou účinnost mimo jiné z toho důvodu, že nejlépe reaguje na osvětlení přibližně při intenzitě záření 500 W/m².

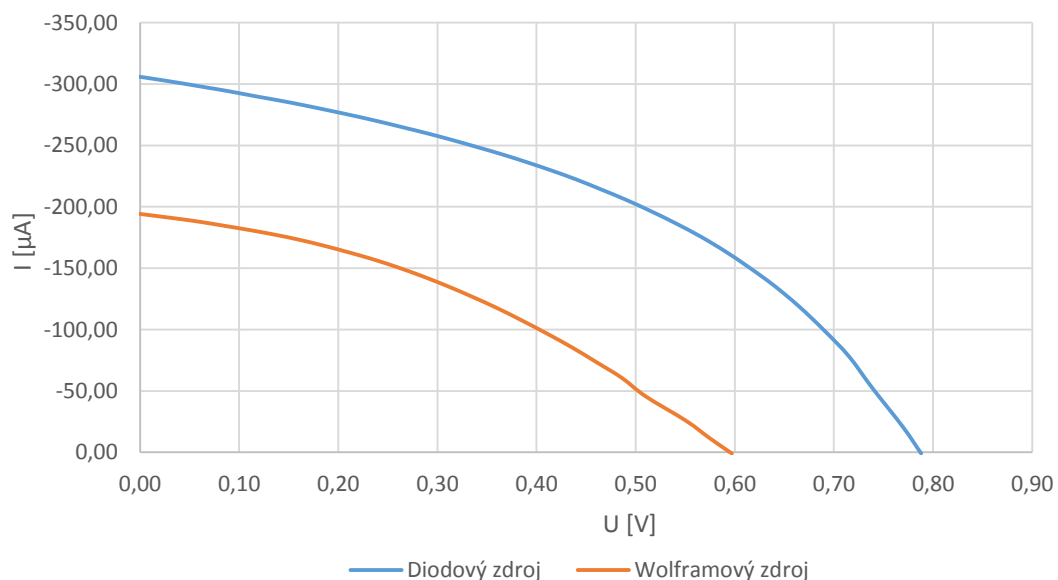
VA srovnání světelných zdrojů při stejné intenzitě záření

VA srovnání světelných zdrojů při intenzitě 300 W/m² -
vzorek 1



Graf 2.13: Voltampérová charakteristika srovnání světelných zdrojů - vzorek 1

VA srovnání světelných zdrojů při intenzitě záření 300 W/m² -
vzorek 4



Graf 2.14: Voltampérová charakteristika srovnání světelných zdrojů - vzorek 4

V grafu 2.13 je zobrazeno srovnání voltampérové charakteristiky vzorku 1 s diodovým světelným zdrojem a wolframovým světelným zdrojem. Výsledná křivka měření

wolframovým zdrojem při intenzitě 300 W/m^2 vykazuje dvojnásobně větší proud nakrátko a až třináásobně větší maximální výkon, což je způsobeno pravděpodobně tím, že wolframové žárovky vyzařují spojité spektrum, kdežto diody nespojitě spektrum a jiné vlnové délky. Fotovoltaické články vyrobené z křemíku mají největší účinnost okolo červené oblasti spektra, což wolframová žárovka mimo jiné vlnové délky též vyzařuje. Diodový zdroj nevyzařuje spojité spektrum, tudíž ani tolik vlnové délky v červené oblasti. Proto je křivka voltampérové charakteristiky při osvětlení wolframovým zdrojem o tolik výš.

V grafu 2.14 lze vidět opačný výsledek voltampérové charakteristiky. Organické články reagují na různé vlnové délky spektra jinak než křemíkové články. Nejvyšší proudovou odezvu mají při nižších vlnových délkách než křemík. U křemíkového článku vykazoval lepší hodnoty wolframový světelný zdroj, naopak u organického článku to je diodový zdroj, protože organické články mají lepší účinnost v nižších vlnových délkách než při kterých má maximum křemík. Použitá bílá LED dioda nevyzařuje spojité spektrum, proto nemá stejné složení spektra jako wolframová žárovka, díky tomu organický článek vykazuje formálně lepší účinnost.

Pro porovnání naměřených hodnot s již známými hodnotami pro komerční nebo laboratorní využití bylo potřeba přepočítat výsledné hodnoty pro rozměry klasického článku, které jsou $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$. Články použité při měření měly různé rozměry, byla však vždy osvětlená stejná plocha a to 400 mm^2 , což je 25x méně než rozměr klasického článku. Proto byl násoben jak proud nakrátko, tak maximální výkon pro zjištění a porovnání naměřených hodnot touto hodnotou. Naměřené hodnoty byly nad očekávání vysoké v porovnání s reálnými maximálními hodnotami (1 - 2x vyšší hodnoty). Bylo to způsobeno pravděpodobně tím, že po nastavení hodnoty intenzity záření v programu se spustí zdroj, který by měl osvětlovat celou plochu 400 mm^2 rovnoměrně, ale při zkoušení přístrojem pro měření intenzity záření bylo zjištěno, že zdroj vyzařuje velmi úzký paprsek a plocha je osvětlena nerovnoměrně. To znamená, že i na sensor, který musí být umístěn vedle ozářené plochy článku tak, aby do něj nezasahoval, dopadá menší intenzita záření, než se nastavuje v programu. Sensor funguje jako zpětná vazba pro udržování konstantní intenzity záření, tedy pokud se sensor trochu zastíní, elektrický obvod vyvodí, že se zastínil i článek a zvýší intenzitu tak, aby článek osvětlil požadovanou intenzitou nastavenou v programu. Protože je sensor vedle úzkého paprsku, tak na něj dopadá menší intenzita a článek je potom osvětlen větší intenzitou záření než je nastavena, i když je v programu zvolena. Toto je možné vysvětlení toho, proč je o tolik větší naměřený výkon a účinnost článků než maximální reálné hodnoty. Pro další měření s tímto přístrojem by bylo vhodné se před měření detailně zabývat světelnými zdroji a jejich nastavením a kalibrací. Též se doporučuje změřit multimetrem proud a napětí, jestli se shodují s výslednými hodnotami v programu.

2.5.2 Statické měření – proudová odezva v závislosti na intenzitě záření

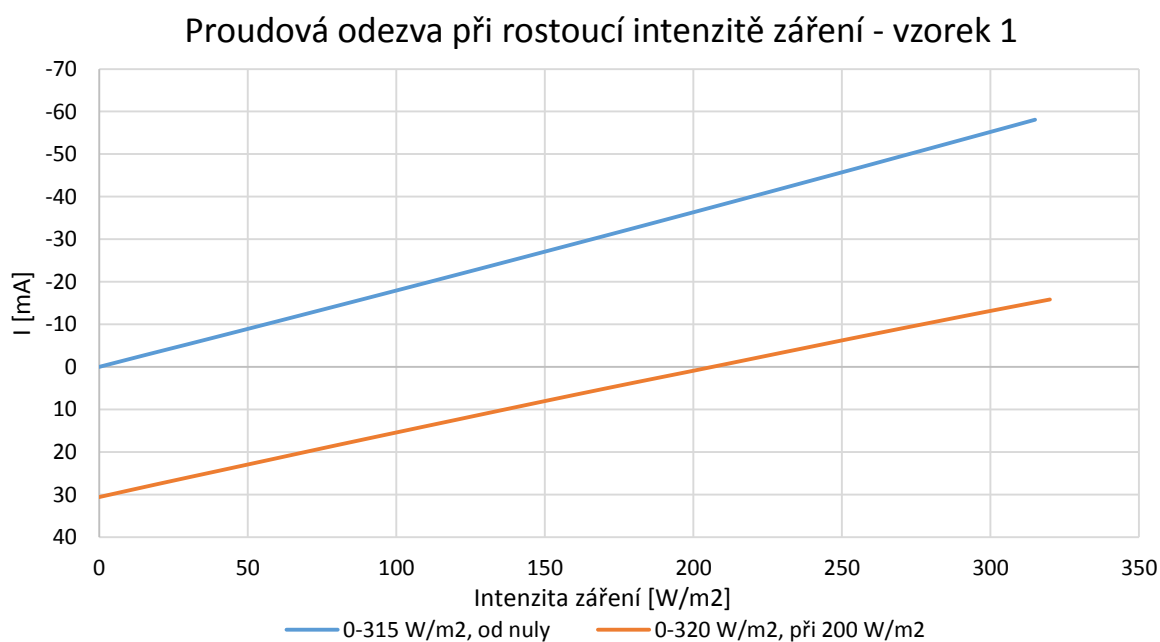
Tato metoda slouží ke zjištění generovaného proudu při postupném osvětlení rostoucí intenzitou záření.

Pro měření proudové závislosti na intenzitě záření je potřeba spustit program přes základní spouštění programu, po načtení hlavního menu se klikne na ikonu *Start Static TF* -> do tabulky se vyplní požadovaná počáteční hodnota intenzity záření *starting value [W/m²]* -> požadovaná konečná hodnota intenzity záření *ending value [W/m²]* -> hodnota, po jakých krocích se intenzita záření navyšuje *stepwidth [W/m²]* -> čas, po jaké době se navýší hodnota *settling time [W/m²]* -> po nastavení těchto hodnot se klikne na ikonu [√] vpravo nahoře -> následně se spustí měření a je zobrazená intenzita záření a průběžná naměřený proud -> výsledný graf lze uložit pomocí *Export Graphic* -> ve formátu *save as EMF file* -> graf se uloží do vybrané složky -> data lze uložit přes *save data* -> v naskočené tabulce se klikne na ikonu [√] vpravo nahoře -> data se uloží do vybrané složky. Data byla uložena ve formátu textového dokumentu, aby mohla být následně zpracována v Excelu. Grafy sloužily pro kontrolu zpracovaných grafů v Excelu.

Při nastavení konečné hodnoty intenzity záření na maximálně povolenou hodnotu 420 W/m² se světelný zdroj vypne při 320 W/m². Proto jsou vzorky měřeny maximálně do hodnoty 310 W/m². Opět nepomohla kalibrace zdroje.

Měří se proudová odezva v závislosti na zvyšující se intenzitě záření. Proměřeny byly vzorky 1, 2, 4, 5 a 6.

Vzorek 1



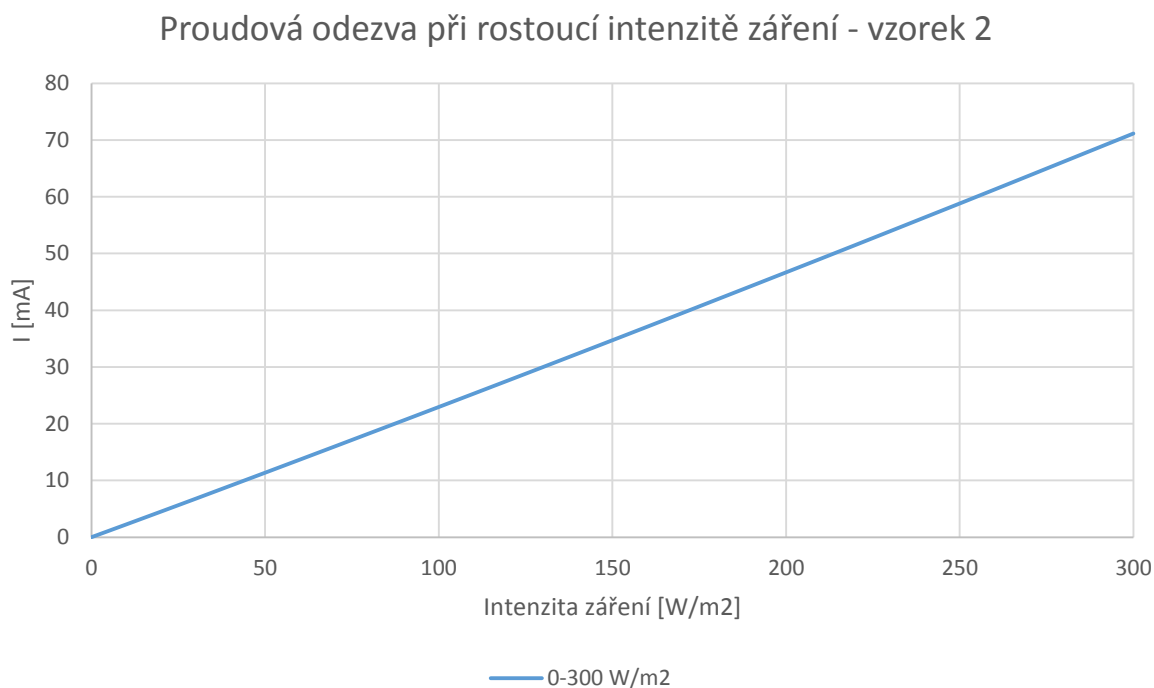
Graf 2.15: Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 1

V grafu 2.15 jsou zobrazeny závislosti proudové odezvy při rostoucí intenzitě záření. Modrá křivka má počátek v nule, protože při nastavení tohoto měření nebyla v hlavním menu zvolena žádná intenzita záření, světelný zdroj byl vypnut. Protože křivka začíná v nule, článek generuje proud již od osvětlení minimální intenzitou záření. Oranžová křivka má počátek při 30 mA a až do intenzity záření 200 W/m^2 se křivka nachází pod hodnotou 0 A. Funguje to stejně jako při spuštění měření při nastavení nulové intenzity záření. V hlavním menu byla nastavena hodnota 200 W/m^2 a až poté se nastavil zbytek údajů potřebných pro toto měření (např. rozmezí proměřené intenzity atd.). Pro statické měření je potřeba zapnout potenciostat na ON, poté lze zvolit vkládané napětí na článek. V tomto případě bylo na článek potenciostatem vkládáno napětí, které sám článek generuje při osvětlení 200 W/m^2 . Při měření se začalo od nulové intenzity a postupně se zvyšovalo po 15 W/m^2 . Na článek bylo vkládáno napětí nastavené při 200 W/m^2 , při nižších hodnotách osvětlení než 200 W/m^2 nebyl článek dostatečně osvětlen na hodnotu, kterou „očekával“ a proto místo generování proudu jej odebíral až do bodu, kdy se intenzity vyrovnaly. V rozmezí $200 - 300 \text{ W/m}^2$ článek generuje proud. To, že si program uloží předem nastavenou intenzitu záření a pokládá ji za výchozí, bylo zjištěno až dodatečně po realizaci pár měření.

Všeobecně platí, že čím větší intenzitou záření je článek osvětlen, tím dodává větší proud. Ve výsledku je porovnání vzorků shodné s porovnání při měření voltampérové charakteristiky, protože proud, který článek generuje při zvyšující se intenzitě záření, odpovídá proudu nakrátko u voltampérové charakteristiky.

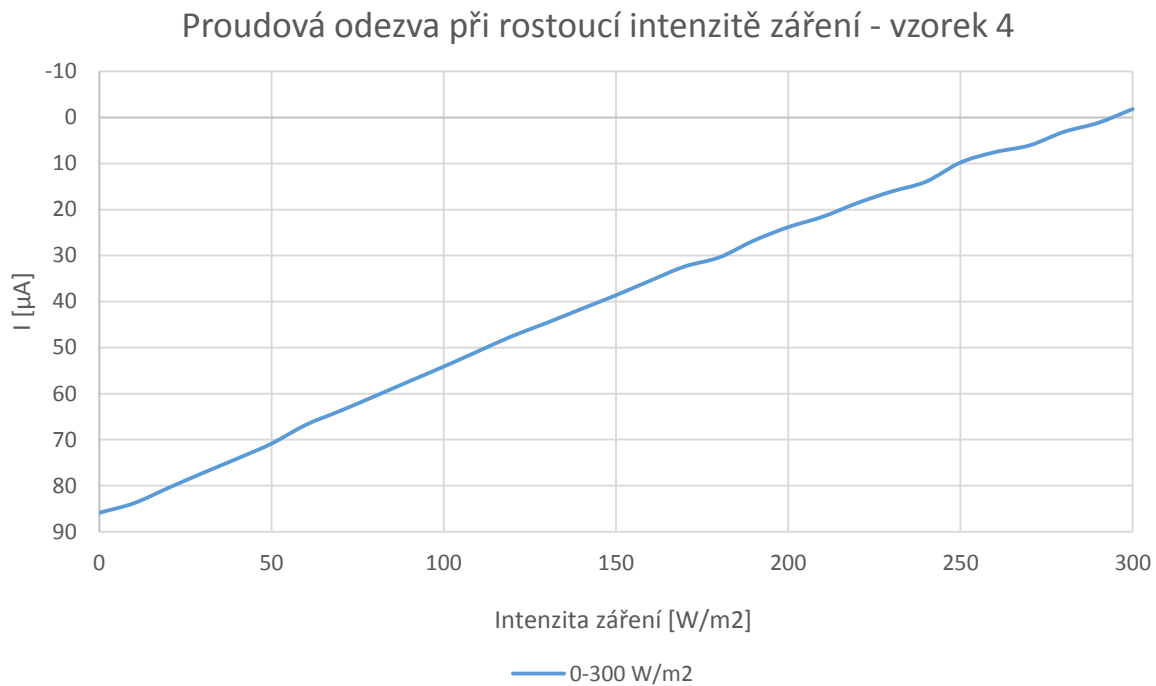
Následující grafy 2.16 - 2.19 mají stejné vysvětlení jako graf 2.15.

Vzorek 2



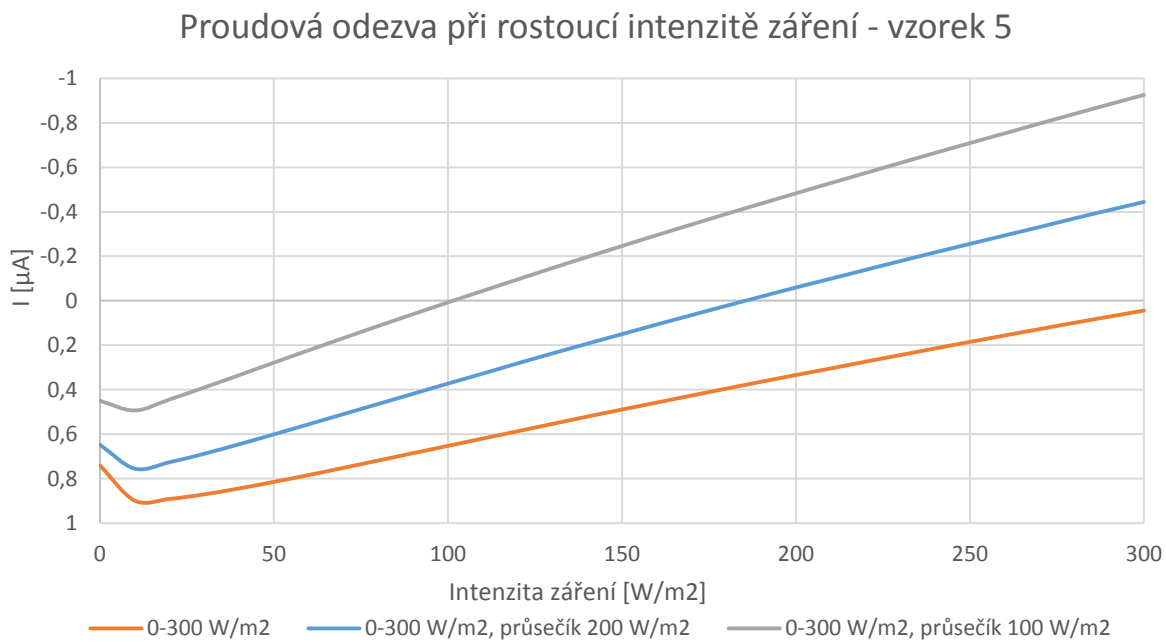
Graf 2.16: Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 2

Vzorek 4



Graf 2.17: Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 4

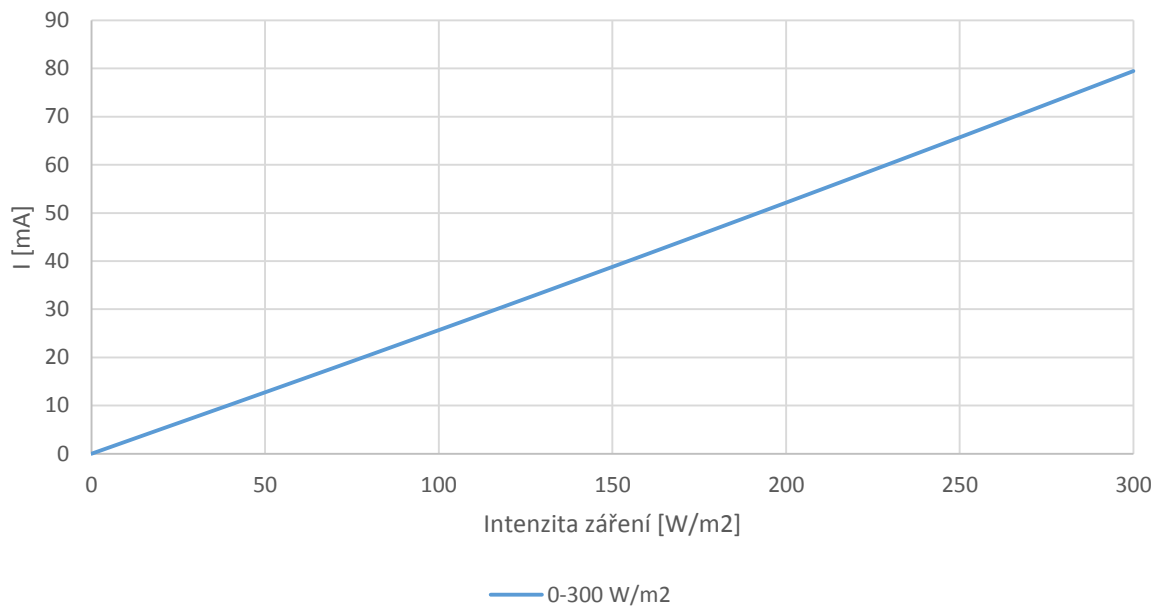
Vzorek 5



Graf 2.18: Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 5

Vzorek 6

Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 6



Graf 2.19: Proudová odezva při rostoucí intenzitě záření - vzorek 6

2.5.3 Dynamické měření – fáze a proudová odezva v závislosti na frekvenci

Při této metodě se proměřují dvě složky v závislosti na frekvenci a těmi jsou fáze a proudová odezva. Při impedanční spektroskopii bývá zobrazena impedance a fáze v závislosti na frekvenci, avšak přístroj CIMPS provádí přepočty automaticky, tudíž je v následujících grafech zobrazena odezva střídavého proudu v závislosti na frekvenci. Frekvence v průběhu měření klesá logaritmičtě a proudová odezva je v absolutní hodnotě.

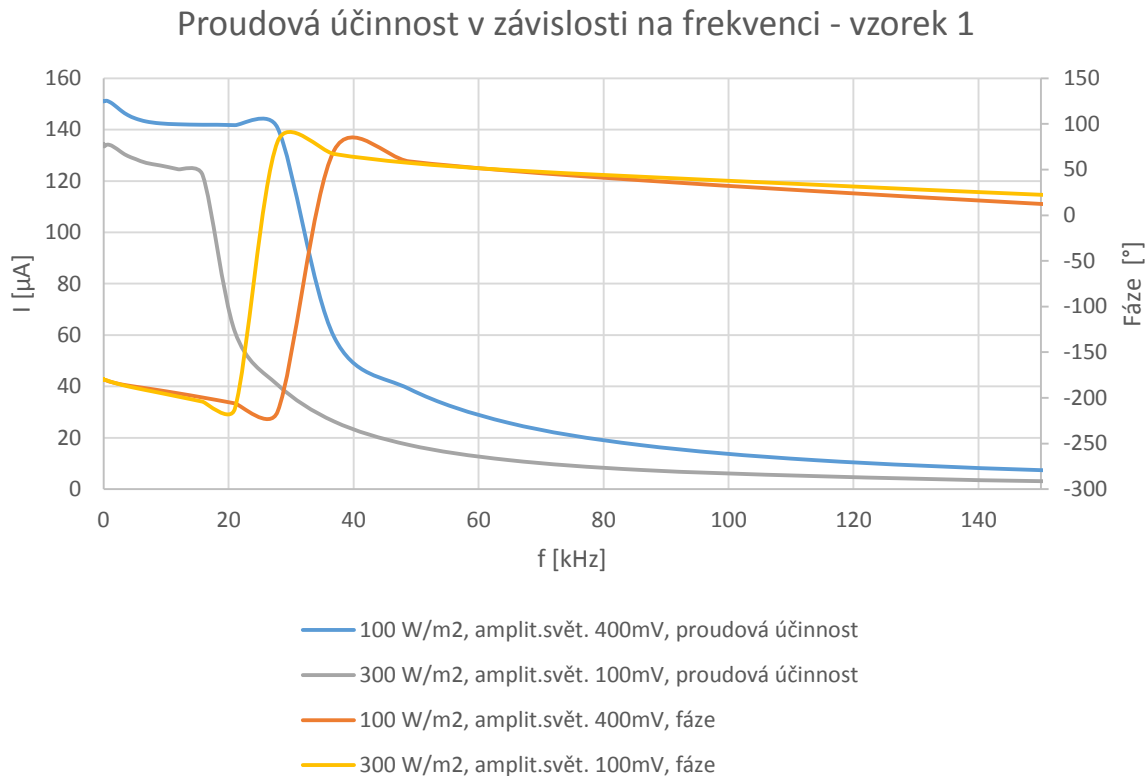
Pro měření je po spuštění programu z plochy a načtení hlavního menu následující postup -> do kolonky *Actual Average Intensity [W/m²]* se zvolí požadovaná intenzita záření, při které se bude měřit -> na světelném zdroji lze po kliknutí na tlačítko *Source Control* nastavit *FREQUENCY [1 kHz]*, *AMPLITUDE [400 mV, 2 mV]*, *COUNT [1]* -> po nastavení amplitudy se zobrazí graf impedance a fáze, ve vedlejším grafu se pak zobrazí průběh střídavého napětí a střídavého proudu se spektrem, odkud lze zjistit přítomnost vyšších harmonických frekvencí -> po veškerém popsaném nastavení v *Source Control* menu se klikne na [X] vpravo nahoře -> zpět v hlavním menu se poté klikne na ikonu *Cell Control* -> zapne se *POTENCIOSTAT* na [ON] -> v tom samém menu se nastaví *FREQUENCY [1 kHz]*, *AMPLITUDE [500 mV, doporučená hodnota 5 – 50 mV]*, *COUNT [1]* -> poté se zobrazí v grafu impedance a fáze, ve vedlejších grafech se zobrazí průběh střídavého napětí a proudu a spektrum ke střídavému napětí a proudu -> [X] vpravo nahoře -> posledním krokem je nastavení *Sweep & EIS setup* z hlavního menu -> kde se zvolí četnost (délka úseku frekvence, kde přístroj provede měření) měření *sweep mode lower limit [1 Hz]*, počáteční

hodnota měření *start* [200 kHz], konečná hodnota měření *upper limit* [200 kHz] a směr a smyčka měření (od nejvyšší frekvence k nejnižší frekvenci nebo od nejvyšší frekvence přes nejnižší frekvenci zpět k nejvyšší frekvenci) -> [X] vpravo nahoře -> po veškerém nastavení lze měření spustit z hlavního menu kliknutím na ikonu *Start Dynam. TF* -> průběžné grafy střídavé intenzity, střídavého proudu a spektra intenzity a proudu jsou zobrazeny v horní části -> u výsledného grafu bylo potřeba přenastavit zobrazení fáze tak, že se kliklo na *select diagram* -> *Bode* (v nabídce je možnost zvolit více grafů např. Nyquistův atd.) -> [√] -> zadalo se požadované rozmezí [0 – 360 °] -> poté je data možné uložit přes *export ascii list* -> ve formátu *save as a textfile* -> graf lze uložit přes *export drawing* -> *save as EMF file* -> do vybrané složky. Lze ukládat i v jiných formátech, pro tuto práci byl zvolen formát textového dokumentu pro ukládání dat, aby se data mohla zpracovat v Excelu a vytvořit vlastní grafy. Uložené grafy z programu slouží pro přehled a kontrolu. V hranatých závorkách jsou uvedeny hodnoty, které byly nastaveny pro měření.

Při vkládání větší amplitudy signálu střídavého napětí než je doporučená hodnota pro měření pomocí impedanční spektroskopie může dojít k šumu a tím pádem k nepřesnému neměření. Doporučená vkládaná amplituda střídavého signálu u impedanční spektroskopie je v rozmezí 5 – 10 mV, při měření však byla vkládána amplituda 500 mV. Průběh odezvy střídavého proudu a napětí byl poté sinusový, takže v tomto ohledu nebyla amplituda příliš vysoká, protože jinak by průběh odezvy nebyl sinusový – přes vysokou amplitudu by „přeskakoval“ a nestíhal by ji přesně kopírovat. V grafu zobrazení nespojitého spektra je však znát, že zde došlo k odezvě vyšších harmonických frekvencí. Pokud první harmonický signál ve spektru výrazně převyšuje všechny ostatní, tak se nemusí přehnaně vysoká amplituda řešit, protože výsledné grafy jsou zpracovány na základě prvního harmonického signálu. Není však na škodu držet se doporučené hodnoty vkládané amplitudy.

Důležitým získaným parametrem při měření impedanční spektroskopie je kapacita, která odpovídá elektrické kapacitě na fázovém rozhraní. Kapacitance je závislá na frekvenci, fázový posun se rovná -90° . Při kapacitanci dochází k separaci nábojů. Impedance odpovídá velikosti amplitudy odpovídajícího signálu. Impedance se s frekvencí nemění, fázový posun je nulový. Impedance se vypočítá vydělením vkládaného napětí vzorkovaným proudem.

Vzorek 1

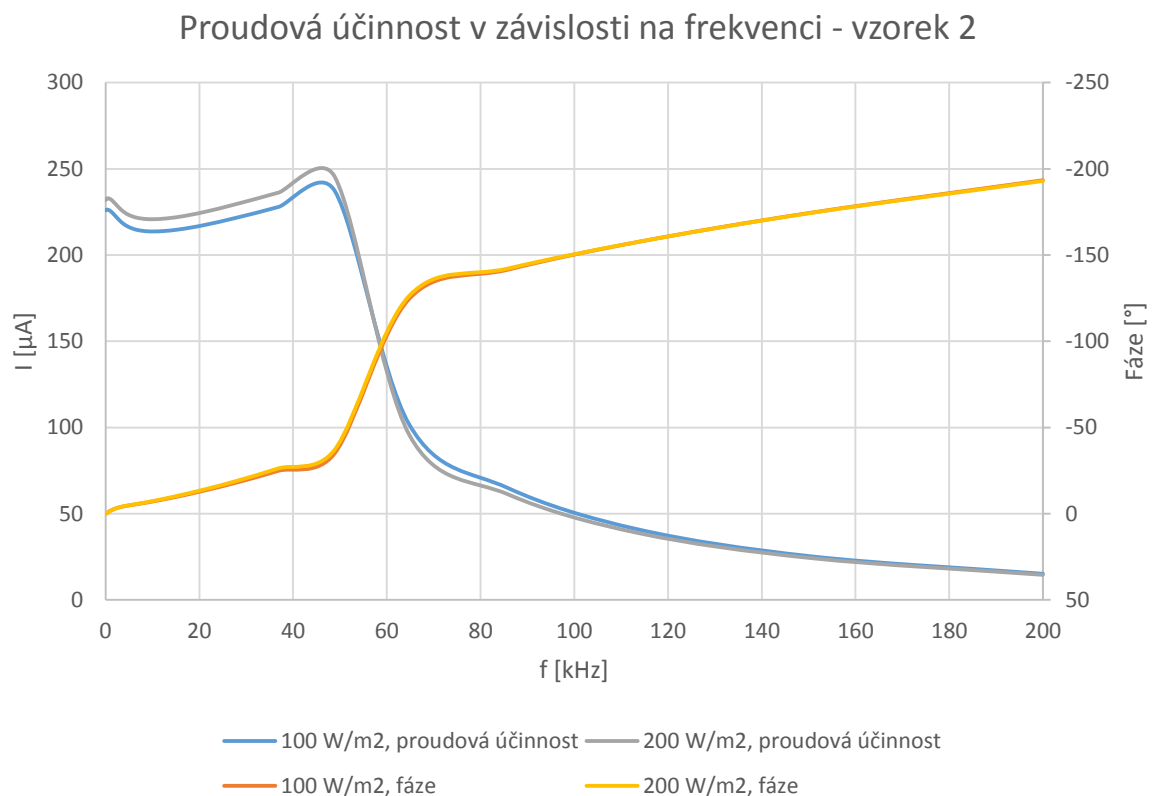


Graf 2.20: Proudová účinnost v závislosti na frekvenci - vzorek 1

V grafu 2.20 je zobrazena proudová účinnost a fáze v závislosti na frekvenci. Modrá křivka znázorňuje proudovou účinnost při osvětlení intenzitou záření 100 W/m^2 a nastavení amplitudy světelného záření 400 mV . Amplituda signálu na článku byla nastavena na 500 mV . Křivka je v rozmezí od 150 kHz do zhruba 40 kHz a od 30 kHz do 0 kHz konstantní a to proto, že je poměr výstupu a vstupu konstantní, respektive je frekvence sinusových signálů rovna. V intervalu, kde je proudová odezva téměř nulová a frekvence je konstantní, je frekvence rychlejší než doba do rekombinace nosičů náboje, neboli frekvence je rychlejší než délka života nosičů náboje. Mezi 30 kHz a 40 kHz dochází ke změně fázového posunu, což lze pozorovat jak na červené křivce, tak i na modré křivce. Křivky spolu souvisí. Poté, co začne proudová odezva stoupat je frekvence pomalejší než doba do rekombinace náboje, neboli je frekvence pomalejší než délka života nosičů náboje. Způsob výpočtu rostoucí proudové účinnosti při snižující se frekvenci je pravděpodobně dán rostoucím součtem ploch pod sinusovou křivkou (plošný integrál). Ve vyšších frekvencích je fázový posun nulový, napětí nepředbíhá proud, v již zmiňovaném rozmezí $30 \text{ kHz} - 40 \text{ kHz}$ dochází k postupnému posunu fáze, který se v nižších frekvencích zase ustálí a to na hodnotě okolo -180° . Při fázovém posunu -90° se začne střídavá proudová odezva opožďovat za vkládaným střídavým napětím, článek se začne chovat jako kondenzátor a díky separaci nábojů se v ochuzené vrstvě projevuje kapacita, která je naměřena mezi referenční a testovací elektrodou. U dalšího měření byla zvýšena intenzita záření ze 100 W/m^2 na 300 W/m^2 a též byla změněna amplituda světelného signálu na 100 mV , což snížilo celkovou výslednou hodnotu proudové odezvy

oproti předchozímu měření. Průběh křivek měření při intenzitě záření 300 W/m^2 je podobný jako u měření s intenzitou záření 100 W/m^2 , pouze se zúžilo rozmezí frekvence, kde dochází ke změně fázového posunu na $20 \text{ kHz} - 30 \text{ kHz}$ a v tomto rozmezí začíná být délka života nosičů náboje rychlejší než frekvence. -> Větší amplituda světelného signálu zvýší výslednou hodnotu proudové účinnosti. Z měření plyne, že do frekvence $20 \text{ kHz} - 40 \text{ kHz}$ je rychlost frekvence větší než doba do rekombinace nosičů náboje, poté je naopak kratší doba do rekombinace nosičů náboje než frekvence.

Vzorek 2

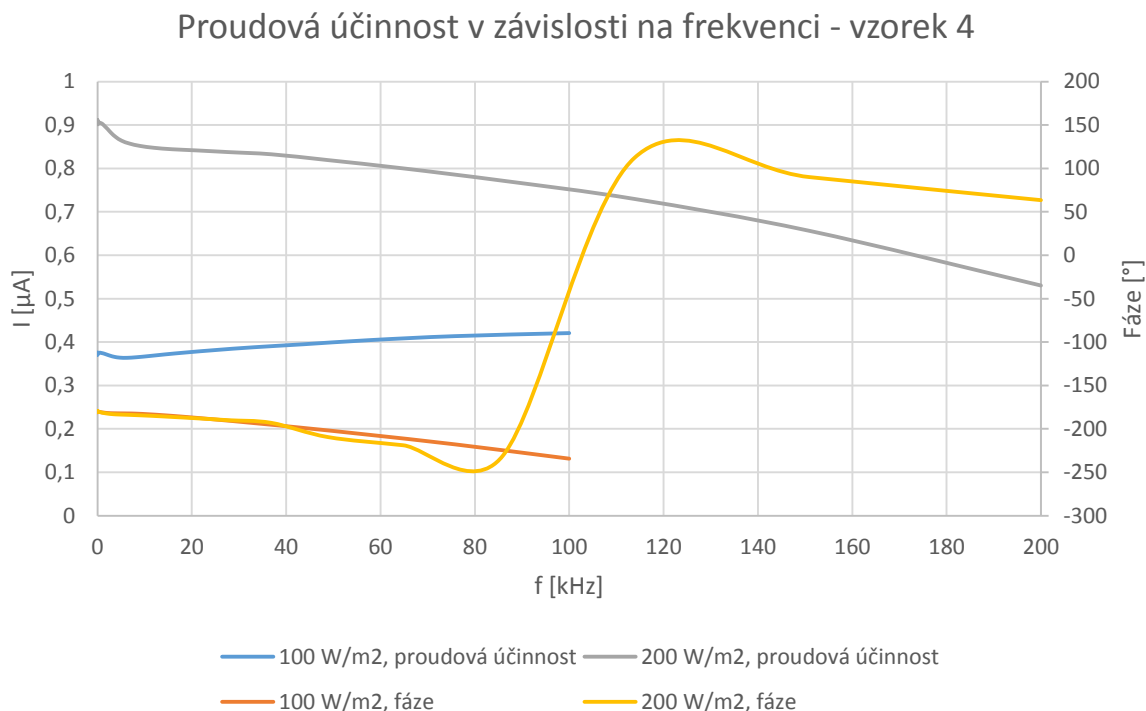


Graf 2.21: Proudová účinnost v závislosti na frekvenci - vzorek 2

U vzorku 2 bylo měření provedeno při nastavení intenzity záření 100 W/m^2 a 200 W/m^2 , jinak bylo vše nastaveno stejně. Na grafu 1.21 lze vidět, že průběhy obou měření jsou téměř shodné. Podle zdroje [43] by se s rostoucí intenzitou záření měla zkracovat délka života nosičů náboje a tím pádem by mělo rychleji docházet k rekombinaci, v našem případě však není vidět ve výsledném grafu žádný rozdíl. Rozdíl intenzity záření nebyl pravděpodobně natolik velký, aby se v měření projevil. Fázový posun se pohybuje ve vyšších frekvencích okolo -180° , se snižující se frekvencí klesá i velikost fázového posunu. Tyto hodnoty fázového posunu jsou dány tím, že byla přehozena polarita na článku. Proud tedy ve vyšších frekvencích lehce zaostává za napětím, článek chová se jako slabý kondenzátor a v rozmezí od 50 kHz do 70 kHz dosáhne fázový posun hodnoty -90° , což je typické pro kondenzátor. Při nižších frekvencích se rychlost změny fázového posunu opět snižuje. Zvyšující se proudová odezva v rozmezí frekvence od 50 kHz do 70 kHz je způsobena tím,

že při snižující se frekvence je délka života nosičů náboje kratší než frekvence. Naopak ve vysokých frekvencích, kde se proudová odezva rovná téměř nule, je frekvence rychlejší než doba do rekombinace nosičů náboje. Výpočet je pravděpodobně proveden součtem plošného integrálu sinusové křivky proudové odezvy.

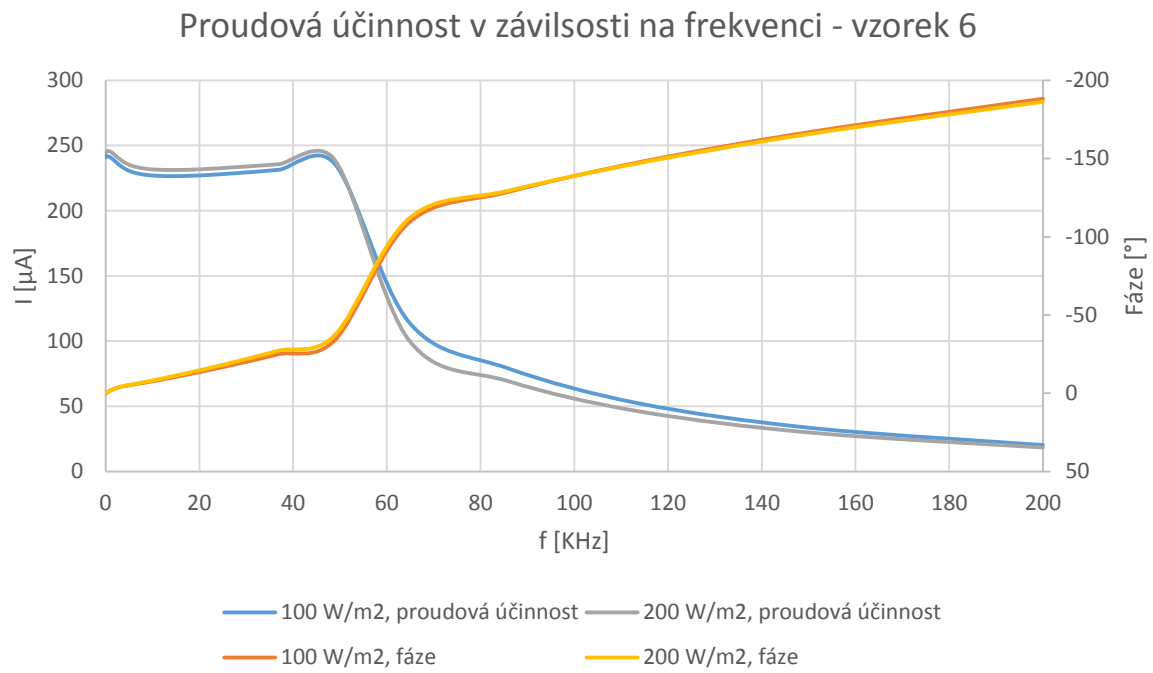
Vzorek 4



Graf 2.22: Proudová účinnost v závislosti na frekvenci - vzorek 4

U vzorku 4 byly opět proměřeny vlastnosti při nastavení intenzity záření 100 W/m^2 a 200 W/m^2 jako u předchozího vzorku 2. Frekvence u prvního měření byla nastavena na hodnotu 200 kHz, u druhého měření bylo vyzkoušeno od 100 kHz. Předpokládá se, že by měl být průběh křivek podobný. Zajímavé je, že oranžová křivka znázorňující fázový posun nezačíná v nule, ale začíná okolo hodnoty 50° a až do frekvence asi 120 kHz stoupá. Může to být způsobeno tím, že před měřením byl článek osvícen nějakou intenzitou, tím pádem generoval proud a po spuštění měření proud předbíhal vkládané napětí. V rozmezí od 80 kHz do 120 kHz dochází k „růstu“ fázového posunu, článek má jistou kapacitu, v nižších frekvencích je fázový posun roven zhruba -180° , kde už se článek jako kondenzátor nechová. Šedá křivka znázorňuje závislost proudové účinnosti na frekvenci, jejíž průběh je se snižující se frekvencí mírně rostoucí, což znamená, že již od počátečních vysokých frekvencí je frekvence přesto pomalejší než doba do rekombinace nosičů náboje a součet plošného integrálu v intervalu 200 kHz – 0 kHz roste, proto je i křivka proudové odezvy rostoucí. Poměr signálů výstupu a vstupu není konstantní, frekvence signálů se rozcházejí.

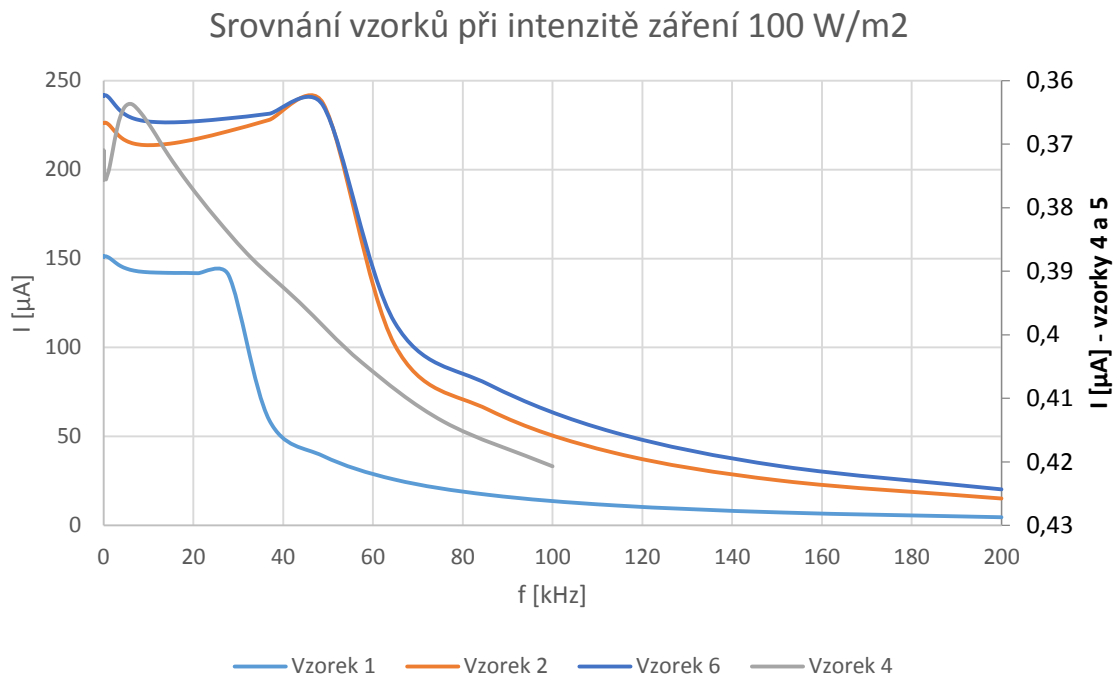
Vzorek 6



Graf 2.23: Proudová účinnost v závislosti na frekvenci - vzorek 6

Vysvětlení grafu a průběhu křivek jsou totožné se vzorkem 2.

Srovnání vzorků



Graf 2.24: Srovnání hodnot dynamického měření proměřených vzorků při intenzitě záření 100 W/m²

V grafu 2.24 je zobrazeno porovnání proudové účinnosti v závislosti na frekvenci proměřených vzorků touto metodou. Proudová účinnost nelze porovnávat s proudem nakrátko naměřeným voltampérovou charakteristikou. Program si při dynamické metodě sám přepočítává intenzitu, kterou je článek ozářen, protože v původních jednotkách byly i W/m². Proto se veličina nazývá proudová účinnost, která se získá vydělením proudu intenzitou záření. Při porovnání jednotlivých vzorků je tedy vidět, že vzorky 2 a 6 vykazují nejlepší hodnoty naopak vzorky 4 a 5 z organických materiálů mají v porovnání s křemíkovými články výsledné hodnoty v nanoampérech. Proudová odezva vzorků 1, 2 a 6 byla ve vyšších frekvencích téměř nulová a to proto, že frekvence byla rychlejší než doba do rekombinace nosičů náboje, v nižších frekvencích pak doba do rekombinace náboje byla rychlejší, součet proudu po křivce byl větší, a proto rostla křivka proudové účinnosti. U vzorku 4 docházelo k růstu proudové odezvy postupně.

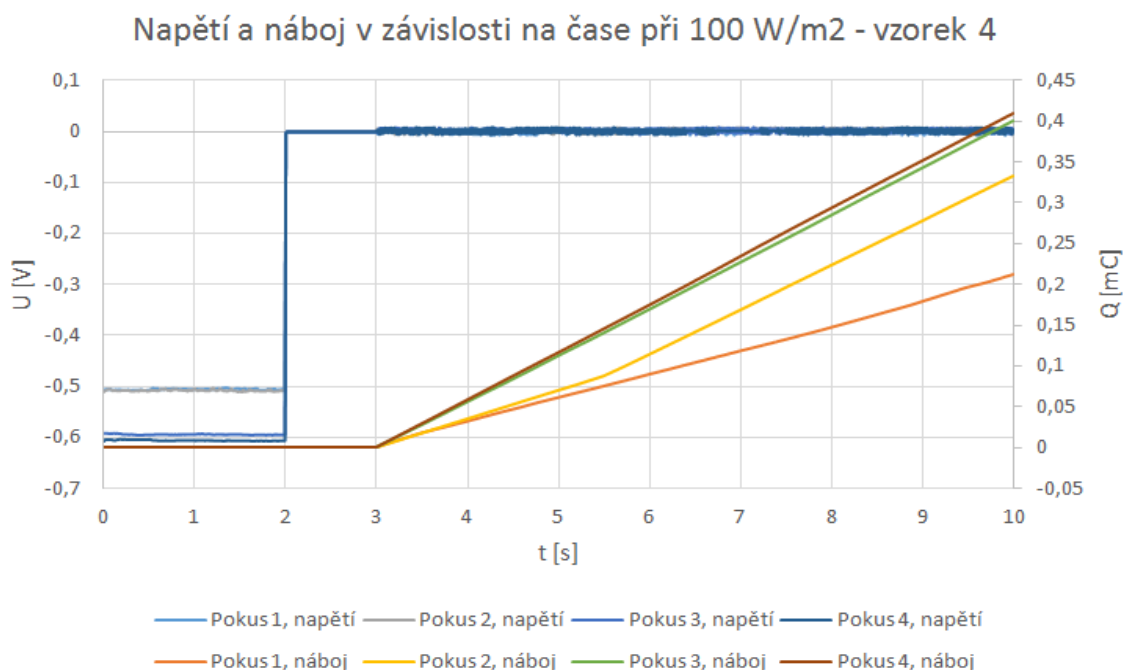
2.5.4 Extrakce náboje

Pomocí této metody se studuje přenos, zachycení a zpětná reakce elektronů. Článek je na určitou dobu osvětlen, poté je osvětlení přerušeno a je možné sledovat úbytek koncentrace elektronů. Koncentrace elektronů exponenciálně klesá s časem.

Pro spuštění měření je třeba nastavit v hlavním menu přes *Setup Q-extraction* -> intenzitu záření [W/m^2] -> požadované cílové napětí *target voltage* [přednastaveno 0 V] -> vybíjecí proud *discharge current* [přednastaveno 400 μA] -> dobu osvětlení článku *light on time* [přednastaveno 2 s] -> dobu přerušení osvětlení *light off time* [přednastaveno 1 s] -> dobu vybíjení *discharge time* [přednastaveno 7 s] -> interval měření náboje *sample time* [přednastaveno 10 ms] -> po tomto nastavení se volba odsouhlasí [✓] vpravo nahoře -> zpět v hlavním menu se klikne na *Start Q-extraction* a tím se spustí nastavené měření -> graf lze uložit přes *Export Graphic* -> ve formátu *save as EMF file* -> do vybrané složky -> data lze uložit přes *Save Data* -> [✓] -> do vybrané složky. Lze využít i ukládání grafů přes *HardCopy* přímo do Wordu.

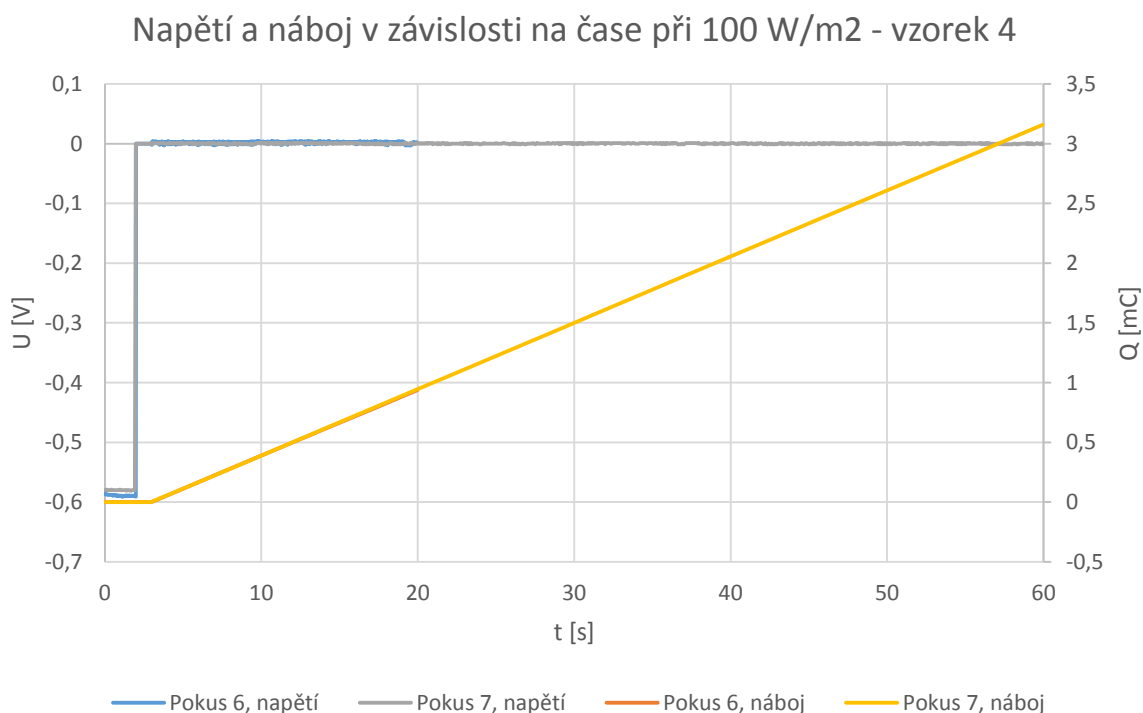
Byly proměřeny pouze 3 vzorky, monokrystalický křemík a organický článek, po zjištění, jaký byl výsledek měření. V práci jsou uvedeny výsledky vzorku 4, u vzorku 2 a 5 jsou výsledky téměř shodné. U měření křemíkových článků vycházely hodnoty po každém měření naprosto jinak. Křivkou byla vždy rostoucí přímka, avšak hodnoty, kterých dosahovala, se extrémně lišily. Tato metoda je vhodná pro barvocitlivé články DSC, protože je reakce elektronů po osvětlení a přerušení osvětlení pomalejší než u křemíkových a organických článků.

Vzorek 4



Graf 2.25: Generované napětí a náboj v závislosti na čase - vzorek 4

V grafu 2.25 je zobrazena závislost napětí a náboje na čase. Po dobu 2 sekund byl článek osvětlen, tudíž generoval napětí, což je viditelné z grafu. Poté bylo na sekundu přerušeno osvětlení a následně byl článek vybíjen nastaveným proudem. U jiných materiálů, například barvocitlivých článků, které mají pomalejší reakci nosičů náboje na změnu osvětlení, by byl průběh křivky zobrazující reakci náboje exponenciální, v našem případě mají testované materiály (jak křemík, tak organické články) velmi rychlou odezvu náboje po přerušení osvětlení a přístroj realizuje měření pouze 1 krát za 10 ms, což je nejmenší možná hranice nastavení. Naše křemíkové a organické články reagují na změnu osvětlení rychleji, než je program schopen zaregistrovat a změřit změnu náboje. V grafu 2.25 lze vidět, že průběh křivky náboje vzorku 4 lineárně roste. Tuto metodu lze využít pro barvocitlivé články. Pravděpodobně zde hraje roli proud, který se v křivkách vyobrazil. Při první pokusu se křivka zobrazující náboj nachází nejnižší, při druhém pokusu se stejným nastavením křivka v grafu roste pod větším úhlem než předešlá křivka, a při posledních dvou pokusech už je křivka ve stejné úrovni. Je možné, že rozdílnou zvyšující se polohu křivek za stejných podmínek způsobilo setrvání nábojů v článku z předešlého měření.



Graf 2.26: Generované napětí a náboj v závislosti na čase (delší vybíjecí čas) - vzorek 4

Při tomto pokuse se nastavila delší vybíjecí doba na 17 sekund, poté na 57 sekund, což ukázalo, že křivka znázorňující náboj by takhle pokračovala donekonečna a o ničem nevyhovívá.

Dále bylo vyzkoušeno měření s nastavením nižším i vyšším vybíjecím proudem a následně začal článek vykazovat extrémně nízké napětí. Napětí na článku bylo místo předešlých -0,6 V pouze 0,2 V a hodnota náboje se po přednastavených celkových 10 sekundách rovnala pár desítek nanocoulombu oproti původním 0,4 mC.

Veškeré následující naměřené výsledky se nedaly použít. Též byla nastavována různá amplituda signálu na světelném zdroji, což způsobovalo větší naměřené napětí na článku.

2.5.5 Proudová odezva na jednotlivé vlnové délky spektra

Při této metodě byly proměřeny vzorky různými vlnovými délkami v rozmezí od 290 nm do 1020 nm, to znamená, že články byly osvětleny ultrafialovým, viditelným a infračerveným zářením ze světelného zdroje TLS03 (1366 serial number). Každý materiál reaguje jinak na světelné záření a generuje největší proud při odlišných vlnových délkách než jiné materiály.

Pro měření proudové spektrální odezvy se používá stejný program jako pro předešlé metody, ale má jiné nastavení a uživatelské rozhraní. Spuštění programu je následující. Soubor na ploše *THALES USB* -> *Start* -> ikonka vlevo nahoře [*Z*] -> *Optional Methods* -> *Photo-Electrochemical Tests* -> *Photocurrent Spectroscopy* -> poté se zobrazí hlavní menu, kde lze nastavit plochu článku *Cell Area* [přednastaveno 400 mm²] -> hlavní vlnovou délku *Default* [přednastaveno 550nm] -> proměřené rozmezí vlnové délky *Range* [přednastaveno 290 – 1020 nm] -> *Resolution* [-] -> doba změny měření v určité vlnové délce *Settling* [přednastaveno 1 s] -> intenzitu záření lze zvolit po kliknutí na ikonu *Selective Intensity* v hlavním menu -> intenzita záření se nastavuje v procentech *level* [100 %] -> [✓] vpravo nahoře -> *Yes* -> po zadání procent přístroj sám určí intenzitu.

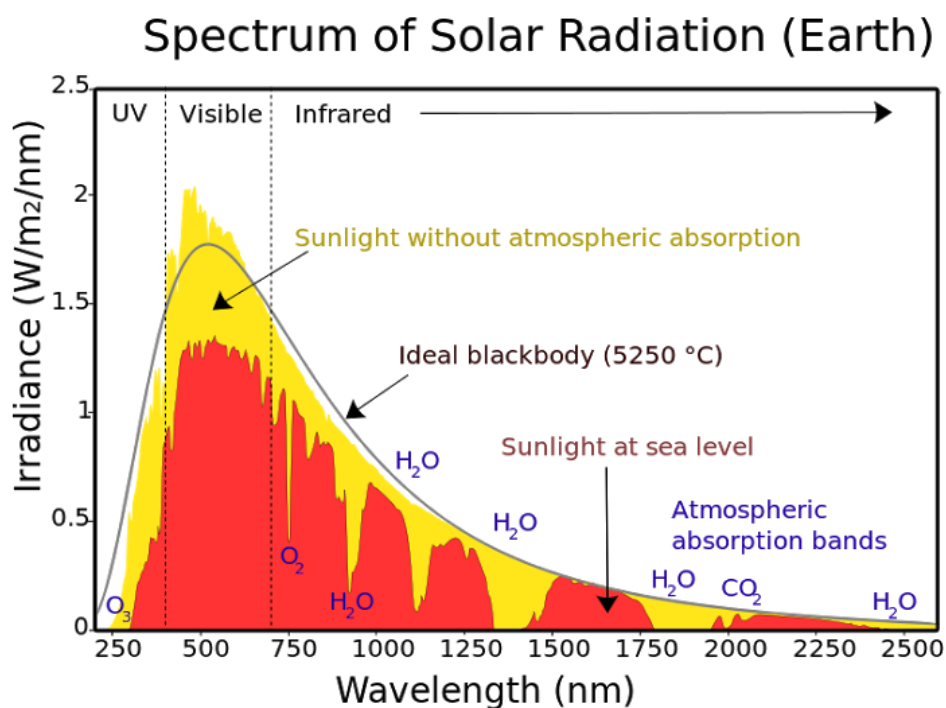
Při měření se po zadání intenzity záření 100 % programem nastavila hodnota 87 W/m². Protože byl problém se zapojením světelného zdroje, byly proměřeny pouze 4 vzorky. Při posledním pokusu o zapojení světelného zdroje program psal chybu ohledně „driveru“, nepomohla ani kalibrace (i když se tento zdroj kalibruje automaticky).

Po připojení světelného zdroje byl článek přiblížen zhruba 1 mm od zdroje avšak tak, aby se nedotýkal, protože by se mohl poškodit zdroj. Bylo zjištěno, že vzdálenost článku od zdroje má vliv na výsledky, při zvětšující se vzdálenosti článku od zdroje je proudová odezva článku na spektrum menší. Dále bylo vyzkoušeno, jaký vliv má na výsledky změna nastavené plochy, protože plocha článku je 20 mm x 20 mm, ale po maximálním přiblížení je osvětleno přímým světlem zhruba poloviční plocha článku. Po zadání reálné plochy článku je proudová odezva mnohem menší, protože je osvětlena jen část článku a zbylá část tedy proud negeneruje, ale spotřebovává. Kdežto při zadání rozměru plochy zhruba ve velikosti zdrojového paprsku byl výsledný proud větší, než při nastavení reálné plochy. Pro hodnocení této metody nemá vliv velikost proudové odezvy (zda se pohybuje v desítkách řádů míň nebo výš), ale spíše samotná křivka, která zobrazuje, jak článek generuje proud při určitých vlnových délkách. Pro měření byla tedy zvolena reálná plocha článku.

Program zobrazuje graf, kde na ose Y je proudová účinnost a na ose X vlnová délka. Proudovou účinnost program přepočítává podle vzorce (2.1), kde *I* je fotoproud, *E* je intenzita záření, kterou byl článek osvětlen a *A* je plocha článku. Ve výsledném grafu jsou tedy programem zohledněny veličiny intenzita záření a plocha článku.

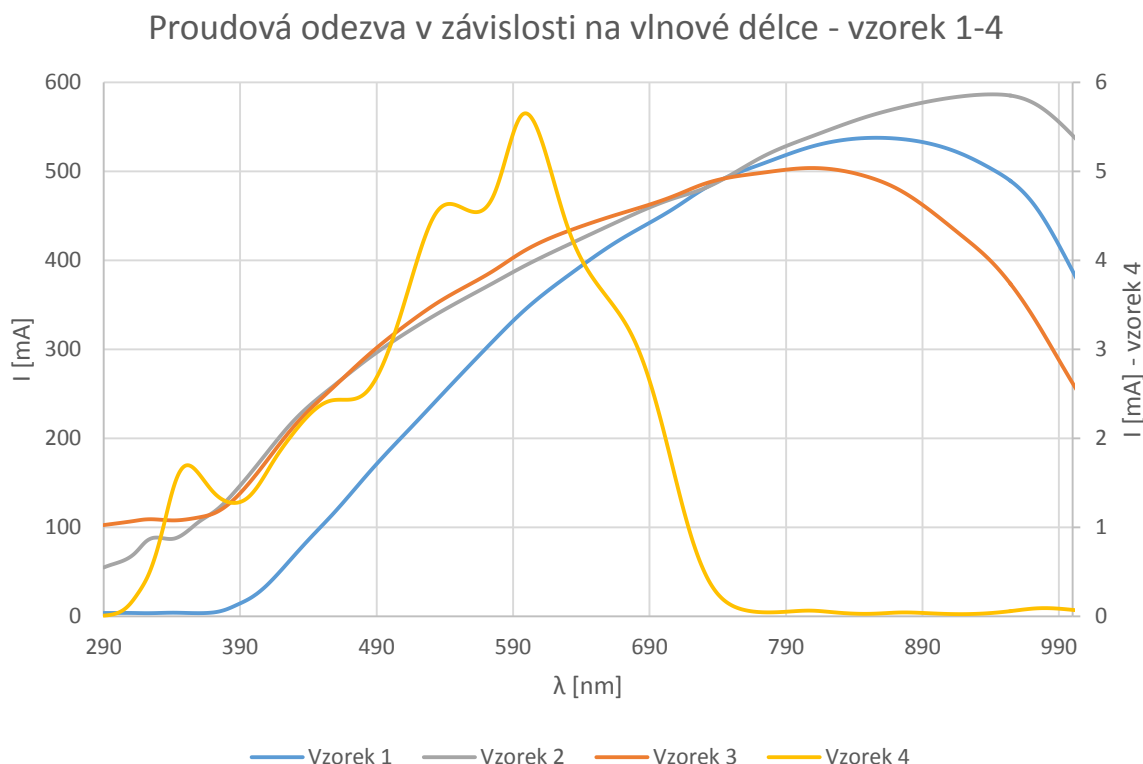
$$\mu = \frac{I}{E \cdot A} \quad (2.1)$$

Pro výpočet celkové účinnosti fotovoltaického článku v závislosti na vlnové délce by bylo potřeba znát hodnoty odezvy napětí pro různé vlnové délky. Poté je potřeba přepočítat výkon generovaný článkem při různých vlnových délkách na plochu článku na m^2 a přepočítat intenzitu záření 87 W/m^2 na intenzitu záření Slunce, což je 1000 W/m^2 . Následně lze podle obrázku 2.8 přibližně určit výkon slunečního záření dopadajícího na zemský povrch a porovnat s výkonem článku při jednotlivých vlnových délkách a na základě toho vypočítat, jaká je účinnost přeměny sluneční energie na elektrickou energii v závislosti na jednotlivých vlnových délkách.



Obrázek 2.8: Spektrum slunečního záření dopadajícího na zemský povrch vyjádřené ve výkonu v závislosti na vlnové délce [48]

Srovnání proudové odezvy vzorků v závislosti na vlnové délce



Graf 2.27: Srovnání proudové odezvy vzorků v závislosti na vlnové délce

V grafu 2.27 je zobrazena proudová odezva v závislosti na vlnové délce. Vzorky 1, 2 a 3 jsou články monokrystalického křemíku, proto mají podobný průběh. Zvláštní je, že každý vzorek z monokrystalického křemíku má maximální proudovou odezvu při jiné vlnové délce. Pokud se jedná o stejný materiál, tak by mělo být maximum v jednom bodě určité vlnové délky. Vzorek 3 má maximum ještě v oblasti viditelného světla, vzorky 1 a 2 mají maximum už v oblasti infračerveného záření. Všeobecně křemík vykazuje maximální účinnost při osvětlení červeným světlem. Vzorek 4 má asi 600x menší hodnotu proudové odezvy v závislosti na vlnové délce. To však nic neznamená, protože toto měření nám hlavně dává představu o tom, na jakou vlnovou délku různé materiály reagují. V našem případě má organický článek maximální proudovou odezvu v oblasti vlnové délky se žlutooranžovou barvou světla. Pro fotovoltaické články znamená výsledek organického článku velkou výhodu, protože mají maximum ve viditelném světle, kdežto křemíkové články mají maximum spíše v oblasti ultrafialového záření.

Bylo zkoušeno i nastavení frekvence měření na 1 Hz a počet měření ve frekvenci na 4, ale výsledek měření byl totožný s předešlým nastavením frekvence 300 Hz po 100 měřeních. Dále byla chybně vkládána amplituda střídavého signálu v hodnotě 10 mA, ale program se zachoval tak, že rozpoznal nesprávné nastavení a před samotným měřením amplitudu zrušil. Tudíž vkládání amplitudy střídavého signálu nebylo zaznamenáno.

Závěr

V úvodu diplomové práce byla zpracována teoretická část k tématu „Charakterizace optických a energetických vlastností fotovoltaických článků“, kde je stručně zmíněn vývoj fotovoltaiky, popsán princip práce fotovoltaických článků a materiály, z nichž se fotovoltaické články vyrábějí. V následující části bylo popsáno elektromagnetické záření, pomocí něhož přístroj CIMPS měří vlastnosti fotovoltaických materiálů. Dále je objasněn princip elektrochemické impedanční spektroskopie.

Hlavním cílem diplomové práce experimentální části bylo proměřit vzorky fotovoltaických článků pomocí měřících metod, jež umožňuje přístroj CIMPS a následně pak naměřené výsledky vyhodnotit. Celkem bylo použito 6 vzorků, z nichž vzorky 1-3 byly vyrobeny z monokrystalického křemíku, vzorky 4 a 5 z organického materiálu a vzorek 6 z polykrystalického křemíku. Podle odborné literatury vykazují nejlepší hodnoty fotovoltaické články z monokrystalického křemíku. V práci jsou vyhodnoceny použité vzorky, vyhodnocení je shrnuto v následujícím textu.

Vzorky byly proměřeny pěti různými metodami - voltampérovou charakteristikou, statickým měřením, dynamickým měřením, extrakcí náboje a spektrálním měřením. V práci je u jednotlivých metod popsán postup nastavení programu pro jejich měření.

U měření voltampérové charakteristiky byly použity dva světelné zdroje, a to diodový a wolframový zdroj. Diodovým zdrojem byly vzorky proměřeny intenzitou záření v rozmezí $100 \text{ W/m}^2 - 300 \text{ W/m}^2$. Tento zdroj by měl umožnit nastavení intenzity záření až na 420 W/m^2 , avšak po nastavení intenzity záření 310 W/m^2 se zdroj vypnul, zřejmě z důvodu vnitřní ochrany před přetížením. Při srovnání vzorků při intenzitě záření 300 W/m^2 byl největší výkon naměřen na polykrystalickém článku v hodnotě $30,25 \text{ mW}$, naopak nejmenší výkon byl naměřen na organickém článku vzorku 4 v hodnotě $0,1 \text{ mW}$. Největší účinnost byla vypočítána u vzorku 1, protože článek měl největší hodnotu faktoru plnění a též byla celá plocha článku osvětlena. U ostatních křemíkových článků byla vždy určitá část plochy zastíněna, tudíž byl menší faktor plnění a na základě toho i menší účinnost článku. Wolframovým světelným zdrojem byly proměřeny vzorky 1, 2, 4 a 6, některé byly osvětleny intenzitou záření až 5000 W/m^2 . Srovnání článků bylo provedeno při intenzitě záření 1000 W/m^2 , při kterém byl největší výkon naměřen u vzorku 2 z monokrystalického křemíku a poté na vzorku 6 z polykrystalického křemíku. Nejnižší účinnost i výkon vykazoval vzorek 4 z organického materiálu. Bylo prokázáno, že články z organického materiálu vykazují nejlepší hodnoty při intenzitě záření okolo 500 W/m^2 , poté jejich výkon klesá. Při srovnání světelných zdrojů voltampérových charakteristik bylo zjištěno, že křemíkové články vykazují lepší hodnoty při osvětlení wolframovým zdrojem z důvodu spojitého složení světla, které wolframové zdroje vyzařují. Organické články vykazovaly lepší hodnoty při stejné intenzitě záření u diodového zdroje, protože reagují lépe při nižších frekvencích než křemík. Vypočítaná účinnost se nedá porovnávat s reálnými laboratorními či komerčními výsledky, protože zdroj pravděpodobně ozařoval článek větší intenzitou, než byla původně nastavena. To bylo způsobeno zřejmě tím, že vyzařovaný paprsek byl příliš úzký a neozařoval

dostatečně senzor zpětné vazby a na článek tedy vyzařoval větší intenzitu. Taktéž se naměřené hodnoty článků nedají porovnávat s již komerčně známými hodnotami, protože vzorky byly různých rozměrů a část jejich ploch byla zastíněná.

Při statickém měření byla zjišťována proudová odezva na proměřovaném článku při rostoucí intenzitě záření. Generovaný proud při tomto způsobu měření odpovídal proudu nakrátko, který byl zjištěn při měření voltampérové charakteristiky. Srovnání bylo provedeno při stejných hodnotách intenzity záření. Největší proudovou odezvu vykazoval vzorek 3 a 6 (monokrystalický a polykrystalický článek), naopak nejmenší proudovou odezvu vykazovaly vzorky 4 a 5 z organického materiálu. Pokud byl interval proměřované intenzity nastaven až poté, kdy bylo v hlavním menu zapnuto osvětlení článku, bral program tuto hodnotu jako výchozí. Při měření od nulové intenzity záření až do této „výchozí“ intenzity byl tedy proud spotřebováván z důvodu nedostatečného osvětlení článku. Po překročení této hranice intenzity byl článek osvětlen dostatečně velkým zářením, a proto již proud generoval. Tato metoda však poskytuje pouze základní informace proudové odezvy článku v závislosti na velikosti intenzity záření.

Při dynamickém měření byla zjišťována proudová účinnost a fáze v závislosti na frekvenci záření. Byly proměřeny vzorky 1, 2, 4 a 6. Výsledky vzorků 1, 2 a 6 byly velmi podobné. Fázový posun byl při vysoké frekvenci téměř nulový a konstantní, mírně stoupal. Se snižující se frekvencí rostla fáze, až dosáhla úhlu -90° a na článku se projevila kapacita. V nižších frekvencích se úhel fázového posunu rovnal -180° . U vzorku 4 se kapacita projevila již ve vyšších frekvencích než u ostatních měřených vzorků, to znamená, že proud se začal zpožďovat za napětím už při vyšších frekvencích, než u ostatních vzorků. Proudová odezva vzorků 1, 2 a 6 byla ve vyšších frekvencích téměř nulová a to proto, že frekvence byla rychlejší než doba do rekombinace nosičů náboje. V nižších frekvencích pak doba do rekombinace náboje byla rychlejší, součet proudu po křivce byl větší, a křivka proudové účinnosti tedy rostla. U vzorku 4 docházelo k růstu proudové odezvy postupně. U dynamického měření se též dá změřit napětí v závislosti na frekvenci, to však není součástí diplomové práce. Toto měření umožňuje i zobrazení závislosti imaginární proudové složky a reálné proudové složky pomocí Nyquistova grafu, které též není součástí této práce.

Metoda extrakce náboje zjišťuje úbytek koncentrace elektronů po přerušení osvětlení většinou u barvocitlivých článků. V případě křemíkových a organických článků náboj reagoval rychleji, než přístroj realizoval měření, proto toto měření o ničem nevyovídá.

V posledním měření se zjišťovala reakce vzorků na různé vlnové délky. Při nastavení 100 % intenzity záření program nastavil hodnotu na 87 W/m^2 . Byly proměřeny pouze články z monokrystalického křemíku a organického materiálu. Články z monokrystalického křemíku mají podobný průběh, avšak je zajímavé, že i ačkoli se jednalo o stejný materiál, měly jednotlivé články maximum v jiné vlnové délce. Z grafu plyne, že monokrystalický křemík nejlépe reaguje na viditelné světlo u hranice infračerveného záření. Organický článek má maximální proudovou odezvu v oblasti vlnové délky se žlutooranžovou barvou světla. Výsledky organických článků jsou oproti křemíkovým článkům v tomto ohledu příznivější,

protože mají maximum ve viditelném světle, zatímco křemíkové články mají maximum spíše u oblasti ultrafialového záření.

V diplomové práci tedy byly proměřeny určité vzorky měřicím přístrojem CIMPS. Na základě zkušeností s výše uvedeným lze konstatovat, že přístroj sám o sobě poskytuje mnoho kvalitních měřicích metod, avšak kvůli nesrozumitelnému softwaru a nedostatečným úvodním informacím nebylo od počátku užívání přístroje možné provést všechna plánovaná měření. V manuálu nebyl dostatečně popsán způsob nastavení pro fotovoltaické měření, byl problém s nastavením světelných zdrojů a jejich kalibrací, dále je těžké předpokládat, jak se přístroj bude chovat při různých operacích. Následujícím uživatelům proto doporučuji důkladné předchozí odborné zaškolení pro usnadnění a správné využívání přístroje. Z mých poznatků při proměřování článků je vhodné používat testovací rozměr 400 mm².

Přínosem této diplomové práce je prvotní odzkoušení nově pořízeného přístroje za pomoci použití různých optických měřicích metod, zjištění, jak se přístroj chová při různých operacích a doporučení optimálních podmínek pro přesnější měření vlastností fotovoltaických materiálů.

Použitá literatura

- [1] Fotovoltaické články - historie a současné trendy vývoje. *ASB-portal.cz: odborný stavební portál* [online]. 2003 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/fotovoltaicke-clanky-historie-asoucasne-trendy-vyvoje>.
- [2] BENDA, Vítězslav. *Fotovoltaické články: historie, současný stav a trendy*. ČVUT Praha, 2006, 25 s.
- [3] Solární články z krystalického křemíku: základní technologie současné fotovoltaiky. BENDA, Vítězslav. *tzbinfo: Technická zařízení budov* [online]. ČVUT Praha, 2006 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>.
- [4] KUSALA, Jaroslav. *Solární energie: Fotovoltaický jev* [online]. 2006 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/solar.htm>.
- [5] Fotovoltaika boduje: světový výkon solárních elektráren se může v příštích čtyřech letech až ztrojnásobit. In: *Nazeleno.cz: Chytrá řešení pro každého* [online]. 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/aktualne/fotovoltaika-boduje-svetovy-vykon-solarnich-elektraren-se-muze-v-pristich-ctyrech-letech-az-ztrojnaso-bit.aspx>.
- [6] FEJFAR, Antonín. Fotovoltaika druhé a třetí generace. *tzbinfo: technická zařízení budov* [online]. Fyzikální Ústav AV ČR, 2006 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3506-fotovoltaika-druhe-a-treti-generace>.
- [7] VANĚK, Jiří, Petr KŘIVÍK a Vítězslav NOVÁK. *Alternativní zdroje energie: Fotovoltaické systémy*. Brno: VUT, 2006, s. 22-77.
- [8] Fotovoltaika. *Energia zo slnka* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.ezos.sk/fotovoltaika.html>.
- [9] Fotovoltaika: Alternativní technologie - amorfní křemík. *SOLARENVI* [online]. 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/technicke-informace/alternativni-technologie-amorfni-kremik/>.
- [10] TYAGI, V.V., Nurul A.A. RAHIM, N.A. RAHIM a Jeyraj A./L. SELVARAJ. Progress in solar PV technology: Research and achievement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2013, vol. 20, s. 443-461 [cit. 2014-12-16]. DOI: 10.1016/j.rser.2012.09.028. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112005291>.
- [11] ČERNÝ, Jaroslav. *HODNOCENÍ PROVOZU MALÝCH FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN S PŘIPOJENÍM DO SÍTĚ NN*. Brno, 2010. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [12] KRONDOL. Kde se bere monokrystalický křemík? Tažení monokrystalů křemíku Czochralského metodou. *Materiálová věda* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://materialovaveda.blogspot.cz/2011/07/kde-se-bere-monokrystalicky-kremik.html>.

- [13] The big "C" in CIMPS. *ZAHNER: scientific instrumentation for Photonics and Electrochemistry* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.zahner.de/114-0-The-big-C-in-CIMPS.html>.
- [14] Photoelctrochemistry. *ZAHNER: scientific instrumentation for Photonics and Electrochemistry* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://zennium.de/105-0-Photoelectrochemistry.html>.
- [15] Sensors. *MDPI: Open Acess Journals* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.mdpi.com/sensors/sensors-13-16129/article_deploy/html/images/sensors-13-16129f3-1024.png.
- [16] Effects of Sonication on EIS Results for Zinc Alkaline Batteries. *ECS Electrochemistry Letters* [online]. 2013 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://eel.ecsdl.org/content/2/9/A89/F2.large.jpg>.
- [17] TATARKOVIČ, Michal, Gabriela BRONCOVÁ a Martin KRONĎÁK. ELEKTROIMPEDANČNÍ SPEKTRO- SKOPIE A JEJÍ VYUŽITÍ V CHEMICKÉ ANALÝZE. In: *Chem. Listy*. Praha: VŠCHT Praha, 2012, s. 1067-1074.
- [18] KYNCLOVÁ, Hana. *CHARAKTERIZACE NANOSTRUKTUROVANÝCH ELEKTROD PRO ELEKTROCHEMICKÉ BIOSENZORY*. Brno, 2012. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [19] ČERNOŠEK, Michal. *IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE ORGANICKÝCH VODIČŮ A POLOVODIČŮ*. Brno, 2014. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [20] BISQUERT, Juan a Francisco FABREGAT-SANTIAGO. IMPEDANCE SPECTROSCOPY: A GENERAL INTRODUCTION AND APPLICATION TO DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS.
- [21] SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ. *VÝUKOVÝ PORTÁL GYMNÁZIA* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/11_elmag/11_elmag.htm.
- [22] PŘEDMĚTOVÁ KOMISE FYZIKY. *Elektromagnetické spektrum: Poznámky & ilustrace*. Liberec, 2006. Honsoft Verze 1.0.
- [23] Vytápíme plynem. *Tzbinfo: technická zařízení budov* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/docu/clanky/0058/005802o10.jpg>.
- [24] *Techmania: Science Center* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/data/fil_4520.gif.
- [25] ŠKORPÍK, Jiří. Sluneční záření jako zdroj energie. *TRANSFORMAČNÍ TECHNOLOGIE* [online]. 2013 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/slunecni-zareni-jako-zdroj-energie.html>.
- [26] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila

- Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [27] Infračervení spektroskopie. *Cvičení z vybraných fyzikálně-chemických metod* [online]. 2004 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://fch.upol.cz/skripta/zfcm/ir/ir_teorie.htm.
- [28] Infračervená spektroskopie. *LABORATOŘ MOLEKULOVÉ SPEKTROSKOPIE* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm#Techniky>.
- [29] MICHALČÁKOVÁ, Iveta. *Spektroskopické metody charakterizace materiálů (UV/VIS, FTIR)*. Zlín, 2008. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [30] MILDE, David. *OPTICKÁ EMISNÍ SPEKTROMETRIE: ATOMOVÁ EMISNÍ SPEKTROMETRIE*. 2010, 11 s.
- [31] FIŠEROVÁ, Gabriela. *Spektrofotometr - metodika a možnosti praktického využití*. Brno, 2013. Bakalářská práce. MASARYKOVA UNIVERZITA.
- [32] ŠVEJDA, Martin. *FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK*. 7 s.
- [33] KŘIVÍK, Petr a Jiří VANĚK. *Obnovitelné zdroje energie*. Brno, 77 s.
- [34] Germanium - Ge. [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://mail.zsebenese.opava.cz/tabulka/ge.html>
- [35] Germanium. *Periodická tabulka* [online]. 2009 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/32.html>
- [36] GERMANIUM, Ge. *Almaz Optics, Inc.* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.almazoptics.com/Ge.htm>
- [37] KLIMEŠOVÁ, Marie. *APLIKACE SPEKTROFOTOMETRŮ*. Brno, 2011. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [38] FOWLES, Grant. *Introduction to modern optics*. 2. vyd. New York: Dover Publications, 1975, 328 s. ISBN 978-0-486-65957-2.
- [39] JANDORA, Radek. *VLNOVÉ VLASTNOSTI SVĚTLA. Neoficiální internetová fakulta všeho možného* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://radek.jandora.web.cz/f19.htm>.
- [40] Thales Software Package. *ZAHNER: scientific instrumentation for Photonics and Electrochemistry* [online]. 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.zahner.de/71-0-Thales-Software-Package.html>.
- [41] ZAHNER. *Catalog: Scientific Instrumentation for Photons & Electrochemistry*. Germany, 2013.
- [42] LÁNÍK, Lukáš. *I-U CHARAKTERISTIKY FOTOVOLTAICKÝCH MODULŮ SPOJOVANÝCH PARALELNĚ A DO SÉRIE*. Brno, 2011. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.

- [43] METROHM AUTOLAB B.V. *Photovoltaics: Part 3 – Dye sensitized solar cells, IMVS and IMPS measurements*. Helsinki, 2012, 4 s.
- [44] FOTOVOLTAIKA: Solární (fotovoltaické) články. SKUPINA ČEZ [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>.
- [45] DUFFY, N. W., L. M. PETER, R. M. G. RAJAPAKSE a K. G. U. WIJAYANTHA. A novel extraction method for study of electron transport and interfacial transfer in dye sensitised nanocrystalline solar cells. *ELSEVIER: electrochemistry communications*. 2000, s. 658-662.
- [46] *Assets.newport* [online]. [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://assets.newport.com/web600w-EN/images/36712.gif>.
- [47] ZAHNER. *Manual: Chopped Light Voltammetry*. Germany, 2013, 12 s.