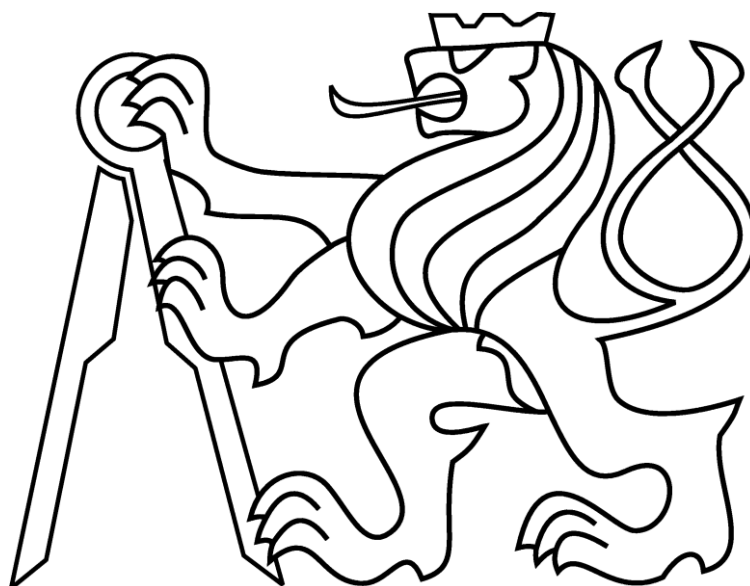


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická



## Diplomová práce

### **Spektrální citlivost fotovoltaických článků**

Spectral sensitivity of PV Cells

**Bc. Svatopluk Vilhelm**

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina Ph.D.

2015



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Svatopluk Vilhelm**

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Název tématu česky: **Spektrální citlivost fotovoltaických článků**

Název tématu anglicky: **Spectral Sensitivity of PV Cells**

### Pokyny pro vypracování:

1. Sumarizujte zjištěné poznatky v oblasti spektrální citlivosti křemíkových fotovoltaických článků (amorfních a krystalických).
2. Pomocí osvitové jednotky proveďte sérii měření při různých spektrech.
3. Zhodnoťte vliv spektra dopadajícího záření na dosažitelné parametry fotovoltaických článků.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Kohraku, Shogo and Kurokawa, Kosuke: New Methods for Solar Cells Measurement by LED Solar Simulator.
- [2] České státní normy: ČSN EN 60904-3, ČSN EN 60904-7, ČSN EN 60904-8
- [3] Bliss, M., Betts, T. R., Gottschalg, R.: An LED-based photovoltaic measurement system with variable spectrum and flash speed.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Hrzina, Ph.D. (K 13113)**

Datum zadání diplomové práce: **11. září 2014**

Platnost zadání do<sup>1</sup>: **29. ledna 2016**



Doč. Ing. Jan Holub, Ph.D.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 11. 9. 2014

<sup>1</sup> Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

## **Prohlášení**

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

V Praze dne 2. ledna 2015

.....

## **Poděkování**

Tímto způsobem vřele děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady a odbornou pomoc při zpracování této práce.

## **Anotace**

Cílem této práce je seznámit čtenáře s teorií týkající se základů optiky, měřením fotovoltaických článků a typů dnes používaných fotovoltaických článků. V druhé části práce je popsána výroba vlastního solárního simulátoru a vlastní měření několika článků. V závěru práce je také zamyšlení nad tím, zda je možné nahradit xenonové a halogenové lampy simulátory s LED diodami jako zdrojem záření.

## **Abstract**

The goal of this work is to introduce the reader with the theories of basic optics, measuring of solar cells and currently used types of solar cells. The second part describes the making of my own solar simulator and measuring of several cells. The conclusion of this thesis is about possibility to replace xenon and halogen lamp simulators with LED diodes as a light source.

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teoretický úvod.....	2
2.1	Optika .....	2
2.1.1	Světlo.....	2
2.1.2	Fotony.....	3
2.1.3	Fotoelektrický jev .....	4
2.1.4	Elektromagnetické spektrum .....	5
2.1.5	Spektrum AM1.5 .....	6
2.2	Fotovoltaické články .....	7
2.2.1	Odrazivost a propustnost .....	7
2.2.2	Vnější kvantová účinnost.....	7
2.2.3	Vnitřní kvantová účinnost .....	8
2.2.4	Výpočet $J_{sc}$ .....	8
2.2.5	V-A charakteristika .....	9
2.2.6	Spektrální odezva .....	10
2.2.7	Faktor spektrální neshody.....	12
2.3	Měření spektrální citlivosti .....	13
2.4	Materiály PV zařízení .....	14
2.4.1	Příklad článku třetí generace.....	15
2.4.2	Typy měřených článků.....	16
3	Příklady prací na téma spektrálních simulátorů .....	19
3.1	Průmyslové řešení .....	19
3.2	Výzkum Tokijské univerzity.....	21
3.3	Výzkum university Leicestershire - UK .....	23
3.4	Diplomová práce Ing. Martina Kubíčka .....	24
4	Solární simulátor .....	25
4.1	Fotky solárního simulátoru.....	26
4.2	Napodobení spektra .....	27

4.3	Homogenita osvětlení .....	28
4.4	Kalibrace simulátoru .....	30
5	Naměřené výsledky .....	32
5.1	Monokrystalický křemíkový článek .....	32
5.1.1	Zhodnocení .....	33
5.2	Polykrystalický solární článek.....	34
5.2.1	Zhodnocení .....	35
5.3	Amorfní krystalický článek .....	35
5.3.1	Zhodnocení .....	36
5.4	CIGS článek.....	37
5.4.1	Zhodnocení .....	38
5.5	Organický článek .....	38
5.5.1	Zhodnocení .....	39
5.6	Rozbor naměřených dat.....	40
5.6.1	Vliv opakovatelnosti a polohy.....	40
5.6.2	Odchylky od teoretické křivky .....	41
6	Závěr .....	43
7	Zdroje.....	44

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Zastoupení viditelného světla v celém spektru záření [2].....	3
Obrázek 2 – V-A charakteristika solárního článku [2].....	9
Obrázek 3 – Porovnání ideální a měřené křivky spektrální odezvy .....	10
Obrázek 4 – Schématické znázornění monochromátoru[13] .....	13
Obrázek 5 – Závislost odezvy různých fotovoltaických článků na vlnové délce[5] .....	14
Obrázek 6 – Náznak průchodu záření třívrstevným PV článkem [5] .....	15
Obrázek 7 – Vnější kvantová účinnost v závislosti na vlnové délce [5].....	16
Obrázek 8 – Solární simulátor Sinus-220 firmy Wavelabs[10].....	19
Obrázek 9 – Spektrum přístroje Sinus 220[10] .....	20
Obrázek 10 – Schéma rozložení diod (Tokio) [11] .....	21
Obrázek 11 – Ukázka křivky sestavené z jednotlivých bodů[11].....	21
Obrázek 12 – Závislost homogenity osvětlení na vzdálenosti [11] .....	22
Obrázek 13 – Závislost intenzity osvětlení na vzdálenosti od článku[12] .....	23
Obrázek 14 – Schéma řešení Ing. Martina Kubíčka.....	24
Obrázek 15 – Rozložení spodní desky s ohledem na homogenitu osvětlení .....	25
Obrázek 16 – Ukázka rozsvícení všech barev .....	26
Obrázek 17 – Solární simulátor.....	26
Obrázek 18 – Solární simulátor .....	26
Obrázek 19 – Spektrometr Red Tide 650 .....	30
Obrázek 20 – Nákres potenciometrů připojených na přepínače .....	31



## Seznam grafů

Graf 1 – Referenční spektrum AM1.5 .....	6
Graf 2 - Porovnání spektra solárního simulátoru se spektrem AM1.5 .....	27
Graf 3 – Intenzita osvětlení pro ultrafialové diody .....	28
Graf 4 - Intenzita osvětlení pro modré diody .....	28
Graf 5 - Intenzita osvětlení pro zelené diody.....	29
Graf 6 – Závislost korekčního faktoru na vlnové délce.....	30
Graf 7 – Porovnání relativní citlivosti pro monokrystalický článek .....	33
Graf 8 – Porovnání relativní citlivosti pro polykrystalický článek.....	34
Graf 9 – Porovnání relativní citlivosti pro amorfnní článek .....	36
Graf 10 – Porovnání relativní citlivosti pro CIGS článek .....	37
Graf 11 – Porovnání relativní citlivosti pro organický článek .....	39
Graf 12 – Porovnání odchylky měření na všech vlnových délkách.....	40
Graf 13 – Porovnání odchylky v závislosti na vlnové délce .....	41

## Seznam rovnic

Rovnice 1 – Výpočet vlnové délky záření.....	2
Rovnice 2 – Výpočet hmotnosti fotonu .....	3
Rovnice 3 – Výpočet hybnosti fotonu .....	4
Rovnice 4 – Výpočet energie fotonu.....	4
Rovnice 5 – Výpočet vnější kvantové účinnosti.....	7
Rovnice 6 – Výpočet vnitřní kvantové účinnosti.....	8
Rovnice 7 – Výpočet zkratového proudu.....	8
Rovnice 8 – Výpočet faktoru plnění.....	9
Rovnice 9 – Výpočet spektrální odezvy .....	11
Rovnice 10 – Výpočet faktoru spektrální neshody .....	12

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Naměřené hodnoty pro monokrystalický článek.....	32
Tabulka 2 - Naměřené hodnoty pro polykrystalický článek .....	34
Tabulka 3 - Naměřené hodnoty pro amorfnní článek .....	35
Tabulka 4 - Naměřené hodnoty pro CIGS článek.....	37
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty pro organický článek.....	38



# 1 Úvod

V dnešní době se většina národů i jednotlivců snaží přejít na ekologičtější získávání elektrické energie. Jedna z možností je získávání energie ze slunečního záření dopadajícího na zemský povrch. Problém nastává při pohledu na malou účinnost fotovoltaických článků. Nízká účinnost fotovoltaických článků vede k potřebě mít zastavěnou velkou plochu pro vybudování fotovoltaického zdroje. V současné době je tak patrná snaha o zvyšování účinnosti fotovoltaického systému. Ruku v ruce s tímto zvyšováním jde i snaha o dosažení co nejdelší životnosti takového systému.

K popisu kvality fotovoltaického článku se využívá několika různých testů. Jedním z nich je měření spektrální citlivosti. Jednoduše, čím větší je spektrální citlivost, tím více solární energie dokáže článek přeměnit na energii elektrickou.

Dodnes se k měření spektrální citlivosti využívaly jako zdroj světla hlavně xenonové a halogenové lampy doplněné buď o kotouč s úzkopásmovými filtry anebo optický hranol se soustavou zrcadel. Tyto zdroje jsou velmi přesné a relativně levné. Jejich nevýhodou je jejich velikost a nemožnost mobility. V dnešní době jsou na trhu dostatečně malé a dostatečně výkonné LED diody, které by teoreticky mohly nahradit neefektivní lampy. Diodový simulátor umělého osvětlení může být levnější a podstatně menší než simulátor s halogenovou nebo xenonovou lampou. LED diody ale nemohou být vyrobeny na jakémkoliv vlnové délce a proto nastává problém s měřením mezi těmito vlnovými délkami.

V první části této práce jsou popsány základy optiky a rozbor tématu měření spektrální citlivosti solárních fotovoltaických panelů. V druhé části je uvedeno několik ukázek prací, které se také zabývaly touto problematikou, jejich výhody a nevýhody. V předposlední části je popsána výroba vlastního LED solárního simulátoru, kde byl kladen důraz hlavně na cenu zařízení a jednoduchost použití a výroby. V poslední části práce jsou uvedeny mé vlastní výsledky měření několika fotovoltaických článků pomocí solárního simulátoru.

## 2 Teoretický úvod

### 2.1 Optika

Světlo je pouze zlomek celkové energie emitované ze Slunce na zem. Sluneční světlo je forma elektromagnetického vlnění a viditelné světlo je pouze malá část tohoto spektra. Elektromagnetické spektrum popisuje světlo jako vlnu, která má určitou vlnovou délku. Popis světla jako vlny byl prosazen na začátku osmnáctého století, když experiment Thomase Younga, François Aragona a Augustina Jean Fresnel ukázal interferenční efekty světelných paprsků, což znamená, že světlo je vlnění. Do konce roku 1860 světlo bylo vnímáno jako součást elektromagnetického spektra. Nicméně, v roce 1800 vyšel najevo problém s pohledem na světlo jako na vlnu, když experimenty měření spektra vlnových délek z vytápěných objektů nebylo možné vysvětlit pomocí vlnové rovnice. Tento rozpor byl vyřešen v roce 1900, když Planck navrhl, že celková energie světla se skládá z prvků nerozeznatelné energie neboli kvanta energie. Einstein během zkoumání fotoelektrického jevu správně rozlišil hodnoty těchto kvantových energetických prvků. Za jejich práci v této oblasti Planck a Einstein získali Nobelovu cenu za fyziku v roce 1918 a 1921. Na základě těchto prací může být světlo vnímáno jako skládající se "pakety" nebo částice energie, zvané fotony. Dnes kvantová mechanika vysvětluje obojí, jak pohled na světlo jako na vlnu i jako na částici.<sup>[1]</sup>

#### 2.1.1 Světlo

Okem viditelné světlo je ve skutečnosti elektromagnetické záření, respektive elektromagnetické vlny, jež vznikají složením příčného postupného vlnění magnetického a elektrického pole. Pohybuje-li se elektrický náboj s nenulovým zrychlením, vydává elektromagnetické záření, na které můžeme nahlížet jako na vlnu nebo proud částic. Vlnu můžeme popsat těmito parametry:

$c$  [m/s] - rychlost šíření světla ve vakuu,

$\lambda$  [m] - vlnová délka,

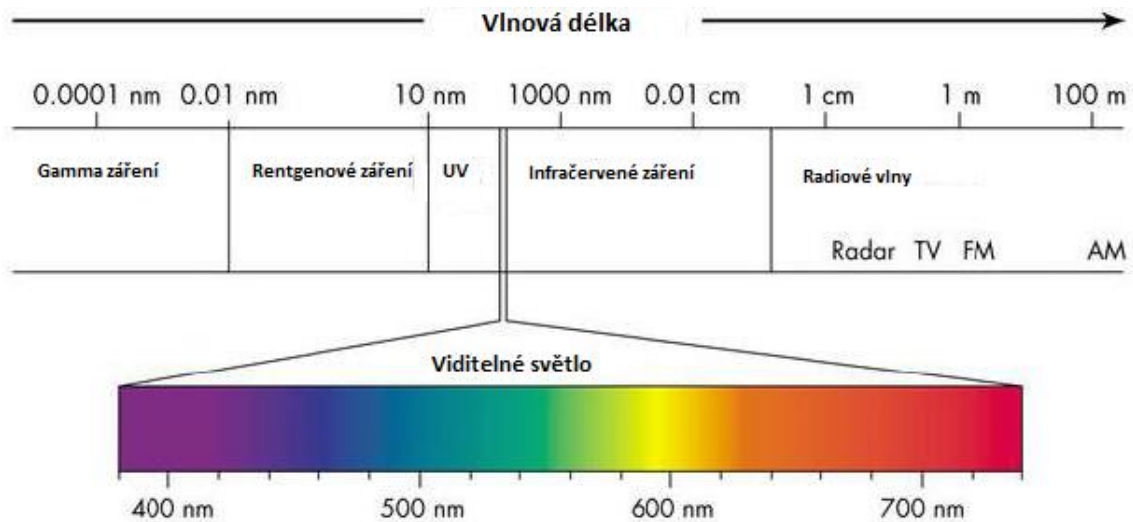
$f$  [Hz] - frekvence.

Pro ně platí vztah:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Rovnice 1 – Výpočet vlnové délky záření

Sluneční světlo, které vnímáme našim zrakem, je pouze zlomkem celého elektromagnetického spektra, které Slunce vydává. Sluneční záření je rozděleno do sedmi kategorií, které jsou definovány určitou vlnovou délkou. Mezi přechody jednotlivých druhů vlnění není vytyčena ostrá hranice, tzn., že se můžou částečně překrývat. Z hlediska solárních článků se soustředíme především na oblast viditelného záření a jeho blízké oblasti, a to oblasti ultrafialového a infračerveného záření. [2]



Obrázek 1 – Zastoupení viditelného světla v celém spektru záření [2]

### 2.1.2 Fotony

Elektromagnetické vlnění se chová jako soubor částic - fotonů. Einstein fotony popisuje některými vlastnostmi, které jsou charakteristické právě pro částice a to: hmotností  $m$ , energií  $E$  a hybností  $p$ . Podle jeho teorie relativity musí mít nulovou klidovou hmotnost. Pro jejich relativistickou hmotnost můžeme psát výraz:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

Rovnice 2 – Výpočet hmotnosti fotonu

velikost jejich hybnosti lze definovat vztahem

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

**Rovnice 3 – Výpočet hybnosti fotonu**

Energie fotonů je dána výrazem

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

**Rovnice 4 – Výpočet energie fotonu**

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $h = 6,62606896 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ . Rychlost světla ve vakuu  $c$  je přibližně  $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Musíme však zdůraznit, že frekvence a vlnová délka jsou veličiny charakteristické pro popis vlnění. Tento jev nazýváme duálním chováním částic. Ty se tedy chovají jako částice a zároveň jako vlny. Fotony krátké vlnové délky mají větší energii než fotony s dlouhou vlnovou délkou. Tento poznatek má velkou souvislost se spektrální citlivostí článků, která má spojitost s energií dopadajících fotonů na solární článek.[2]

### 2.1.3 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev či fotoefekt je fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření (např. rentgenové záření nebo viditelné světlo). Emitované elektrony jsou pak označovány jako fotoelektrony a jejich uvolňování se označuje jako fotoelektrická emise. Pokud jev probíhá na povrchu látky, tzn., působením vnějšího elektromagnetického záření se elektrony uvolňují do okolí látky, hovoří se o vnějším fotoelektrickém jevu. Fotoelektrický jev však může probíhat i uvnitř látky, kdy uvolněné elektrony látku neopouští, ale zůstávají v ní jako vodivostní elektrony. V takovém případě se hovoří o vnitřním fotoelektrickém jevu. Pokud na látku dopadají elektrony, které způsobují vyzařování fotonů, mluví se o inverzním (obráceném) fotoelektrickém jevu. [1]

#### 2.1.4 Elektromagnetické spektrum

Přestože je dělení celkově přesné, může občas dojít k překryvům spolu sousedících typů záření. Například některé záření gama může mít delší vlnovou délku než některé rentgenové záření. To je možné proto, že záření gama je jméno pro fotony vzniklé při jaderném štěpení, zatímco rentgenové záření vzniká jako charakteristické záření elektronu. Překryv tu tedy nastává proto, že paprsky určujeme dle původu vzniku a nikoli dle frekvence.

Viditelné světlo vydávané například Sluncem je souhrn všech vlnových délek, které se na hranolu lámou o určitý úhel a vytvoří pozorovatelné spektrum, ve kterém jedna barva plynule přechází v druhou. Můžeme ho proto označit jako spojité. Tento název je však relativní, protože při průchodu záření chromosférou dochází k částečnému pohlcení - absorpci záření a při bližším zkoumání tohoto spektra v něm můžeme pozorovat velké množství absorpčních čar. Z toho plyne, že spektra můžeme rozdělit na více druhů, a to například na spojitá, pásové, čárové, emisní či absorpční.

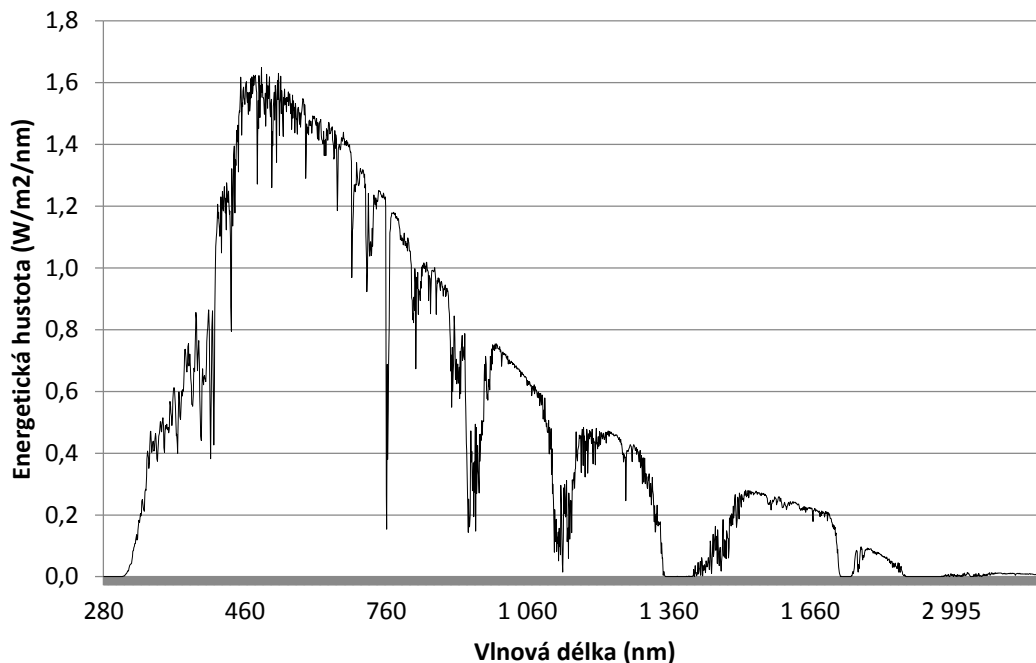
V rámci této práce se budeme soustředit na oblast viditelného spektra a jeho blízkého okolí, jehož vlnová délka je v rozmezí přibližně 380 nm až 890 nm. [2]

### 2.1.5 Spektrum AM1.5

Jedná se o celkové rozložení slunečního záření (přímé + difuzní), které odpovídá ozáření  $1000 \text{ Wm}^{-2}$ . Intenzita se měří na ploše nakloněné  $37^\circ$  od vodorovné roviny s přihlédnutím na frekvenčně závislou odrazivost půdy za následujících atmosférických podmínek:

- U. S. standardizovaná atmosféra s koncentrací  $\text{CO}_2$  370ppm, mimoměstský model koncentrace aerosolů a bez znečištění
- Vysrážená voda<sup>1</sup>: 1.4164 cm
- Obsah ozonu<sup>2</sup>: 0,3438 atm-cm (343,8 DU)
- Zkalení: 0,084 na 500nm
- Atmosférický tlak: 1013,25hPa

### Referenční spektrum podle SMARTS



Graf 1 – Referenční spektrum AM1.5

Data v grafu 1 byla generována použitím solárního spektrálního modelu SMARTS verze 2.9.2. Pokud chceme dosáhnout integrovaného ozáření  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  musí se hodnoty v grafu vynásobit normalizační konstantou 0,9971. [3]

<sup>1</sup> Vysrážená voda je výška vodního sloupce ve sloupci atmosféry, kde se všechna voda v tomto sloupci vysráží jako déšť

<sup>2</sup> Sloupec ozonových plynů v atmosféře (343,8DU odpovídá 3,438 mm tlusté vrstvě plynů)



## 2.2 Fotovoltaické články

### 2.2.1 Odrazivost a propustnost

V ideálním světě všechny fotony dopadají na fotovoltaické zařízení a jsou přenášeny pouze na aktivní oblasti, kde dochází k procesu převodu. Vzhledem k indexu lomu použitých materiálů se světlo odrazí od předního povrchu zařízení. V případě tenkovrstvých článků je třeba také vzít v úvahu, že světlo může pronikat skrz článek.

Celková odrazivost (difúzní a zrcadlová) a celková propustnost zařízení (difúzní a normální) může být měřena pomocí Ulbrichtovy koule<sup>3</sup>. Mimo jiné je to jedna z možností určení vnitřní kvantové účinnosti článku (viz níže), tato měření rovněž umožňují charakteristiku anti-reflexních vrstev a přechodů tenkých vrstev. [5]

### 2.2.2 Vnější kvantová účinnost

Vnější kvantová účinnost (EQE) je definována jako poměr počtu fotonů vyzářených vnějším zdrojem a počtu fotonů dopadajících na zařízení a je přímo získána z měření spektrální odezvy podle následující definice:

*Číslo  $n$  (elektrony generované zářičem),  $n = (I \cdot t / e)$ , kde  $I$  je generovaný proud,  $t$  je čas a  $e$  náboj elektronu. Číslo  $m$  (fotony dopadající na vzorek),  $m = P \cdot t / E_v$ , kde  $P$  je výkon v paprsku,  $t$  je čas, a  $E_v$  energie fotonu. Kvantová účinnost  $\eta$  je definován jako:*

$$\eta = 100 \cdot \frac{n}{m} = 100 \cdot \frac{\frac{I \cdot t}{e}}{\frac{P \cdot t}{E_v}} = 100 \cdot \frac{I}{P} \cdot \frac{E_v}{e}$$
$$\eta = 100 \cdot S \cdot \left(\frac{h_c}{e}\right) \cdot \left(\frac{1}{\lambda}\right) \approx 1239.84 \cdot \frac{S}{\lambda} [\%]$$

Rovnice 5 – Výpočet vnější kvantové účinnosti

kde  $S$  je spektrální odezva v  $\text{AW}^{-1}$  a  $\lambda$  vlnová délka v nm. Vnější kvantovou účinnost proto lze určit přímo z měření spektrální odezvy. [5]

---

<sup>3</sup> Dutá koule, jejíž vnitřní povrch je potažen vysoce reflexním materiálem. Pokud přivedeme do koule světlo, bude se vnitřní prostor koule chovat jako absolutně difúzní prostředí

### 2.2.3 Vnitřní kvantová účinnost

Na základě výše uvedených měření odrazivosti a propustnosti může být vnější kvantová účinnost upravena tak, aby byla brána v úvahu pouze ta část světla, která dopadá na aktivní oblast, čímž se získá vnitřní kvantová účinnost. To umožňuje lepší pochopení materiálových vlastností článku. Vnitřní kvantová účinnost je jednoduše vyjádřena jako:

$$iqe = \frac{eqe}{1 - R - T}$$

Rovnice 6 – Výpočet vnitřní kvantové účinnosti

Kde  $iqe$  je vnitřní kvantová účinnost a  $eqe$  je vnější kvantová účinnost,  $R$  je odrazivost a  $T$  propustnost vzorku. [5]

### 2.2.4 Výpočet $J_{sc}$

Měřená spektrální odezva může být použita k predikci očekávané hustoty zkratového proudu. Jednoduše ji vypočteme na základě integrace přes spektrální rozsah zkoušeného článku.

$$J_{sc} = \int S_t(\lambda) \cdot E_0(\lambda) \cdot d\lambda$$

Rovnice 7 – Výpočet zkratového proudu

Kde  $J_{sc}$  je v  $A \cdot m^{-2}$ ,  $S_t(\lambda)$  je spektrální odezva v  $A \cdot W^{-1} \cdot nm^{-1}$  a  $E_0(\lambda)$  je AM1.5 referenční spektrum<sup>4</sup> ve  $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ . [5]

---

<sup>4</sup> Jednotka vyjadřuje intenzitu ( $W/m^2$ ) vztaženou na jeden nanometr, jednotky vzdálenosti v tomto případě nelze spojit dohromady

### 2.2.5 V-A charakteristika

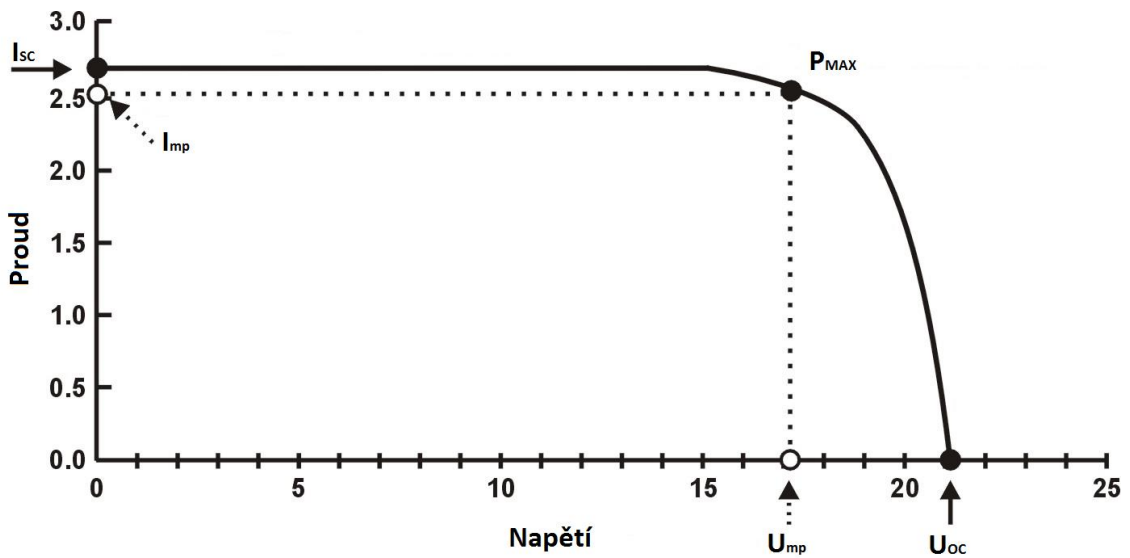
Elektrické vlastnosti solárního článku jsou dány charakteristickou závislostí proudu na napětí, viz obrázek 2. Základními parametry této charakteristiky jsou:

- Proud nakrátko  $I_{SC}$  [A] - je získán při nulovém napětí
- Napětí na prázdko  $U_{OC}$  [V] - je získáno při nulovém proudu
- Maximální výkon  $P_{MAX}$  [W] - maximální výkon dosažitelný na solárním článku. Napětí a proud, při kterých je dosaženo maximálního výkonu, jsou označovány jako  $U_{mp}$  a  $I_{mp}$
- Faktor plnění (Fill Factor) FF - podle jeho velikosti můžeme hodnotit kvalitu solárních článků, vypočítáme takto:

$$FF = \frac{U_{mp} I_{mp}}{U_{OC} I_{SC}}$$

Rovnice 8 – Výpočet faktoru plnění

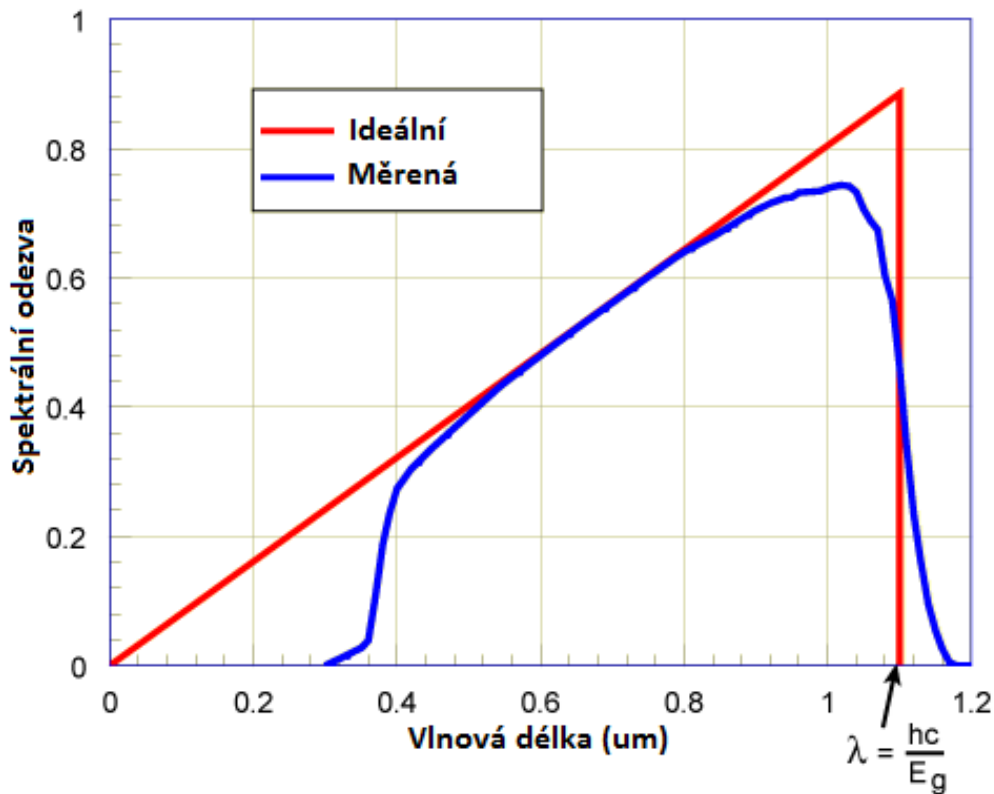
- Účinnost  $\eta$  [%] - je definována jako poměr výkonu solárního článku a vstupní energie ze Slunce.[2]



Obrázek 2 – V-A charakteristika solárního článku [2]

### 2.2.6 Spektrální odezva

Spektrální odezva je koncepčně podobná kvantové účinnosti. Kvantová účinnost udává počet elektronů na výstupu ze solárního článku ve srovnání s počtem fotonů dopadajících na zařízení, zatímco spektrální odezva je poměr proudu generovaného solárním článkem a výkonu dopadajícího na solární článek.



Obrázek 3 – Porovnání ideální a měřené křivky spektrální odezvy

Na obrázku 3 je vidět spektrální odezva křemíkového solárního článku pod sklem. Při krátkých vlnových délkách pod 400 nm sklo absorbuje většinu světla a reakce článku je velmi nízká. U středních vlnových délek se článek přiblíží k ideálu. U dlouhých vlnových délek odezva klesne zpět na nulu. Křemík je pásmovou propustí, který nemá ostrý skok na vlnové délce odpovídající zakázaném pásmu (např. = 1,12 eV).<sup>[1]</sup>

Ideální spektrální odezva je omezena na dlouhých vlnových délkách neschopností polovodiče absorbovat fotony s energií nad hranicí zakázaného pásma. Tento limit je stejný jako limit, se kterým se setkáváme u křivek kvantové účinnosti. Nicméně, na rozdíl od čtvercového tvaru křivek kvantové účinnosti, spektrální reakce klesá u fotonů s nízkou vlnovou délkou. Při těchto vlnových délkách má každý foton velkou energii a proto se snižuje i poměr fotonů na výkon. Jakákoliv energie nad hranicí zakázaného pásma není využívána solárním článkem a místo toho pouze solární článek zahřívá. Neschopnost plně využít dopadající energie při velkých vlnových délkách a neschopnost absorbovat malé vlnové délky světla představují významnou ztrátu energie v solárním článku skládajícího se z jednoho p-n přechodu.

Měření spektrální odezvy je důležité pro výpočet kvantové účinnosti. Kvantová účinnost může být stanovena ze spektrální odezvy nahrazením intenzity světla na určité vlnové délce proudem fotonů s adekvátní energií pro určitou vlnovou délku. To dává:

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} QE$$

Rovnice 9 – Výpočet spektrální odezvy

kde SR je spektrální odezva a QE je kvantová účinnost. [1]

## 2.2.7 Faktor spektrální neshody

Klasifikace a ekonomická bilance fotovoltaických zařízení silně závisí na měřeném výkonu zařízení. Ten je obvykle stanoven při „umělém slunci“ v testovacích laboratořích. Nevyhnutelné odchýlení spektra umělých světelných zdrojů od normovaného, standardního spektra (kapitola 2.1.5) má negativní dopad na naměřené hodnoty zkratových proudů, potažmo výkonu. V některých případech je tedy nutno tento jev kompenzovat (např. při kalibraci referenčních článků).

Jako korekce hodnoty zkratového proudu se zavádí tzv. faktor spektrální neshody – „mismatch factor“ (MM). Tento korekční faktor představuje odchylku ve spektrálním výstupu solárního simulátoru s ohledem na standardní spektrum AM 1,5. Vyhodnocení správné korekce bývá v mnoha případech složité. Avšak správnou korekční metodou lze zkratové proudy fotovoltaických zařízení měřit s chybou menší než 2 %. Podle normy ČSN EN 60904-7 se spektrální neshoda může vypočítat takto:

$$MM = \frac{I_{SC,ref,Eref} \cdot I_{SC,sample,Emeas}}{I_{SC,ref,Emeas} \cdot I_{SC,sample,Eref}}$$

Rovnice 10 – Výpočet faktoru spektrální neshody

$I_{SC,sample,Emeas}$  je hodnota zkratového proudu naměřeného na referenčním článku pod referenčním spektrem

$I_{SC,ref,Emeas}$  je hodnota zkratového proudu testovaného článku pod měřeným spektrem

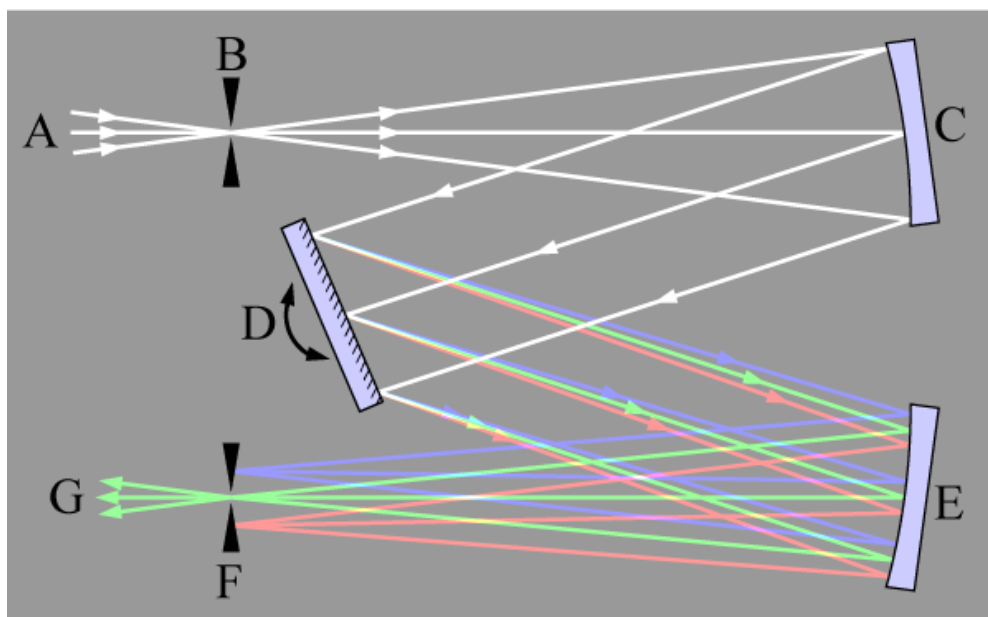
$I_{SC,ref,Eref}$  je zkratový proud referenčního článku pod měřeným spektrem

$I_{SC,sample,Eref}$  je zkratový proud testovaného článku pod referenčním spektrem<sup>[9]</sup>

## 2.3 Měření spektrální citlivosti

Relativní spektrální citlivost fotovoltaické součástky se měří tak, že se fotovoltaická součástka ozařuje pomocí úzkopásmového zdroje světla, v sériích různých vlnových délek pokrývajících její oblast citlivosti a měřících hustotu proudu nakrátko a ozáření na každé z těchto vlnových délek. [9]

Norma také udává, že rozestup vlnových délek úzkopásmových záření solárního simulátoru nesmí přestupovat 50nm.



Obrázek 4 – Schématické znázornění monochromátoru<sup>[13]</sup>

Jako jedna z možností měření spektrální citlivosti je použití monochromátoru, který je znázorněn na obrázku 4. Na vstupu A je zdroj ozařování, který je pomocí štěrbin B usměrněn na zakřivené zrcadlo C, které přímo odráží záření na hranol D. Poté je odražené světlo, kde má každá vlnová délka jiný úhel odrazu odraženo na zrcadlo E, které veškeré paprsky nasměruje do štěrbin F. Podle natočení zrcadla E proniká štěrbinou F pouze paprsek s požadovanou vlnovou délkou.

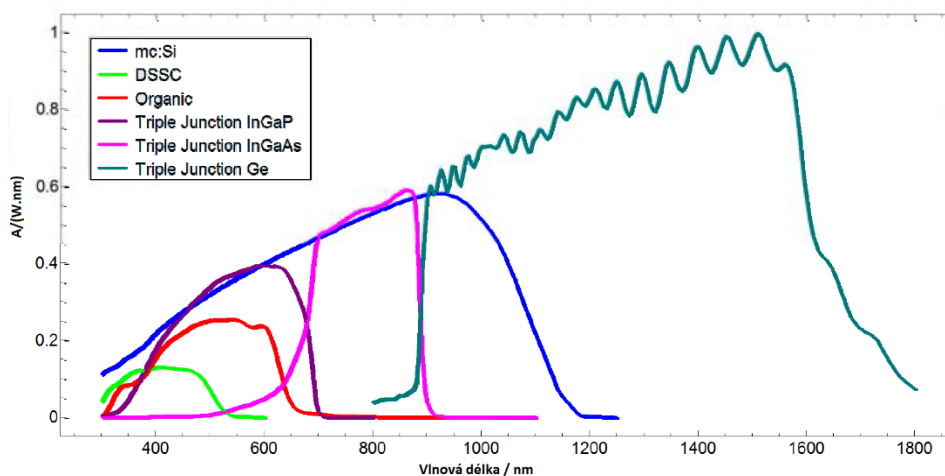
Další možností měření je použití zdroje světla a kotouče s filtry. Monochromátor i zařízení s kotouči s filtry jsou však oproti LED simulátoru podstatně dražší a komplikovanější.

## 2.4 Materiály PV zařízení

PV zařízení jsou obecně klasifikovány do tří generací. Zařízení první generace, přijímající technologické pokroky mikroelektronického průmyslu, jsou založeny na krystalickém křemíku s jedním přechodem, který je v současné době stále nejrozšířenějším materiálem pro fotovoltaického zařízení. Pro výrobu zařízení s vysokou účinností je potřeba použít kvalitní materiály, ale musí se také použít drahé výrobní technologie. Vzhledem k relativně nízké schopnosti absorbovat světlo musí mít zařízení tloušťku řádově stovky mikronů, což také zvyšuje pořizovací cenu.

Tlak na levnější fotovoltaické zařízení způsobil, že se výzkum zaměřil na novou generaci, která využívá tenkovrstvé technologie. Protože tyto materiály mají dobrou absorpci světla, je potřeba mnohem méně materiálu. Kromě toho jsou mnohem méně komplexní a proto levnější. V některých případech můžou být zpracovávány při nízkých teplotách a otevírají tím možnost vytvoření zařízení na základě flexibilního plastového substrátu. Bohužel, ale nic není zadarmo. Tyto zařízení jsou charakteristické svou horší kvalitou materiálu, která má za následek ztrátu světlem generovaných elektronů kvůli vadám ve struktuře a tím i odpovídající snížení účinnosti.

Zařízení třetí generace zahrnují širokou paletu technologií zaměřených na zlepšení účinnosti stávajících zařízení nebo zavedení jiných materiálů a materiálových struktur. Patří mezi ně více přechodové články, které kombinují materiály, jež reagují na různé spektrální oblasti. Koncentrátory založené na zrcadle nebo čočce se dají použít pro zvýšení úrovně osvětlení článku, a to až na ekvivalent intenzity stovek sluncí. Organický polymer a barevně citlivé látky založené na velmi levné technologii mohou být také vyrobeny na pružných substrátech.<sup>[5]</sup>



Obrázek 5 – Závislost odezvy různých fotovoltaických článků na vlnové délce<sup>[5]</sup>



### 2.4.1 Příklad článku třetí generace

V této kapitole je uveden příklad, jak se dají testovat jednotlivé vrstvy třívrstvého solárního článku.

#### 2.4.1.1 GaInP vrchní přechod

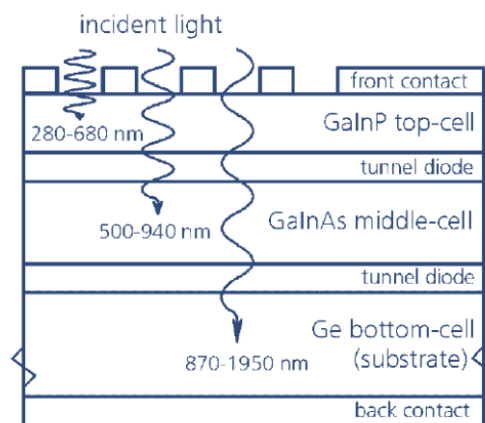
GaInP přechod reaguje cca od 300 nm do 700 nm. Testovaný článek by měl být osvětlen současně pomocí solárního simulátoru limitovaného začátkem stupnice a horní pásmovou propustí na červeném světle. Spektrální odezva pak může být měřena v širším pásmu od 300 nm až po 800 nm.

#### 2.4.1.2 GaInAs střední přechod

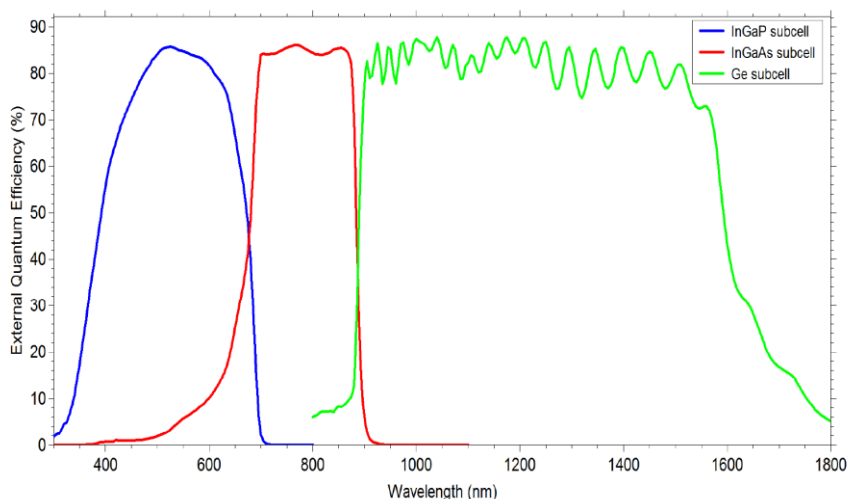
GaInAs přechod reaguje cca od 500 nm do 900 nm. Testovaný článek by měl být osvětlen současně pomocí solárního simulátoru limitovaného začátkem stupnice a horní pásmovou propustí v infračervené oblasti. Spektrální odezva pak může být měřena v širším pásmu od 300 nm až po 1100 nm.

#### 2.4.1.3 Ge dolní přechod

Ge přechod reaguje cca od 900 nm do 1950 nm. Testovaný článek by měl být osvětlen pomocí solárního simulátoru omezeného dolní propustí na začátku infračervené oblasti. [5]



Obrázek 6 – Náznak průchodu záření třívrstvým PV článkem [5]



Obrázek 7 – Vnější kvantová účinnost v závislosti na vlnové délce [5]

## 2.4.2 Typy měřených článků

Typů fotovoltaických článků existuje nepřehledné množství, většina jen v podobě laboratorních pokusů. Proto jsem vybral pět typů fotovoltaických článků z různých materiálů, zhotovené různým výrobním procesem, které byly k dispozici ve školní laboratoři. Měření na těchto článcích je vzhledem k povaze a rozsahu této práce dostačující.

### 2.4.2.1 Monokrystalické křemíkové články

Jak již vypovídá název, tento článek je vyroben z jediného prvku, a to velmi čistého křemíku. Využívá se podobný proces jako při výrobě polovodičů. Oxid křemičitý ve formě křemičitého štěrku nebo drceného křemene se umístí do elektrické obloukové pece. Substrát je poté vystaven teplu a přemění se na oxid uhličitý a křemík. Tento proces produkuje křemík o čistotě kolem jednoho procenta. Ten nalezne použití v mnoha odvětvích. Pro výrobu solárních článků je tato čistota nedostačující.

Vyšší čistoty je dosaženo opakováním procesu, kde materiál prochází teplotním procesem opakovaně vždy ve stejném směru, a proto jsou i nečistoty posouvány stejným směrem. Na konec je strana, kam byly posunuty všechny nečistoty uříznuta a zbyde pouze čistý křemík.

Podle čistoty se dá křemíku rozdělit na tři základní kategorie:

- Hutní křemík – 98%
- Křemík pro solární články – 99,9999%
- Křemík pro elektrotechniku – 99,9999999%

Ingot se poté rozřeže na waffery, které jsou lícovými stranami proti sobě uloženy do pece, kde jsou ve fosforové atmosféře zahřáty lehce pod bod tání křemíku

(1410°C). Atomy fosforu pronikají do křemík, který je kvůli teplotě blízké bodu tání více porézní. Teplota a čas tohoto procesu jsou pečlivě kontrolovány, aby bylo zajištěno správné spojení a správná hloubka přechodu. [6]

#### 2.4.2.2 Polykrystalické křemíkové články

Důvodem, proč jsou polykrystalické články levnější, než monokrystalické články, je samotný výrobní proces. Roztavený křemík je vylitý do odlitku místo toho, aby byl vyrobený z jednoho krystalu.

Materiál může být jednoduše syntetizován tím, že dovolíme křemíku vychladnout v přítomnosti zárodečného krystalu požadované struktury. Dá se také využít metody CVD<sup>5</sup>, která umožňuje přeměnu amorfního křemíku na polykrystalický.

V procesu odlévání jsou kousky křemíku roztaveny v keramické nádobce a poté formovány v grafitové nádobě do formy ingotu. Jakmile začne roztavený křemík chladnout, je do něj vložen zárodečný krystal požadované struktury k usnadnění formování krystalu.

K tavení je potřeba méně křemíku než k vytvoření jednolitého krystalu, což snižuje výrobní náklady. Tento proces ale výrazně ovlivňuje účinnost solárního článku<sup>6</sup>. [6]

#### 2.4.2.3 Amorfni křemíkové články

Amorfni články jsou formovány pomocí napařování tenké vrstvy křemíku (cca 1µm tlusté) na skleněný nebo kovový podkladový materiál. Křemík může být také nanášený při velmi nízkých teplotách (okolo 75°C), což umožňuje nanesení například na plastové materiály.

V nejjednodušší formě je článek tvořen jedním PN přechodem, který ale trpí výrazným zhoršením výstupního výkonu, pokud je vystaven Slunci. Tento jev se nazývá Staebler-Wronski effect.

Pro lepší stabilitu je nutné použít více tenčích vrstev na zvýšení síly elektrického pole v celém materiálu. Použití tenčích vrstev snižuje absorpci světla a také účinnost. Tato skutečnost vedla k vytvoření tandemových a dokonce třívrstevných článků, kde jsou články naskládány na sebe.

---

<sup>5</sup> Chemical Vapor Deposition je chemický proces využívaný pro přípravu tenkých filmů. Substrát je vystaven účinkům jednoho nebo více těkavých prekurzorů, které na jeho povrchu reagují mezi sebou nebo se rozkládají za vzniku požadovaného materiálu, celý proces probíhá za vysoké teploty.

<sup>6</sup> Na MIT byl vyvinut přístroj (1366 Tech), který dokáže produkovat polykrystalické solární články přibližně 30krát rychleji než metody používané v současnosti. Tento přístroj by mohl v budoucnu dramaticky snížit cenu solárních článků. [14]

Průkopníkem v oblasti článků z amorfního křemíku je firma Uni-solar, která vyvinula třívrstvý článek, který je optimalizovaný tak, aby pohlcoval celé solární spektrum. Šířka článku je pouze 1 $\mu$ m (je tedy 300x tenčí než monokrystalický článek).<sup>[6]</sup>

#### 2.4.2.4 CIGS články

Copper Indium Gallium Selenit solar cell je tenkovrstvý solární článek vyráběný nanosením tenké vrstvy mědi, india, galia, selenu na skleněnou nebo plastovou podložku spolu s elektrodami na přední a zadní straně pro sběr proudu. Vzhledem k tomu má materiál vysoký absorpční koeficient a silně absorbuje sluneční světlo, proto je zapotřebí co možná nejtenčí vrstva. Je zde potřeba slabší vrstvy než u jiných polovodičových materiálů.

CIGS vrstvy jsou dostatečně tenké, aby mohly být flexibilní, což umožňuje, aby byly uloženy na pružné podklady. Tyto technologie se běžně nanášejí na materiály, které snesou vysokou teplotu. Nejlepší výkon za normálních okolností pochází z panelů nanesených na skle. I pak je výkon vyšší ve srovnání s moderními polykrystalami na bázi křemíku.<sup>[7]</sup>

#### 2.4.2.5 Organické články

Průhledné elektrody solárního článku jsou tvořeny sklem pokrytým tenkou vrstvou SnO<sub>2</sub> či ZnO (připravenou za podmínek, kdy vlastní defekty tvoří dárce elektronů v těchto průhledných polovodičových kysličnících a způsobují jejich dobrou elektrickou vodivost). Titanová běloba (nanokrystalický TiO<sub>2</sub>) je nanosená na jednu elektrodu. Po sintraci na vzduchu při 450°C vznikne porézní vrstva, jež rozptyluje světlo. Ta je zbarvena organickým barvivem, které můžeme například extrahovat z přírodních látek. Absorpce světla nastává v tomto barvivu. Elektrolytem je roztok jodidu draselného v etylenglykolu. Druhou elektrodu tvoří grafit nanosený opět na "vodivém skle". Celá struktura je utěsněna proti ztrátě elektrolytu. Článek dává napětí asi 0,3 V - 0,4 V a proud při slunečním osvětlení asi 1 mA/cm<sup>2</sup>. Za použití složitějších postupů je účinnost článků 10% až 15% a stále se zvyšuje.

Vzhledem k rostoucí poptávce po zdrojích čisté energie se pozornost odborného světa začíná věnovat právě organickým fotovoltaickým článkům s využitím TiO<sub>2</sub> a metalo-organického senzitizera. Tyto články mají výhody vůči klasickým fotovoltaickým článkům na bázi křemíku, germania apod. Vzhledem k dostupnosti TiO<sub>2</sub> dosahujeme nižších nákladů spojených s přepracováním a přípravou substrátů. Jejich výroba je také mnohem ekologičtější, než výroba klasických křemíkových článků a dle potřeby je možné je vyrobit v libovolném tvaru a barvě.<sup>[8]</sup>

### 3 Příklady prací na téma spektrálních simulátorů

V této době se stále více začíná využívat LED simulátorů, proto jsou v následujících kapitolách postupně uvedeny: průmyslové řešení, laboratorní řešení výzkumného ústavu Tokijské univerzity, univerzity v Leicestershire a řešení Ing. Martina Kubíčka.

#### 3.1 Průmyslové řešení

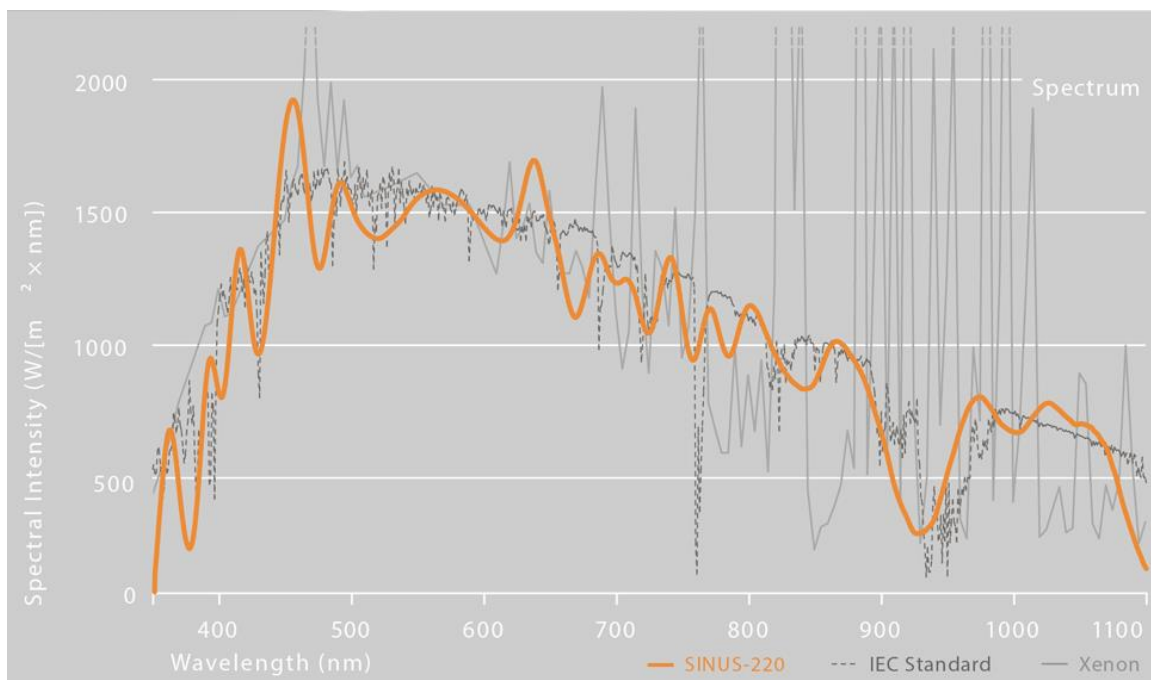
Na trhu se čím dál více objevují spektrální analyzátory, kde jsou zdrojem ozařování LED diody. Jako příklad jsem vybral zástupce od firmy Wavelabs a tím je jejich simulátor Sinus-220. Jedná se o osvitovou jednotku složenou z 18 druhů LED diod s různou vlnovou délkou.



Obrázek 8 – Solární simulátor Sinus-220 firmy Wavelabs<sup>[10]</sup>

Přístroj splňuje všechny specifikace Class AAA podle mezinárodní normy IEC 60904 a obsahuje kompletní vybavení k měření solárních článků s maximální velikostí 160 mm x 160 mm.<sup>[10]</sup>

Firma Wavelabs uvádí několik výhod použití LED diod oproti xenonové lampě. První a hlavní výhodou je přesnost měření, a to hlavně kvůli přesnějšímu napodobení spektra, jak je vidět na obrázku 9. Dále uvádí lepší účinnost, a to zejména kvůli tomu, že s LED diodami je mnohem lepší opakovatelnost měření a oproti xenonové lampě dokáží LED diody vyvinout delší puls, což je potřeba u článků s větší účinností, protože náběžná hrana účinnosti článku může být delší než maximální puls xenonové lampy.<sup>[10]</sup> Poslední velkou výhodou je několikanásobně delší životnost a stálost LED diod oproti xenonové lampě, která má životnost přibližně pár milionů bliknutí.



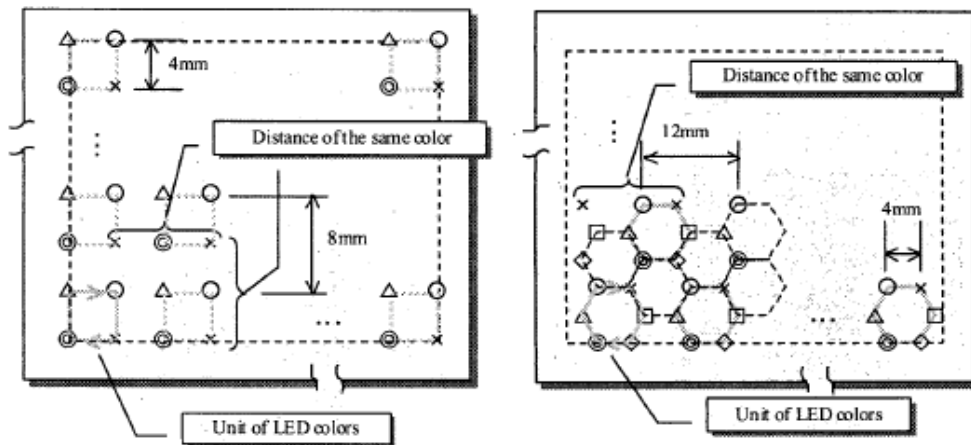
Obrázek 9 – Spektrum přístroje Sinus 220<sup>[10]</sup>

Výrobce tvrdí, že se jedná o levný a přenosný systém. Váha přístroje je okolo 55 kg bez chladicí kapaliny a zdroje. Cena tohoto zařízení je přibližně 110 000 EUR (cca 3 mil. korun), což se dá srovnat s podobným zařízením s xenonovou lampou.

### 3.2 Výzkum Tokijské univerzity

Pánové Shogo Kohraku, Kosuke Kurokawa používají pro simulaci solárního osvětlení matici diod, kterými osvětlují solární článek.

Simulují dvě rozložení diod na matici s rozdílnými vzdálenostmi od solárního článku. První rozložení se skládá ze čtyř diod uspořádaných do čtverců se vzájemnou vzdáleností stejnobarevných diod 8 mm. Druhé rozložení je složeno z šesti diod uspořádaných do šestiúhelníků, kde je pak vzdálenost diod o stejné vlnové délce 12 mm. V obou modelech používají červené, modré, infračervené a bílé diody.



Obrázek 10 – Schéma rozložení diod (Tokio) [11]

Při měření se získají diskrétní hodnoty, které se vynesou do grafického zobrazení a mohou se pak porovnat s teoretickou křivkou. Míra shody teoretických a diskrétních hodnot pak ukazuje na přesnost a adekvátnost měření.

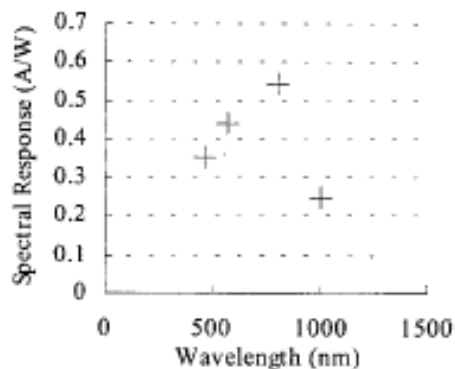


Fig.5(a) the discrete spectral response

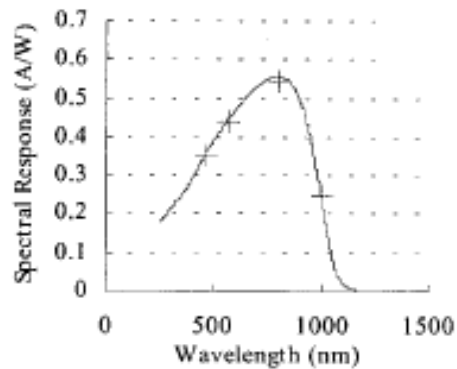
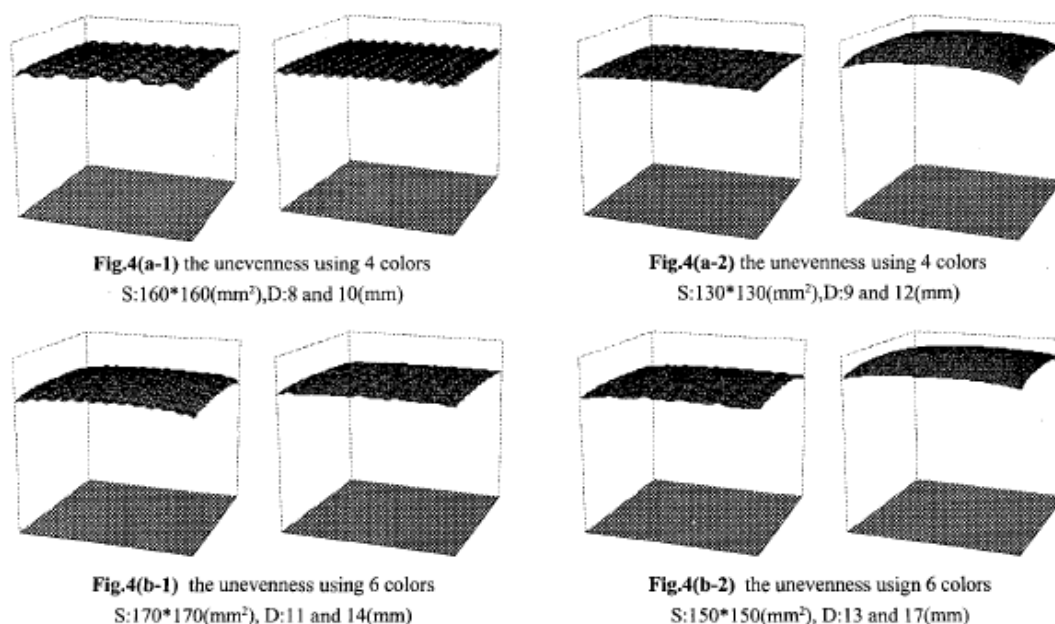


Fig.5(b) the fit spectral response curve

Obrázek 11 – Ukázka křivky sestavené z jednotlivých bodů [11]

Na obrázku 12 je vidět homogenita osvětlení fotovoltaického panelu při použití čtyř nebo šesti diod v závislosti na vzdálenosti matice od článku.



**Obrázek 12 – Závislost homogenity osvětlení na vzdálenosti [11]**

V závěru práce je zmíněno, že po výpočtech a praktických testech není jisté, že lze tímto způsobem měřit spektrální odezvu z důvodu nízké intenzity. Jedním z důvodů může být i to, že použité diody mají vyzařovací úhel 120°, což může zajistit homogennější osvětlení, ale na intenzitu ozařování to má velmi negativní efekt.[11]

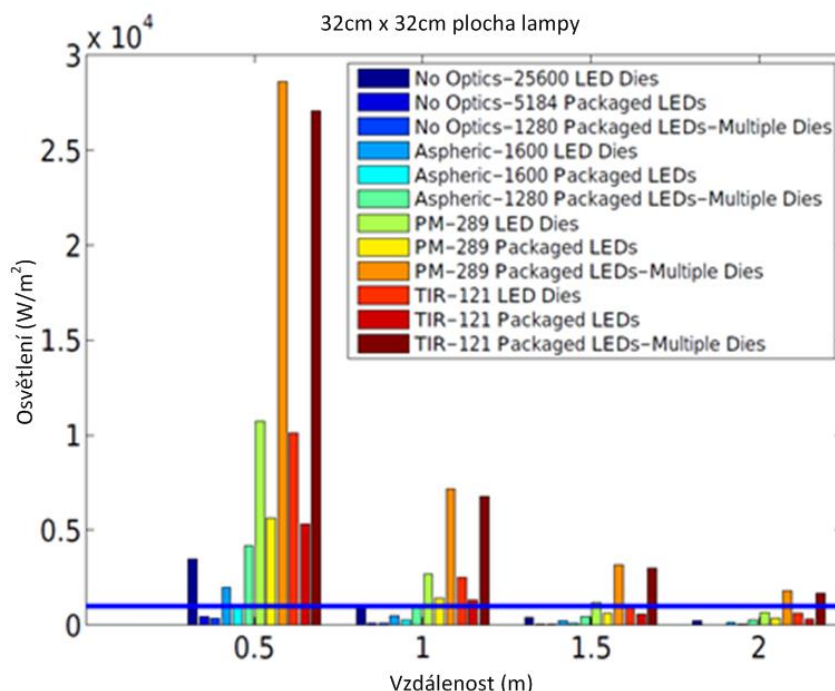
Na základě této práce jsem se rozhodl, jakým způsobem bude koncipován můj solární simulátor. Rozhodl jsem se použít výkonnější LED diody s menším vyzařovacím úhlem (i za cenu ztráty homogenity osvětlení). Vzhledem k faktu, že intenzita osvětlení se vypočítá ze svítivosti přes prostorový úhel, měla by proto být dostačující.



### 3.3 Výzkum university Leicestershire - UK

Tato práce se zabývá teoretickým rozbořem LED osvitových jednotek pro co nejpřesnější simulaci slunečního záření. Jejím cílem bylo co nejpřesnější přiblížení spektra AM1,5, a to v rozsahu vlnových délek od 350 nm do 1300 nm a intenzita osvětlení 1000 W/m<sup>2</sup>. Posledním parametrem byla homogenita osvětlení ±1 %.

Vědcům se povedlo relativně přesně napodobit solární spektrum AM1,5, avšak za použití 32 různých LED diod s různou vlnovou délkou. Počet diod nutný k homogennímu osvětlení fotovoltaického článku je proto obrovský. Ozařování 32 druhů diod bez přídavné optiky je takřka nemožné, protože na článek o velikosti 200 mm x 200 mm je potřeba 10 000 samostatných LED diod (vyzařovací úhel diod 60±4° a vzdálenost od článku 0,5 m).



Obrázek 13 – Závislost intenzity osvětlení na vzdálenosti od článku<sup>[12]</sup>

Z výsledků práce vyplývá, že požadované intenzity osvětlení je možné dosáhnout i bez optiky. Lepších výsledků je možné dosáhnout s asférickými čočkami. Nejlepšího výsledku je ale možné dosáhnout vhodně umístěným parabolickým zrcadlem nebo systémem, který zajistí totální odraz veškerých paprsků na měřený článek.

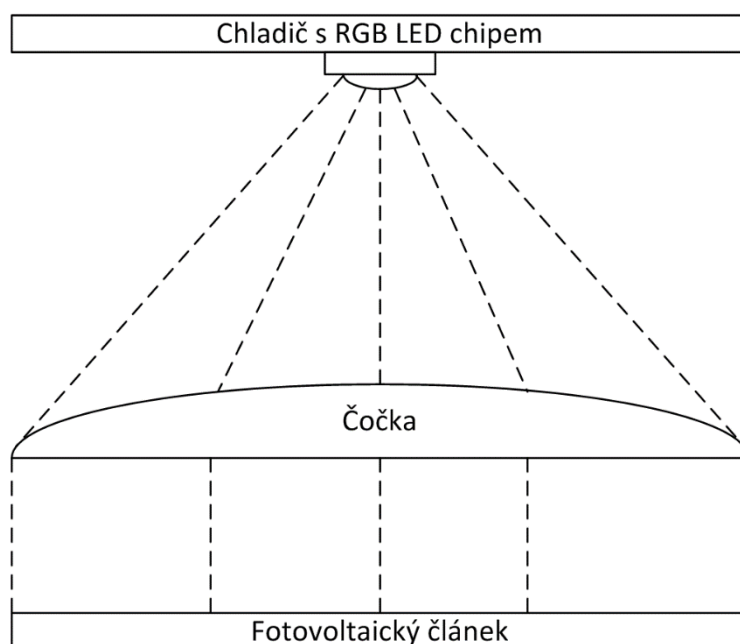
Výsledek práce také ukazuje, že homogenita osvětlení je závislá na vzdálenosti diod od měřeného článku. Problém je ale v tom, že čím více se vzdalujeme od článku, tím více klesá intenzita osvětlení, a to s druhou mocninou. <sup>[12]</sup>

### 3.4 Diplomová práce Ing. Martina Kubíčka

Osvětlovací systém používá LED diodový čip, který generuje tři různé vlnové délky (tři různé barvy: červenou, zelenou a modrou). Toto řešení není zcela ideální, protože intenzita světla pouze z jedné diody nemusí být příliš vysoká a generované světlo není monochromatické, jak je tomu u laboratorních simulátorů.

Další nevýhodou při používání jednoho LED čipu je provozní teplota, která během provozu stoupá a ovlivňuje tak intenzitu vyzařování jednotlivých světél. Proto se u takto výkonného čipu musí řešit i jeho chlazení, aby nedocházelo k ohřevu a tím pádem ke změně intenzity světla v době měření.

Rovnoměrnost osvětlení a fokusace přímo na fotovoltaický článek je zajištěna použitím optické čočky typu spojka. Tím je zajištěno, že většina paprsků dopadne přímo na fotovoltaický článek.<sup>[12]</sup>



Obrázek 14 – Schéma řešení Ing. Martina Kubíčka

Toto řešení zajišťuje dostatečnou homogenitu osvětlení, ale výkon LED diod není dostatečný, a proto se musí měření provádět s přisvětlením<sup>7</sup>, které se následně musí odečíst. Navíc při proudech 260 mA – 380 mA<sup>[12]</sup> se čip zahřívá a dioda tím mění svou intenzitu, což ovlivňuje opakovatelnost měření.

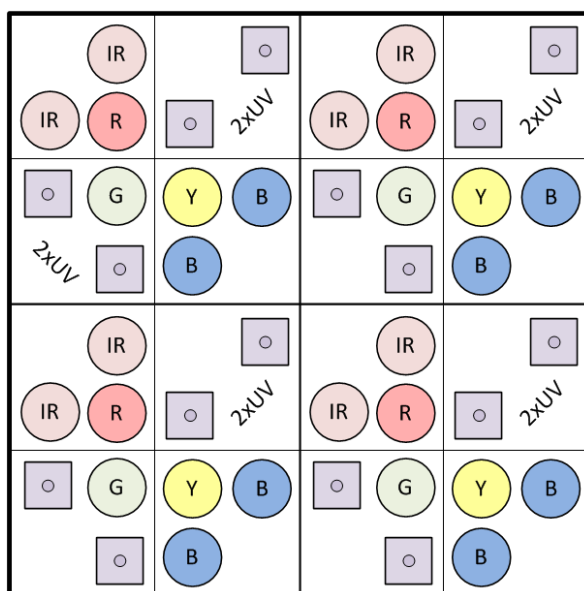
<sup>7</sup> Měření s přisvětlením je podle normy možné<sup>[4]</sup>. Pokud chceme měřit s přisvětlením, musí mít zdroj rozložení blízké spektru AM1.5 a to při takové intenzitě, že se spektrální citlivost podstatně nezmění, když se intenzita přisvětlení sníží o 50%

## 4 Solární simulátor

Pro účely této diplomové práce jsem vytvořil solární simulátor, který má simulovat osvětlení spektrem AM1.5G a je založen na technologii LED diod. Na rozdíl od profesionálního přístroje s 18 diodami je tento simulátor osazen pouze šesti druhy diod, které sice nedokáží pokrýt celé spektrum, ale pro účely měření spektrální citlivosti v rámci této práce je to dostačující.

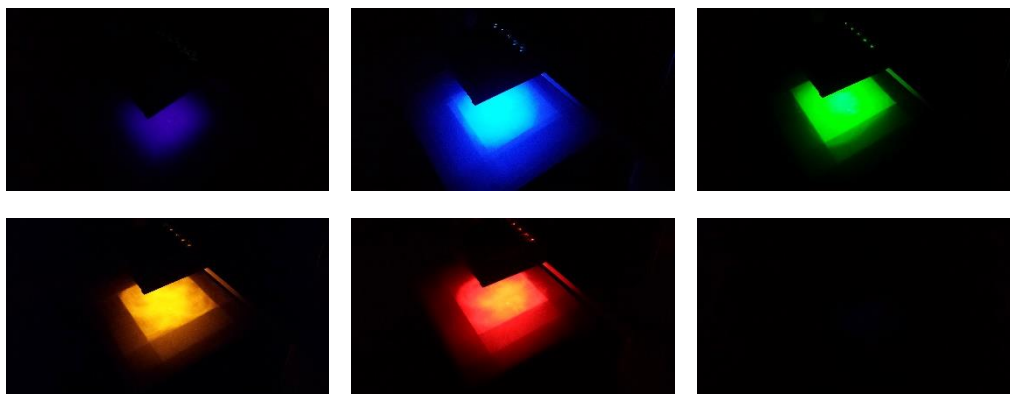
Simulátor jsem koncipoval jako dvou deskový sandwichový systém s podstavcem, který zajišťuje přesnou výšku diod nad měřeným článkem (obrázek 17-18). Spodní deska je pokryta 275 diodami s různou vlnovou délkou a rozložením, které je vidět na obrázku 15. Na vrchní desce jsou umístěny zdroje proudu pro diody a ke každé vlnové délce také dva potenciometry na nastavení intenzity osvětlení. Na podstavci jsou umístěny třípohové přepínače, které buď vypínají, nebo zapínají jednu ze dvou přednastavených intenzit osvětlení. Pro jednoduchou obsluhu a možnosti provozování simulátoru bez laboratorního zdroje jsou na podstavci také umístěny transformátory pro galvanické oddělení od sítě a změny síťového napětí na napětí nutné pro napájení simulátoru.

Důležitá byla také cena simulátoru. Zatímco průmyslové řešení se dá pořídit za více než 100 tisíc euro, tento simulátor, který ovšem nedosahuje takových kvalit, je vyroben za přibližně tři tisíce korun.

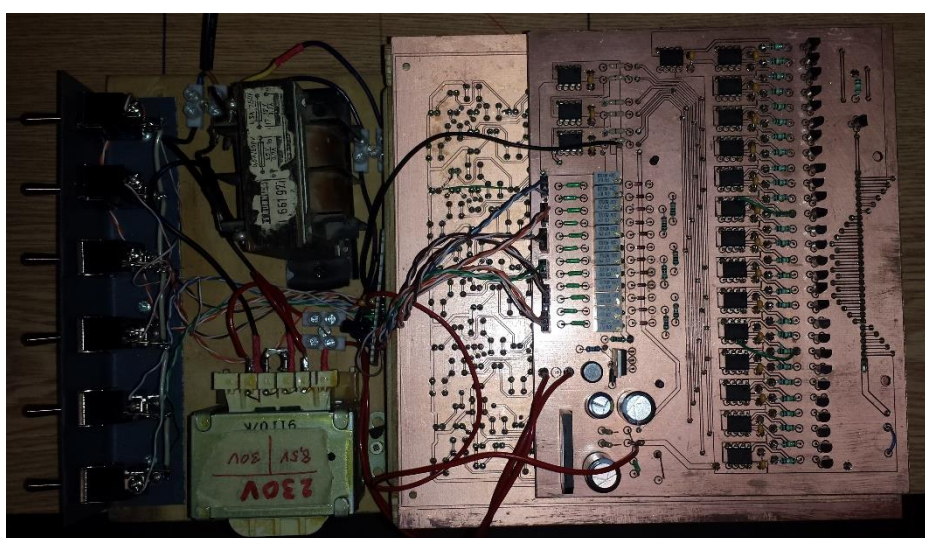


Obrázek 15 – Rozložení spodní desky s ohledem na homogenitu osvětlení

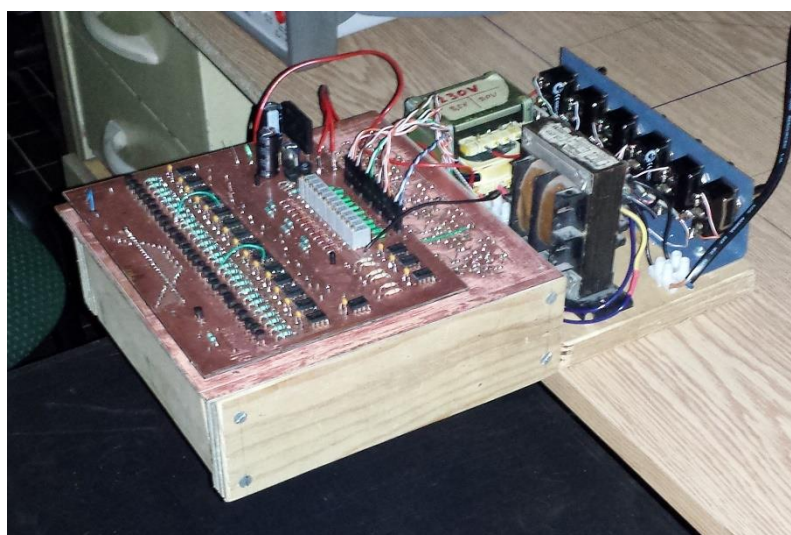
#### 4.1 Fotky solárního simulátoru



Obrázek 16 – Ukázka rozsvícení všech barev



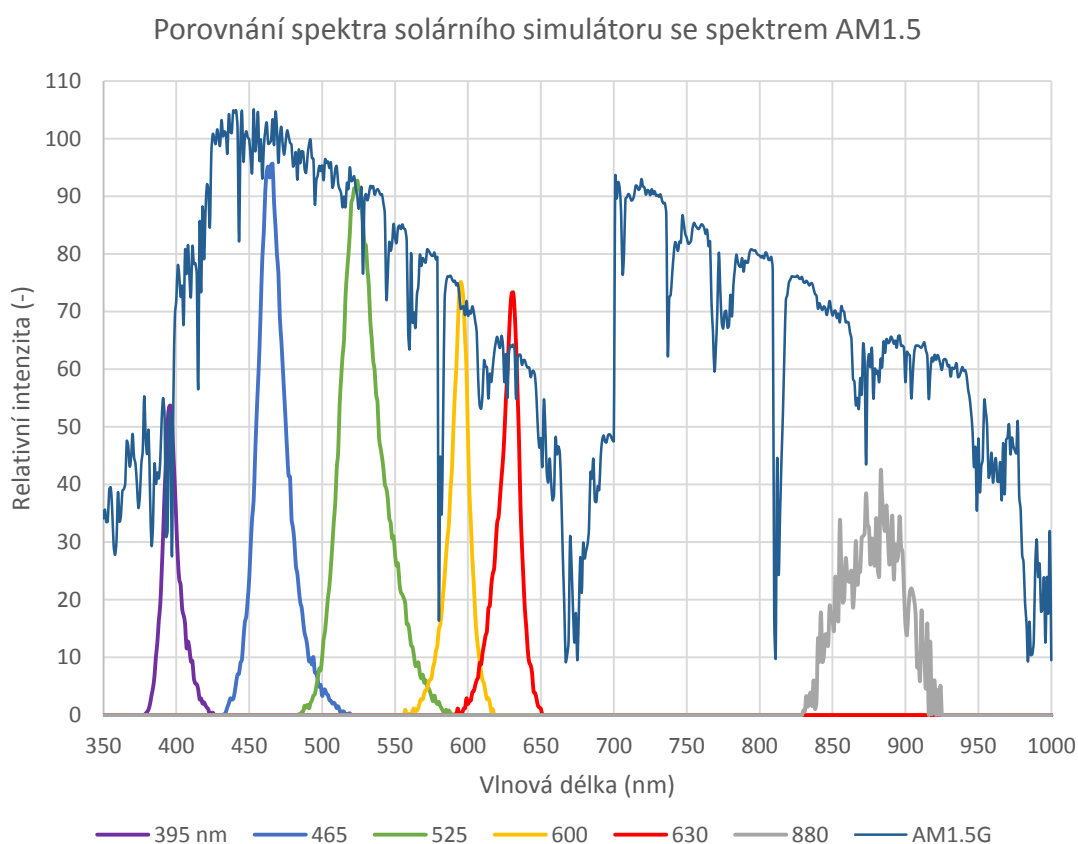
Obrázek 17 – Solární simulátor



Obrázek 18 – Solární simulátor

## 4.2 Napodobení spektra

Jedním z požadavků simulátoru bylo napodobení spektra AM1.5G, a to alespoň na určitých vlnových délkách. Jak je vidět na grafu 2, tak tento požadavek byl splněn až na infračervené diody, které nedosahují takové intenzity, jak dokládá přiložený manuál. Navíc spektrometr, kterým byly intenzity osvětlení měřeny, má na vyšších vlnových délkách (800 nm a více) sníženou citlivost. Proto jsem využil práce Ing. Martina Kubíčka, který se mimo jiné zabýval také kalibrační tabulkou pro tuto sondu a naměřené hodnoty jsem přepočtl. Kvůli tomuto přepočtu není graf intenzity infračervených diod tak „hezký“ jako ostatní, protože při vlnové délce 880 nm je kvůli citlivosti nutno hodnoty vynásobit skoro desetkrát.

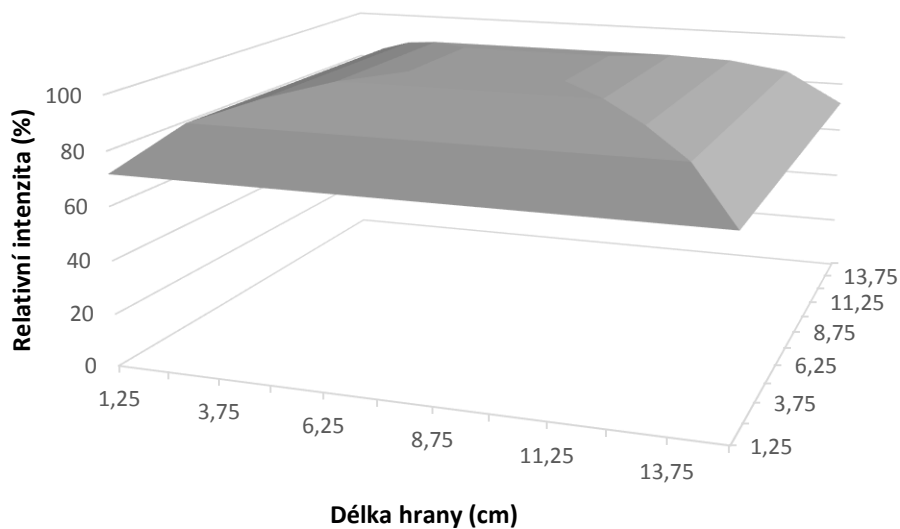


**Graf 2 - Porovnání spektra solárního simulátoru se spektrem AM1.5**

### 4.3 Homogenita osvětlení

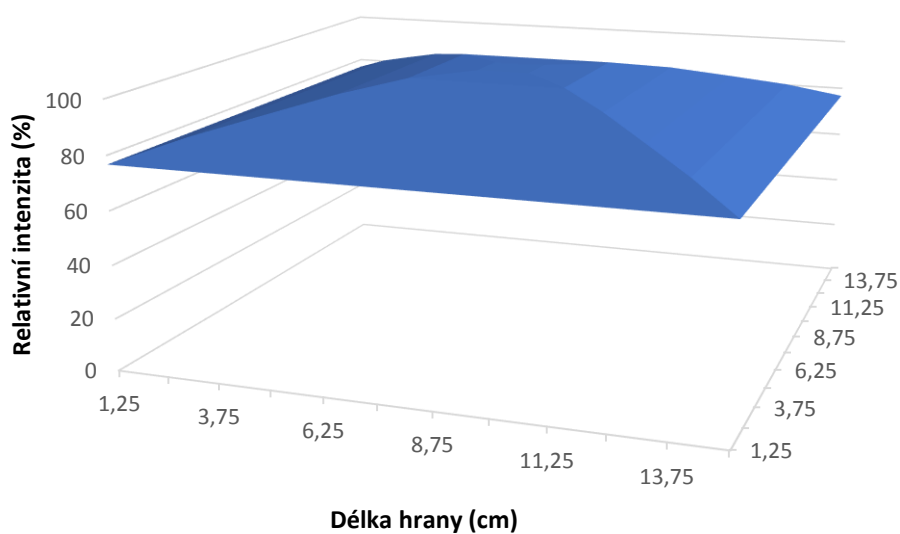
Další z požadavků na solární simulátor je dosažení homogenního osvětlení. Měření homogenity jsem provedl malým solárním článkem, kterým jsem posouval pod samotným simulátorem. Na následujících grafech je vidět, že na okrajích simulátoru je intenzita slabší než ve středu.

Homogenita osvětlení pro ultrafialové diody (395nm)



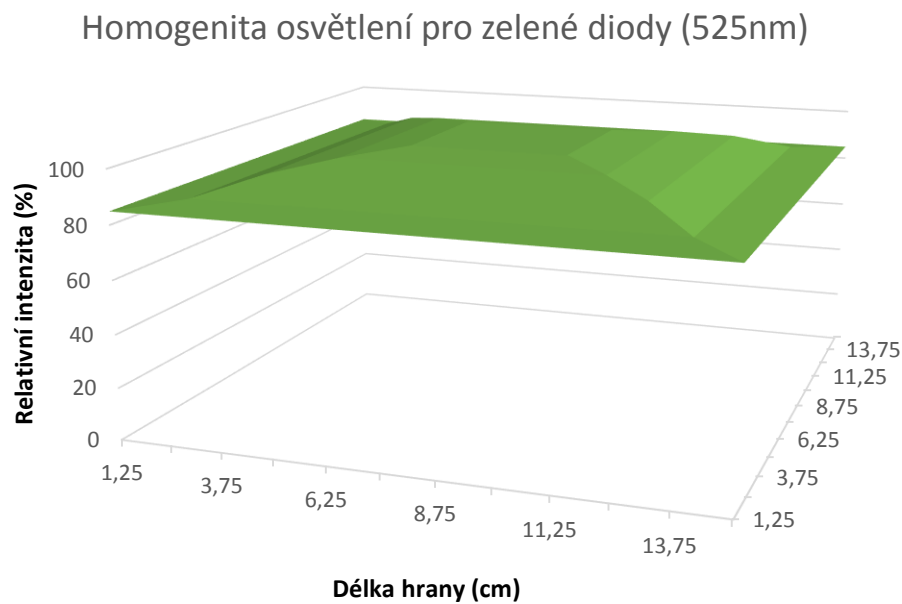
Graf 3 – Intenzita osvětlení pro ultrafialové diody

Homogenita osvětlení pro modré diody (465nm)



Graf 4 - Intenzita osvětlení pro modré diody

Z minulé kapitoly je patrné, že se na simulátoru nachází šest druhů LED diod. Homogenita osvětlení ultrafialových diod je vyobrazena na grafu 3, kde je vidět, že intenzita klesne pod 80% až na okrajích ozařované plochy. Infračervené a modré diody mají na plošném spoji stejné rozložení a vzhledem k tomu, že mají stejné vyzařovací úhly, předpokládám tedy stejnou nebo jen málo rozdílnou homogenitu. Poslední diody jsou červené, žluté a zelené. Ty mají také stejné rozložení a stejný vyzařovací úhel, proto opět předpokládám, že graf homogenity bude stejný. Proti očekávání je homogenita u těchto tří typů diod nejlepší a i na okrajích simulátoru je intenzita nad 80%, což považuji za velmi dobrý výsledek.



Graf 5 - Intenzita osvětlení pro zelené diody



#### 4.4 Kalibrace simulátoru

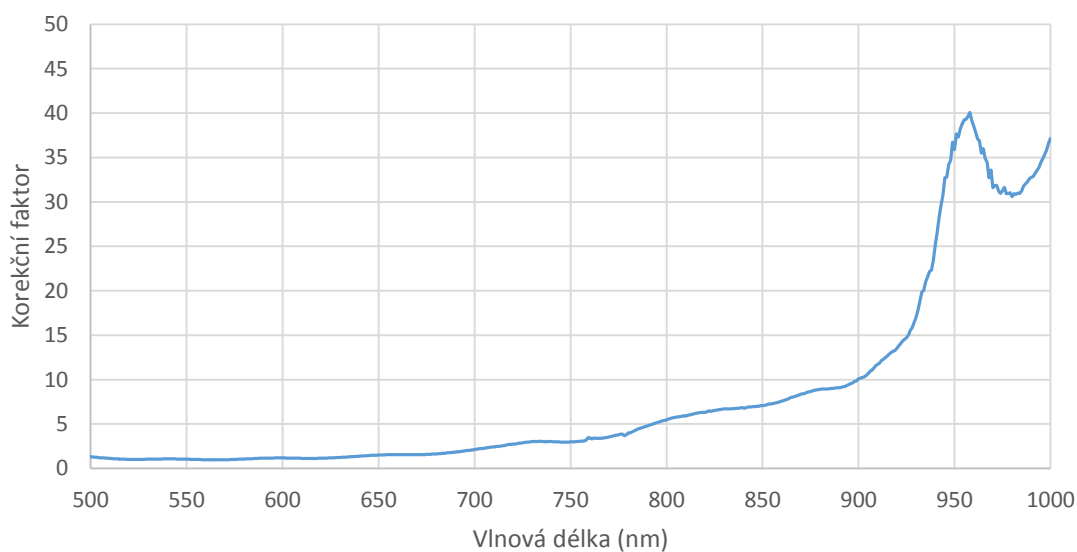
Po sestavení solárního simulátoru je potřeba ho kalibrovat. Na simulátoru je možné nastavit dvě libovolná spektra. Ke kalibraci je potřeba spektrometr - v mém případě Red Tide 650 od firmy OceanOptics s rozsahem 350 nm až 1000 nm.



Obrázek 19 – Spektrometr Red Tide 650

Tento spektrometr navzdory tvrzení výrobce nemá lineární citlivost, a proto je nutné využít korekce pro získání přesné charakteristiky. Korekční křivka popisující citlivost spektrometru je vidět na grafu 6 a je důležitá především pro infračervenou oblast.

Závislost korekčního koeficientu na vlnové délce

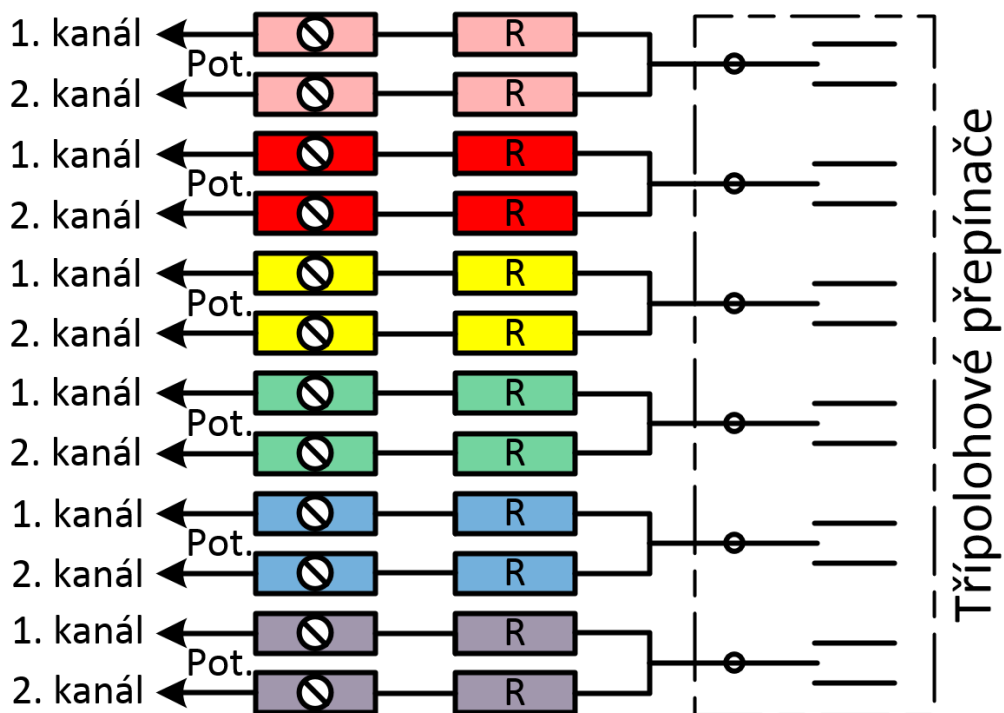


Graf 6 – Závislost korekčního faktoru na vlnové délce



Pokud máme k dispozici spektrometr a korekční křivku, je možné začít s kalibrací. Začínáme tím, že pomocí potenciometrů na vrchním plošném spoji (řazených po párech tak, že každý pár odpovídá dvěma kanálům stejné vlnové délky) nastavíme intenzitu infračervených diod (mají nejmenší výkon) a přepočítáme intenzity potřebné na ostatních vlnových délkách podle požadovaného spektra (v tomto případě AM1,5 z kapitoly 2.1.5). Poté pomocí ostatních potenciometrů následně nastavíme zbylé vlnové délky. Pokud by měl spektrometr lineární charakteristiku, bylo by možné nastavit simulátor mnohem přesněji. Bohužel z grafu 6 je vidět, že charakteristika je silně nelineární a není možné jí zcela přesně přepočítat na přesné hodnoty.

Na obrázku 20 je vidět dvanáct potenciometrů, které mění intenzitu osvětlení. Po směru hodinových ručiček se zvyšuje intenzita a v protisměru hodinových ručiček se intenzita snižuje. Potenciometry jsou 26 otáčkové, a proto je možné velmi přesně regulovat napětí na operačních zesilovačích (intenzitu).



Obrázek 20 – Návrh potenciometrů připojených na přepínače

## 5 Naměřené výsledky

V této kapitole uvedu výsledky měření pěti fotovoltaických článků s různou technologií výroby. Bohužel spektrální charakteristiky článků nejsou známé a výrobci je nedodávají. Proto jsou následující charakteristiky obkreslené z různých manuálů od různých výrobců, proto nemusí být vždy přesné.

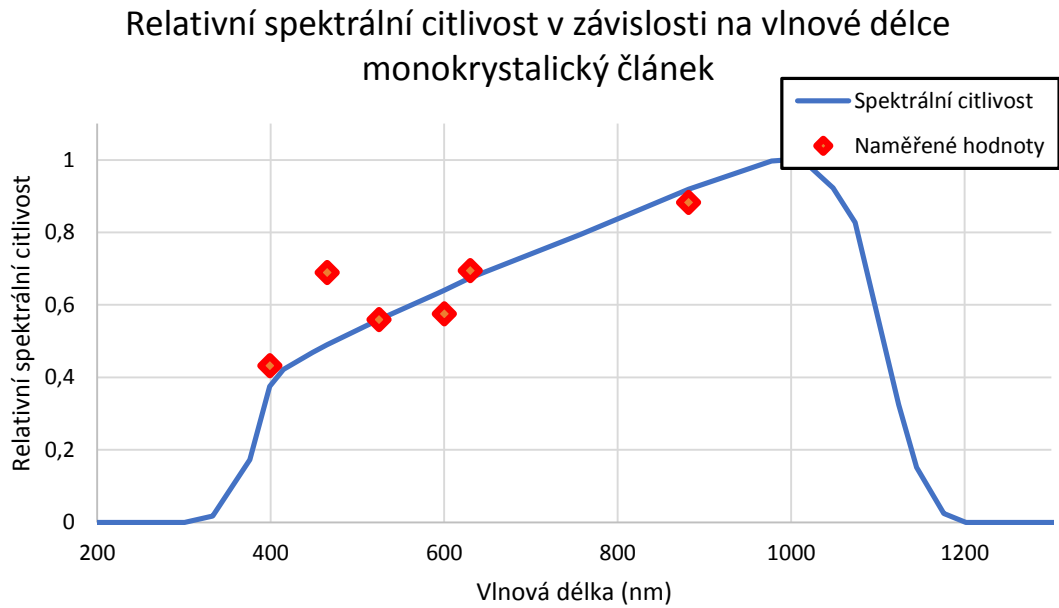
U každého článku je uvedena tabulka s pěti naměřenými hodnotami proudů u každé vlnové délky. Pět hodnot je proto, že byla provedena série měření pěti článků a byla pětkrát zopakována. Článek není možné pokaždé umístit do stejné polohy, což má vliv na výsledky měření (každý článek musíme mezi jednotlivými měřeními ručně vyndat a znovu umístit pod simulátor). Dále je zde průměrná hodnota ze všech pěti měření a přepočet na proud odpovídající spektrální citlivosti referenčního spektra. V tabulce je vždy silně zvýrazněná hodnota, podle které proběhl přepočet.

### 5.1 Monokrystalický křemíkový článek

Z grafu 7 je patrné, že tento článek je citlivý v širokém spektru (od cca 350 nm až do cca 1150 nm). Nejvíce je tento článek efektivní v infračervené oblasti.

Vlnová délka (nm)	395	465	525	600	630	880
1. Měření (mA)	27,0	42,1	34,4	35,8	42,8	54,6
2. měření (mA)	26,6	41,9	34,4	35,5	42,7	54,2
3. měření (mA)	26,5	42,1	34,4	35,4	42,6	54,0
4. měření (mA)	26,3	43,0	34,2	35,4	42,6	54,1
5. měření (mA)	26,7	43,0	34,4	35,1	42,9	54,5
Průměrný proud (mA)	26,6	42,4	34,4	35,4	42,7	54,3
Maximální odchylka (%)	1,5	1,4	0,6	1,1	0,5	0,6
Normovaný proud (mA)	0,43	0,69	0,56	0,57	0,69	0,88

Tabulka 1 - Naměřené hodnoty pro monokrystalický článek



**Graf 7 – Porovnání relativní citlivosti pro monokrystalický článek**

### 5.1.1 Zhodnocení

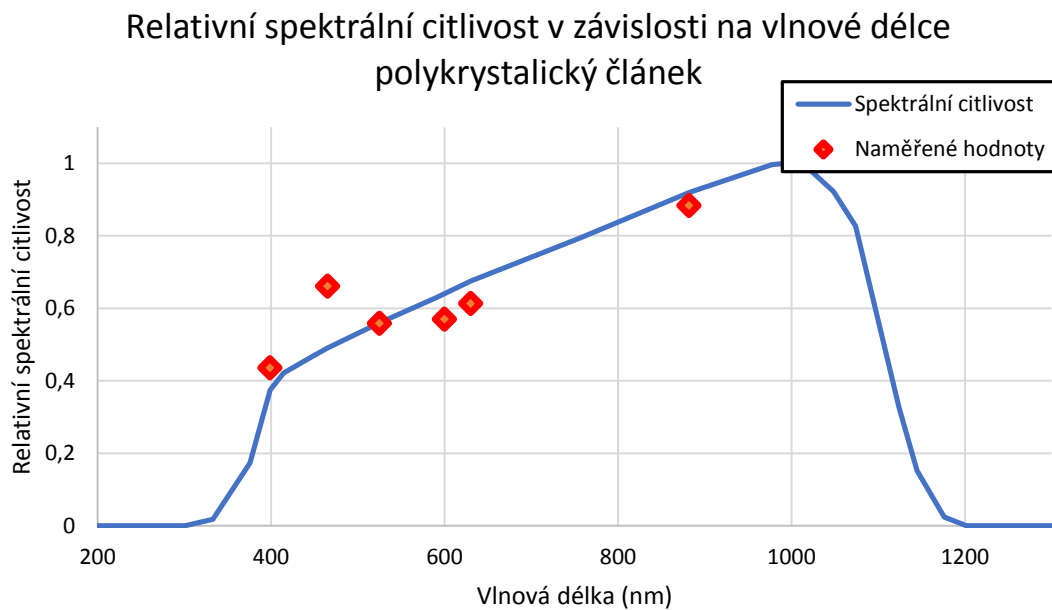
Je patrné, že monokrystalický článek má širší spektrální citlivost, než je rozsah solárního simulátoru. Z grafu je však patrné, že až na diody, které mají střední vlnovou délku 465 nm, hodnoty přibližně odpovídají teoretické křivce. To, že tato hodnota vystupuje, je zřejmě dané nepřesnou kalibrací simulátoru. Z opakovaného měření je patrné, že vliv polohy a opakovaného měření může mít maximální odchylku okolo 1,5% a to na vlnové délce 395 nm.

## 5.2 Polykrystalický solární článek

Tento článek je svojí charakteristikou velmi podobný monokrystalickému článku.

Vlnová délka (nm)	395	465	525	600	630	880
1. měření (mA)	19,4	28,7	24,6	25,1	27,0	39,1
2. měření (mA)	19,1	29,2	24,7	25,2	27,1	39,1
3. měření (mA)	19,0	29,1	24,6	25,2	26,8	38,9
4. měření (mA)	19,2	29,6	24,4	24,9	27,0	38,8
5. měření (mA)	19,2	28,7	24,6	25,0	27,2	38,7
Průměrný proud (mA)	19,2	29,1	24,6	25,1	27,0	38,9
Maximální odchylka (%)	1	1,4	0,8	0,8	0,7	0,5
Normovaný proud (mA)	0,43	0,69	0,56	0,57	0,69	0,88

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty pro polykrystalický článek



Graf 8 – Porovnání relativní citlivosti pro polykrystalický článek

### 5.2.1 Zhodnocení

Pokud má článek stejnou charakteristiku a stejné vlastnosti jako monokrystalický článek, dá se předpokládat, že i výsledky spektrální charakteristiky budou podobné. Opět je tedy vidět drobná odchylka na vlnové délce 465 nm. Polykrystalický článek je větší než monokrystalický a maximální odchylka způsobená opakovaným měřením a vlivem polohy je 1,4% na 465 nm.

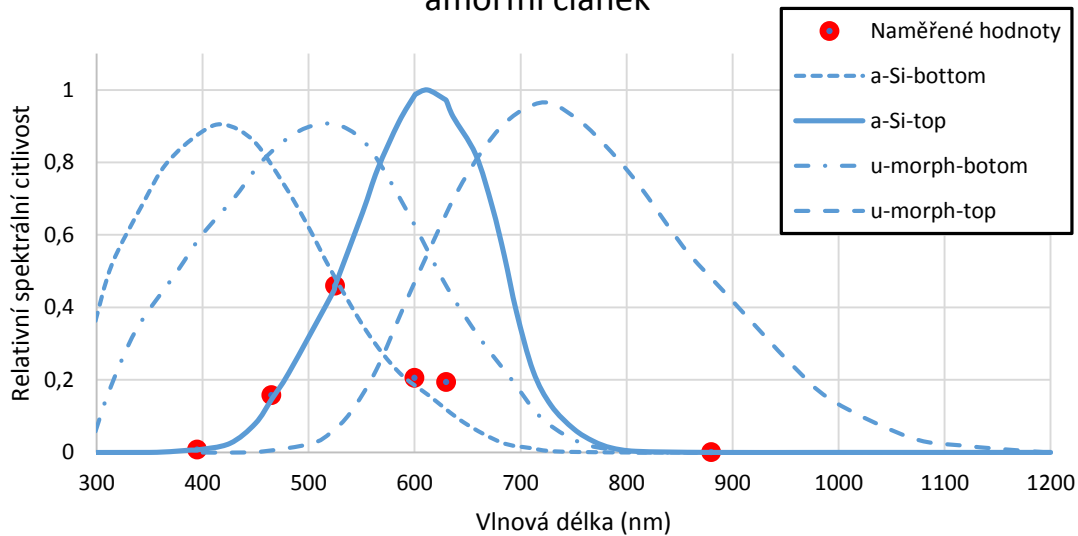
### 5.3 Amorfni krystalický článek

Tento článek je na tom podstatně hůře než předchozí články na bázi křemíku. Jeho spektrální charakteristika by měla také začínat přibližně na 350 nm, ale končí přibližně na 700 nm. Je tedy možné otestovat jeho reakci na infračervené světlo.

Vlnová délka (nm)	395	465	525	600	630	880
1. měření (mA)	0,018	0,396	1,147	0,510	0,487	0
2. měření (mA)	0,018	0,388	1,145	0,511	0,483	0
3. měření (mA)	0,018	0,395	1,149	0,513	0,482	0
4. měření (mA)	0,018	0,394	1,150	0,515	0,482	0
5. měření (mA)	0,018	0,397	1,152	0,513	0,487	0
Průměrný proud (mA)	0,018	0,394	1,149	0,512	0,484	0
Maximální odchylka (%)	0	1,5	0,4	0,4	0,6	0
Normovaný proud (mA)	0,007	0,15	0,46	0,2	0,19	0

Tabulka 3 - Naměřené hodnoty pro amorfni článek

## Relativní spektrální citlivost v závislosti na vlnové délce amorfní článěk



Graf 9 – Porovnání relativní citlivosti pro amorfní článěk

### 5.3.1 Zhodnocení

Podle očekávání článěk nereaguje na infračervené záření, ale ani na 395 nm, tedy na přechod ultrafialového záření. Můžeme tedy říci, že měřený článěk funguje pouze v rozmezí 400 nm – 800 nm a naopak v ultrafialových a infračervených oblastech nereaguje vůbec. Vlivem polohy a opakovaného měření byla v jednom případě odchylka 1,5%, ale ostatní odchylky jsou pod 1%

Hodnoty naměřené na vlnových délkách 600 nm a 630 nm jsou ale podstatně menší, než jsem očekával.

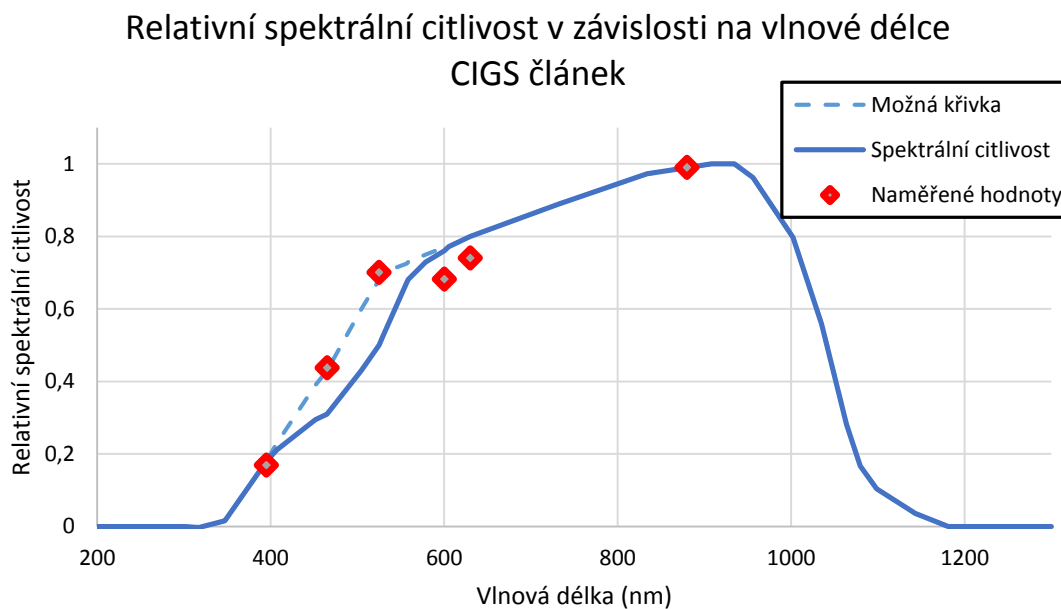
V grafu 9 je zobrazeno několik typů amorfních článků. Jsou zde dva zástupci klasických amorfních článků a dva zástupci mikro-amorfních článků. Vždy je zobrazena horní vrstva a spodní tandemová vrstva. Je vidět, že pokud máme neznámý druh článku, můžeme pomocí tohoto jednoduchého solárního simulátoru určit i jeho druh.

## 5.4 CIGS článek

Článek ze směsi mědi, india, galia a selenu má oproti křemíkovému článku také užší spektrální citlivost. Začíná okolo 400 nm a končí nad 1000 nm.

Vlnová délka (nm)	395	465	525	600	630	880
1. měření (mA)	0,216	0,550	0,896	0,881	0,935	1,272
2. měření (mA)	0,218	0,561	0,893	0,880	0,942	1,272
3. měření (mA)	0,215	0,560	0,893	0,860	0,950	1,262
4. měření (mA)	0,217	0,559	0,891	0,875	0,950	1,261
5. měření (mA)	0,215	0,564	0,901	0,860	0,950	1,252
Průměrný proud (mA)	0,216	0,559	0,895	0,871	0,945	1,264
Maximální odchylka (%)	0,9	1,6	0,7	1,3	1	1
Normovaný proud (mA)	0,17	0,44	0,70	0,68	0,74	0,99

Tabulka 4 - Naměřené hodnoty pro CIGS článek



Graf 10 – Porovnání relativní citlivosti pro CIGS článek

### 5.4.1 Zhodnocení

Z naměřených údajů je vidět, že hodnoty opisují teoretickou křivku spektrální citlivosti. Drobné výchylky jsou také dány nepřesnou kalibrací solárního simulátoru a nepřesnou referenční křivkou. Je ale vidět, že v infračervené oblasti mají tyto články nejvyšší citlivost.

## 5.5 Organický článek

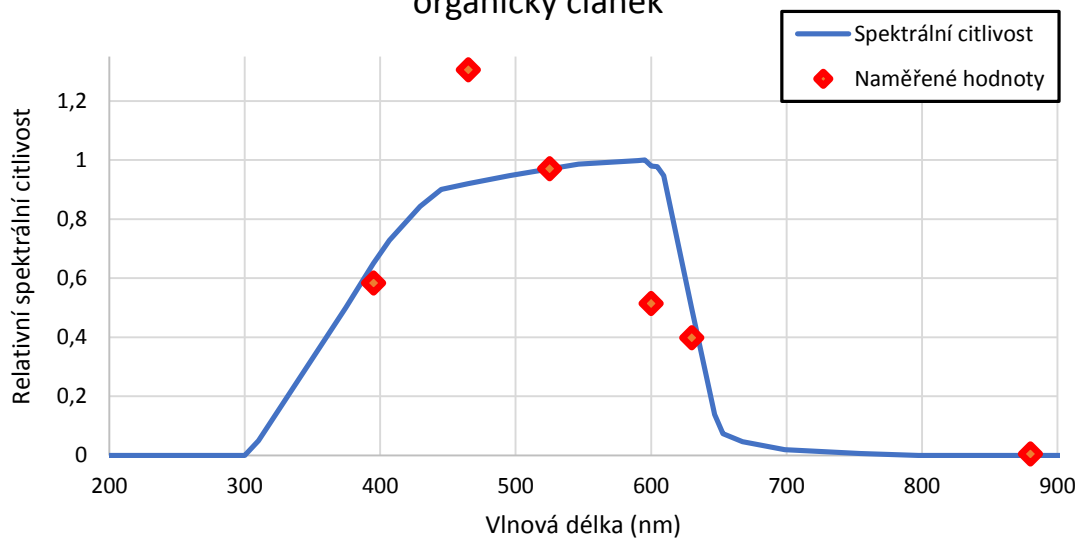
Poslední byl měřen organický článek. Jeho spektrální charakteristika má nejužší aktivní pásmo ze všech. Článek reaguje pouze do vlnových délek okolo 650 nm.

Vlnová délka (nm)	395	465	525	600	630	880
1. měření (mA)	1,12	2,46	1,82	0,98	0,75	0,009
2. měření (mA)	1,10	2,46	1,83	0,97	0,75	0,009
3. měření (mA)	1,09	2,46	1,84	0,97	0,75	0,009
4. měření (mA)	1,09	2,46	1,84	0,97	0,75	0,009
5. měření (mA)	1,11	2,46	1,83	0,96	0,75	0,009
Průměrný proud (mA)	1,10	2,46	1,83	0,97	0,75	0,009
Maximální odchylka (%)	1,8	0	0,6	1	0	0
Normovaný proud (mA)	0,58	1,31	0,97	0,51	0,39	0,005

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty pro organický článek



### Relativní spektrální citlivost v závislosti na vlnové délce organický článek



Graf 11 – Porovnání relativní citlivosti pro organický článek

#### 5.5.1 Zhodnocení

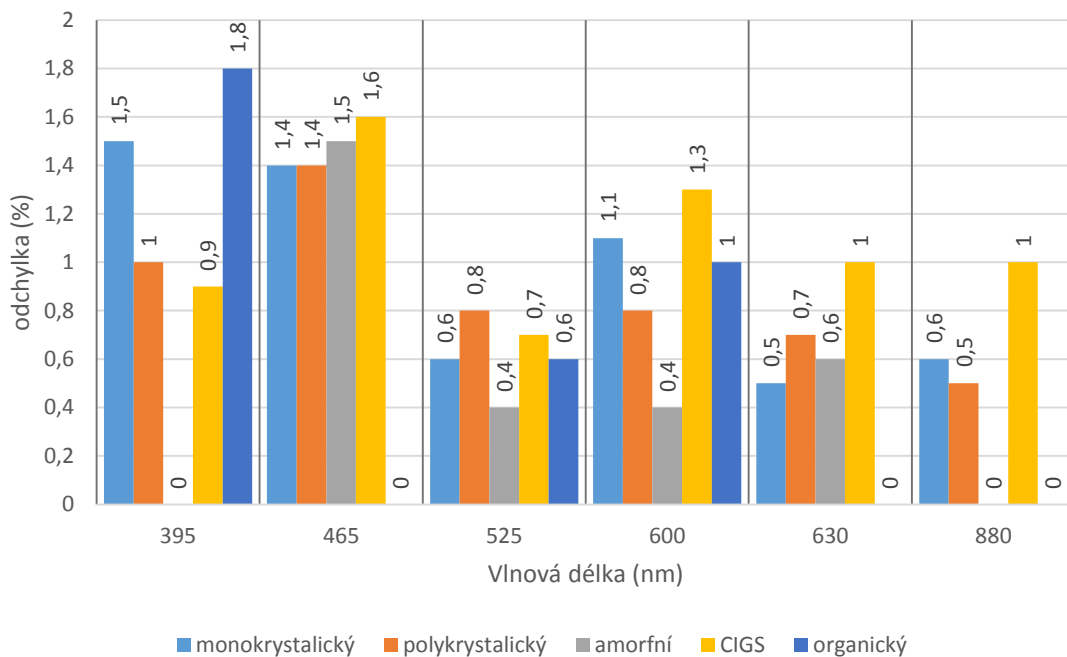
Jako u předchozích měření je vidět nepřesná kalibrace modrých diod (465 nm), ale ostatní vlnové délky odpovídají teoretické křivce. Také je patrné, že v infračervené oblasti tyto články vůbec nereagují.

## 5.6 Rozbor naměřených dat

### 5.6.1 Vliv opakovatelnosti a polohy

Podstavec použitého solárního simulátoru byl původně navržen na články s velikostí 160 mm x 160 mm, které nemají rámeček. Ve školách se pracuje s články, které mají navíc ocelový rámeček kvůli chlazení a hlavně kvůli mechanické ochraně před studenty. Tyto články jsem měl k dispozici i já. Kvůli tomuto rámečku se články těžko umísťují vždy na stejné místo pod simulátor a to způsobuje podstatnou část odchylky. Absolutní odchylka je u všech článků podobná na všech vlnových délkách, ale vzhledem k tomu, že s rostoucí vlnovou délkou také roste proud, je procentuální odchylka menší. Vlivem opakování měření (bez změny polohy) se proud článku neměnil.

Porovnání odchylky v závislosti na vlnové délce  
(vliv opakovatelnosti a polohy článku)



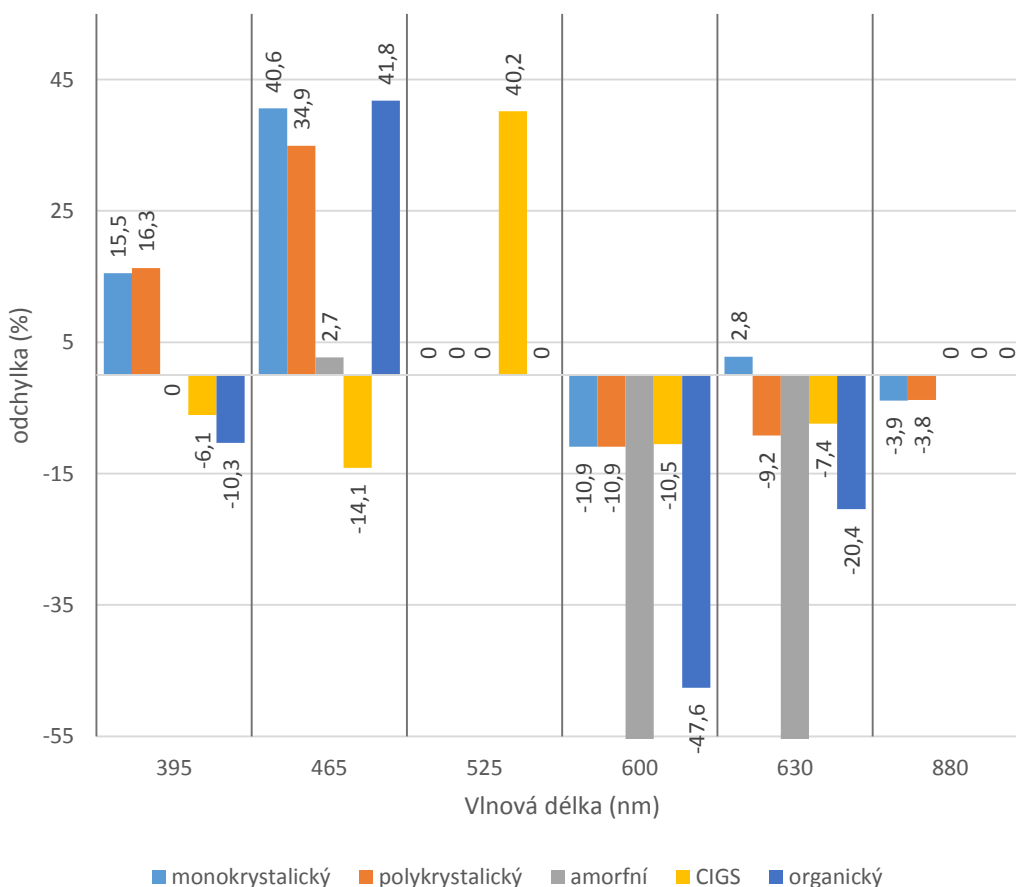
Graf 12 – Porovnání odchylky měření na všech vlnových délkách

### 5.6.2 Odchylky od teoretické křivky

Hned na začátek je potřeba vysvětlit, co následující graf 13 znázorňuje. V tomto grafu je několik nul a dvě extrémní hodnoty. Tyto dvě situace však nemusí vždy znamenat chybu. Nejprve je nutné si říci, že některé nuly znamenají, že podle konkrétní vlnové délky, ve které se nula nachází, je proud normovaný.

V prvním úseku je jedna nula, která je vytvořená uměle. Vlnová délka 395 nm se nachází na začátku spektrální citlivosti amorfního článku. Vzhledem k nepřesnosti této křivky a velikosti naměřeného proudu je odchylka zcela mimo graf. Velikost této hodnoty není tak podstatná jako informace, že na této vlnové délce začíná teprve článek reagovat. V úseku vlnové délky 525 nm jsou hned čtyři nuly. Tyto nuly znamenají, že jsou hodnoty podle této vlnové délky normované. Poslední nuly jsou v úseku 880 nm. Podle této vlnové délky je normován pouze CIGS článek. Ostatní nuly v tomto úseku značí, že zbylé články na tuto vlnovou délku nijak nereagují, proto nemůžeme mluvit o žádné odchylce.

Porovnání odchylky v závislosti na vlnové délce  
(odchylky od teoretického spektra)



Graf 13 – Porovnání odchylky v závislosti na vlnové délce

Lze tedy přejít k samotnému vyhodnocování výsledků. Celou dobu musíme brát na zřetel fakt, že teoretické křivky nejsou přesné a ani nemusí být stejné, jako má konkrétní měřený článek.

Nejprve úsek vlnové délky 395 nm. Z grafu 13 je vidět, že všechny odchylky jsou pod 20%. V rámci přesnosti kalibrace je tento výsledek velmi dobrý. Obdobné je to pro infračervený úsek 880 nm. Zde je odchylka pod 5%. To se dá označit jako vynikající výsledek. Samozřejmě zde pomáhá skutečnost, že dva články na tuto vlnovou délku vůbec nereagují.

V úseku vlnové délky 465 nm je vidět špatná kalibrace simulátoru, protože většina hodnot je přibližně o 40% vyšší, než je nutné. Také je vidět, že CIGS článek nemá na pravé straně přesnou teoretickou křivku spektrální citlivosti. Další oblastí je méně zajímavý úsek 525 nm, podle kterého jsem čtyři články normoval. Je zde také extrémní hodnota, a to u CIGS článku, kde je na grafu 10 vidět, jak by teoreticky mohla probíhat křivka (přerušovaná čára) spektrální citlivosti, aby tato hodnota dávala smysl.

Poslední dva úseky 600 nm a 630 nm jsou si dost podobné. Obě mají odchylky kolem 10% a vynikají u nich článek amorfni a článek organický, které, jak se zdá, mají zakázanou mez níže, než je na teoretické křivce.

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo zpracovat teorii potřebnou k základnímu měření spektrální citlivosti fotovoltaických článků a návržení velmi levného solárního simulátoru k otestování těchto teorií. Posledním bodem této práce bylo pomocí navrženého simulátoru ověřit, zda je možné pomocí LED diod dosáhnout požadované intenzity osvětlení a otestovat několik různých fotovoltaických článků.

Po návrhu a sestrojení solárního simulátoru se vyskytlo několik problémů. Prvním problémem bylo sehnat LED diody, které by mohly plně napodobit spektrum od cca 300 nm až po 1300 nm. Podle normy je kladen důraz na to, že rozestupy mezi maximy vlnových délek by neměly být větší než 50 nm. Ukázalo se, že nelze vyrobit LED diodu o jakékoliv vlnové délce a ne na všech vyrobitelných vlnových délkách může být LED dioda vysoce svítivá. Dalším problémem bylo dosažení požadované homogenity, která se dá dosáhnout navýšením počtu LED diod, ale musí se vytvořit kompromis mezi počtem diod, velikostí plošného spoje a počtem vlnových délek, na kterých chceme měřit. Posledním problémem byla kalibrace intenzit LED diod. I když jsou nastavovací potenciometry vysokootáčkové, citlivost spektrometru, kterým se prováděla kalibrace, je nelineární v celém rozsahu, a proto výsledná kalibrace není zcela přesná.

V poslední části práce jsou uvedeny naměřené hodnoty a zhodnocení ke každému druhu článku. U mono a polykrystalických křemíkových článků je patrné, že naměřené hodnoty přibližně odpovídají teoretickým křivkám. Hodnoty naměřené u amorfního článku neodpovídají ani jedné z křivek uvedených v grafu 9. Dá se ale určit, že se jedná o amorfni tandemový článek, protože se mu naměřené hodnoty nejvíce podobají. U organického článku také hodnoty zcela neodpovídají referenční křivce. U amorfního i u organického článku bylo ověřeno, že v infračervené oblasti vůbec nereagují a amorfni článek nereaguje ani na ultrafialové záření. U CIGS článku opět naměřené hodnoty korespondují s teoretickou křivkou.

Solární simulátor se tedy ukázal jako dostačující například pro jednoduché předběžné laboratorní testy nebo na výukové experimenty. Simulátor by šlo v budoucnu vylepšit přidáním dalších typů LED diod a přesnější kalibrací na lepším spektrometru. Také by bylo možné přidat optický systém pro lepší homogenitu osvětlení.

## 7 Zdroje

- [1.] PVEDUCATION. PVEDUCATION [ONLINE]. 2014, 5. 3. 2014 [cit. 2014-12-07]. DOSTUPNÉ Z: PVEDUCATION.ORG
- [2.] KUBÍČEK, Bc. Martin. *Spektrální citlivost fotovoltaických článků*. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [3.] ČSN EN 60904-3. *Fotovoltaické součástky - Část 3: Zásady měření pro fotovoltaické (PV) solární součástky pro pozemní použití, včetně referenčních údajů o spektrálním rozložení ozařování*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, prosinec 2008.
- [4.] ČSN EN 60904-8. *Fotovoltaické součástky Část 8: Měření spektrální citlivosti fotovoltaické součástky*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [5.] BENTHAM, Instruments Ltd. *Spectral Characterisation of Photovoltaic Devices*. [online]. S. 2-8 [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: [http://www.bentham.co.uk/pdf/PV\\_Technical\\_Note.pdf](http://www.bentham.co.uk/pdf/PV_Technical_Note.pdf)
- [6.] ALCHEMIE LIMITED ORG. *Solar facts and advice* [online]. 2013 [cit. 2014-12-27]. Dostupné z: <http://www.solar-facts-and-advice.com/>
- [7.] [online]. 2014, 17 Listopad 2014; 11:16 [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Copper\\_indium\\_gallium\\_selenide\\_solar\\_cells](http://en.wikipedia.org/wiki/Copper_indium_gallium_selenide_solar_cells)
- [8.] TURBO SOLAR. *Turbo solar* [online]. 2010 [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.heliostar.cz/fotovoltaika.php>
- [9.] ČSN EN 60904-7. *Fotovoltaické součástky - Část 7: Výpočet chyby spektrálního nepříznivého působení při zkouškách fotovoltaické součástky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [10.] WAVELABS. *Sinus-220* [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.wavelabs.de/>
- [11.] KUROKAWA, Kosuke. *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion: joint conference of 13th PV Science*. [Osaka], Japan: WCPEC-3 Organizing Committee, 2003. 3 v. ISBN 49-901-8162-X.
- [12.] PLYTA, F. *Potential for LED solar simulators*. Loughborough Univ., Loughborough, UK, 16-21. 6. 2013
- [13.] WIKIPEDIE. *Czerny-turner* [online]. [cit. 2014-12-21]. Dostupné z: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e8/Czerny-turner.png>
- [14.] DIMITRIADIS, C. A. *Evaluation of grain boundary recombination velocity in polycrystalline silicon from the spectral response of Schottky-barrier solar cells*. 2005. ISBN 10.1109/t-ed.1986.22744. University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece.