

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



Studium antireflexních vrstev barevných solárních
článků pomocí vláknového spektrometru

Antireflection layers of coloured solar cells studied by optical
fibre spectrometer

bakalářská práce

Radek Nevyhoštěný

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Radek Nevyhoštěný**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Studium antireflexních vrstev barevných solárních článků pomocí vláknového spektrometru**

Pokyny pro vypracování:

1. Rešeršní část – reflexe na tenké vrstvě, reprezentace spektra do RGB
2. Teoreticky zvládnout metodu výpočtu parametru Étendue
3. Analýza parazitního světla měřícího přípravku
4. Návrh a realizace opatření pro potlačení parazitního světla
5. Testovací měření spekter a jejich reprezentace v RGB
6. Studium tvaru povrchové textury solárních článků elektronovým mikroskopem
7. Jednoduché matematické modelování efektu reflexe

Seznam odborné literatury:

- [1] článek: J.H. Selj , T.T. Mongstad, R. Søndena, E.S. Marstein, Reduction of optical losses in colored solar cells with multilayer antireflection coatings, Solar Energy Materials & Solar Cells 95 (2011) 2576–2582
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Etendue>
- [3] kniha: Konrad Mertens, Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice, ISBN: 978-1118634165
- [4] kniha: Ralf B. Wehrspohn, Uwe Rau: Photon, Management in Solar Cells, ISBN: 978-3527411757
- [5] <http://oberon.physics.muni.cz/color/>
- [6] <http://www.pvlighthouse.com.au/calculators/OPAL%20/OPAL%20.aspx>

Vedoucí: Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 8. 3. 2016

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 25.5.2016

.....

Radek Nevyhoštěný

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Mgr. Jakubu Holovskému, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této práce. Dále také děkuji doc. Ing. Václavu Prajzlerovi, Ph.D. za asistenci při výrobě přípravku s polymerem, paní Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za pomoc při napařování vnitřního zrcadla a panu Ing. Tomáši Reichlovi za snímky z elektronového mikroskopu.

Název práce: Studium antireflexních vrstev barevných solárních článků pomocí vláknového spektrometru

Autor: Radek Nevyhoštěný

Vedoucí práce: Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.

Abstrakt: Tato práce se zabývá studiem antireflexních vrstev solárních článků. Pro stanovení významu těchto vrstev ve strukturách komerčních článků je v teoretické části popsán mechanismus absorpce a reflexe fotonů na rozhraní prostředí. Naměřená data v praktické části jsou porovnávána s vytvořenými matematickými modely. Je porovnáváno spektrum reflexe solárního článku v závislosti na vlnové délce a je porovnáván barevný vjem s vypočtenou reprezentací naměřeného spektra do RGB modelu. Reflexe je modelována pro planární povrch solárního článku a pro povrch s náhodnými pyramidami.

Pro samotné měření je navržena souprava měření reflexe a transmise s použitím duálního světlovodu a světelného zdroje s halogenovou žárovkou. Zvýšení úhlu zachycení odraženého světla je docíleno použitím buď homogenizačního hranolu nebo homogenizační trubice s vnitřním zrcadlem. Obě varianty měřicí soupravy jsou porovnávány z hlediska dosažené intenzity, deformace spektra a míry odrazů na vnitřních rozhraních. Funkce soupravy je ověřena měřením osmi vzorků solárních článků s různou strukturou antireflexní vrstvy. Sada měřených spekter odpovídá tvarově matematickému modelu a přepočtené RGB barvy korespondují s barvou použitých článků.

Klíčová slova: solární články, antireflexní vrstvy, měření reflexe, spektrální analýza

Title: Antireflection layers of coloured solar cells studied by optical fibre spectrometer

Author: Radek Nevyhoštěný

Supervisor: Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.

Abstract: The aim of this work is the study of the antireflection layers of solar cells. For determining the role of such layers in the structures of commercial solar cells, the mechanism of absorption and reflection of photons on an interface is described. Measured data are compared with mathematical models, created in the practical part of this work. The two models are reflectance spectrum of solar cell dependent on wavelength and colour perception of said spectrum transformed to RGB model. Reflectance can be computed for planar surface and surface with random pyramids.

For measurement, equipment capable of measuring reflectance and transmittance using a dual branch light guide illuminated by halogen lamp is designed. Widening of the acceptance angle of reflected light is done by using homogenizing rod or homogenizing tube with internal mirror. Both variations of the measuring equipment are compared in regards to achieved light intensity, deformation of the spectrum and the value of reflectance on internal interfaces. Operation of the measuring equipment is verified by measurement of eight samples of solar cells with different structures of the antireflection layer. Set of measured spectra corresponds by shape to mathematical model and calculated RGB colours match those of solar cells.

Key words: solar cells, antireflection layers, measurement of reflectance, spectral analysis

Obsah

| | |
|---|-----------|
| 1 Úvod | 13 |
| 1.1 Solární článek | 14 |
| 2 Šíření světla v solárním článku | 19 |
| 2.1 Absorpce fotonu..... | 19 |
| 2.2 Optické ztráty v solárním článku | 21 |
| 2.3 Matematický model reflexe | 25 |
| 2.4 Reprezentace spektra do RGB..... | 26 |
| 2.5 Étendue..... | 29 |
| 3 Měřicí přípravek | 31 |
| 3.1 Zdroj světla | 31 |
| 3.2 Optická cesta..... | 32 |
| 3.3 Souprava měření reflexe | 33 |
| 3.4 Souprava měření transmise..... | 36 |
| 3.5 Softwarové zpracování | 36 |
| 4 Měření | 39 |
| 4.1 Vývoj intenzity zdroje | 39 |
| 4.2 Měření reflexe..... | 40 |
| 4.3 Měření transmise | 45 |
| 4.4 Studium povrchu elektronovým mikroskopem..... | 46 |
| 5 Závěr | 47 |
| Použité zdroje | 49 |
| Seznam obrázků | 51 |
| Příloha A | |
| Příloha B | |

1 Úvod

Produkce solárních článků, zejména ve fotovoltaickém průmyslu, dosahuje stabilního meziročního růstu 44 % [4] (2000 až 2014) s instalovaným špičkovým výkonem přes 200 GWp [15] celosvětově. Parametrem tomuto trendu nepřímo úměrným je cena fotovoltaického modulu, která je ovlivňována především optimalizací výrobního procesu a dosažitelnou účinností dané technologie. Komerčně využívané články založené na krystalickém křemíku disponují běžně účinností 18 %, přičemž rekordní účinnost dosažená v laboratorních podmínkách je 25.6 % pro technologii krystalického křemíku. Absolutní rekord je 46 % pro vícepřechodové koncentrátorové články [4]. Je tedy zřejmé, že účinnost článku je nejen limitována cenou technologie ale i fyzikálními limity.

Pomineme-li technologické postupy zvyšování kvality absorberu neboli struktury materiálu zodpovědného za absorpci dopadajících fotonů, lze zvýšení účinnosti dosáhnout i vhodnou optimalizací optické cesty dopadajícího světla. Tímto pojmem je myšleno navržení struktury solárního článku tak, aby z dostupného svazku světla byla pouze minimální část odražena na rozhraních v struktuře a majoritní část přišla do kontaktu s absorpční vrstvou. Odraz neboli reflexe je dán rozdílným indexem lomu vzduchu vzhledem k absorpčnímu materiálu a umístěním antireflexní vrstvy na jejich rozhraní můžeme reflexi znatelně snížit.

Přímým důsledkem reflexe solárního článku, konkrétně charakteru odraženého spektra, je barva jeho povrchu z pohledu pozorovatele. Pokud dále stanovíme, že barva je mimo tvaru hlavním faktorem vizuální podoby článku, dostávají antireflexní vrstvy nový význam. Požadavky na takovéto vrstvy se postupně mění z ideálně nulové reflexe na reflexi kontrolovanou v oblasti viditelného spektra. Chceme tedy vytvořit solární článek požadované barvy s co nejmenší ztrátou v jeho účinnosti. V reálných aplikacích tohoto nelze docílit použitím jedné antireflexní vrstvy a pro dosažení širší palety barev je použito vrstev vícenásobných. Možnost reflexi solárního článku modelovat a měřením porovnat se skutečností je nezbytným předpokladem k porozumění chování antireflexních vrstev a z toho vycházejících návrhů struktur efektivnějších a ekonomicky výhodnějších.

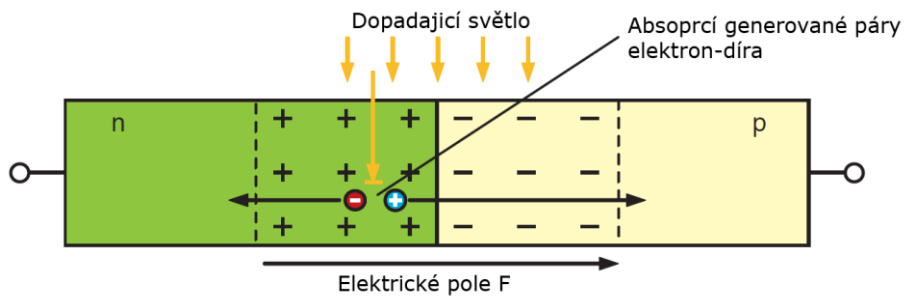
Cílem této práce je teoretický rozbor role antireflexních vrstev ve strukturách komerčních článků a materiálů použitých při jejich výrobě. V praktické části je úkolem sestavit aparaturu pro měření reflexe a transmise. Spojení poznatků teoretické části s praktickou částí je úkolem matematických modelů, které by měly měření provedené na aparatuře podporovat.

1.1 Solární článek

Pro popis problematiky antireflexních vrstev solárních článků je nejprve nutné stručně definovat základní princip funkce samotného článku a jeho konstrukci.

1.1.1 Princip solárního článku

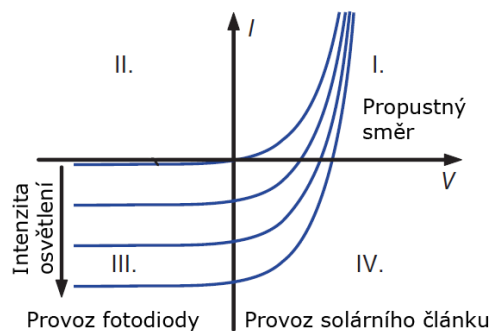
Solární článek můžeme reprezentovat fotodiodou, neboli osvětlovaným p-n přechodem (Obrázek 1.1).



Obrázek 1.1 Absorpce světla na fotodiodě [1]

Pokud má dopadající foton energii vyšší, než je absorpční hrana materiálu (1.12 eV pro krystalický křemík c-Si), dochází ke generaci volných elektronů a děr, které jsou odděleny elektrickým polem vzniklým na rozhraní p a n dopovaného materiálu. Výsledný systém lze dle prvního termodynamického zákona považovat za systém nestabilní, který se bude snažit dosáhnout rovnováhy, neboli navrácení volných elektronů do děr. Výsledné napětí mezi kontakty rozpojeného p-n přechodu musí tedy plně kompenzovat efekt elektrického pole na rozhraní. Pokud na fotodiodu následně připojíme zátěž, vzniká foton proud I_{ph} přímo úměrný konstantou k míře osvětlení E .

$$I_{ph} = k \cdot E \quad (1.1)$$

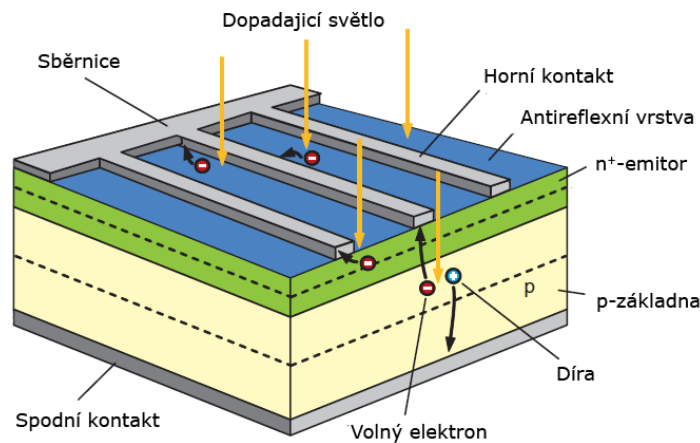


Obrázek 1.2 VA charakteristika osvětlované fotodiody [1]

Dle obrázku 1.2 je patrné, že činnosti solárního článku odpovídá IV. kvadrant provozu fotodiody, tedy kdy kladné napětí způsobí záporný směr proudu, což při vztažení směru proudu k zátěži znamená, že energie je generována. Ve zbývajících kvadrantech se při nulovém osvětlení chová fotodioda jako normální p-n přechod a je běžně využívána jako fotodetektor při provozu v třetím kvadrantu, přičemž provoz v prvním kvadrantu se nepoužívá. Při zvyšování intenzity osvětlení poté pozorujeme nárůst závěrného proudu (III. kvadrant) a růst prahového napětí (I. kvadrant).

1.1.2 Konstrukce

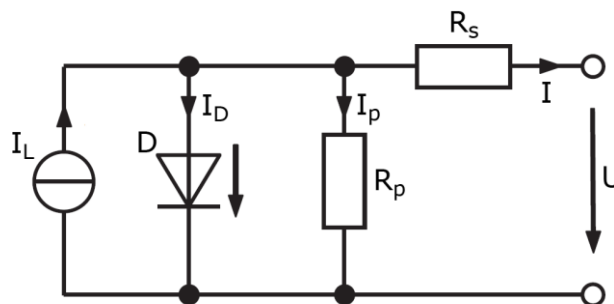
Struktura solárního článku je podobná zmiňované fotodiodě. Samotný p-n přechod se skládá ze silně dopovaného n^+ polovodiče nazývaného emitor a p základny. Při osvětlení dochází ke generaci párů elektron-díra, kdy díry difundují základnou ke spodnímu kontaktu a elektrony difundují k emitoru a jsou odvedeny k vrchním sběrnicím (Obrázek 1.3).



Obrázek 1.3 Konstrukce solárního článku [1]

1.1.2.1 Náhradní schéma a V-A charakteristika

Solární článek je zpravidla reprezentován jako obvod s proudovým zdrojem, sériovým odporem R_s a paralelně zapojenou diodou D spolu s odporem R_p . Proudový zdroj reprezentuje proud generovaný osvětlením článku a způsobuje posun charakteristiky diody do IV. kvadrantu (Obrázek 1.2).

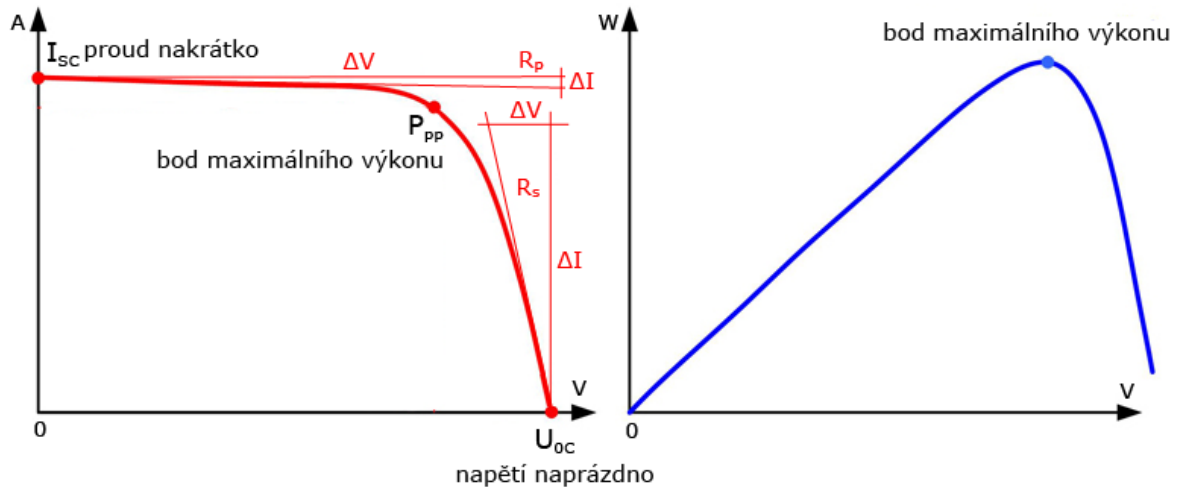


Obrázek 1.4 Náhradní schéma solárního článku

Sériový odpor reprezentuje ztráty v článku, které jsou způsobeny průchodem proudem článkem a odporem kovových kontaktů (vlastním a na rozhraní s křemíkem). Hlavním důsledkem sériového odporu je redukce fill faktoru^A a při vysoké hodnotě i pokles proudu nakrátko I_{sc} . Paralelní odpor je způsoben defekty článku vzniklými při provozu nebo již během výroby. Při nízké hodnotě tohoto odporu se jím uzavírá generovaný proud a napětí článku klesá. Tento jev je především význačný při nízké míře osvětlení.

Výslednou V-A charakteristiku lze popsat rovnicí vycházející z Schockleyho rovnice diody, kde I_L je generovaný proud, I_0 závěrný saturační proud diody, q absolutní hodnota náboje elektronu, k Boltzmannova konstanta^B, V napětí přes diodu a T absolutní teplota v kelvinech.

$$I = I_L - I_0 \exp\left[\frac{q(U + IR_s)}{nkT} - 1\right] - \frac{U + IR_s}{R_p} \quad (1.2)$$



Obrázek 1.5 V-A charakteristika a výkonová křivka solárního článku

Z V-A charakteristiky lze mimo maximálního výkonu článku určit i hodnoty odporů R_s a R_p , které způsobují odklon charakteristiky od ideálního průběhu (Obrázek 1.5).

$$-R_s = \frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (1.3)$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1.4)$$

^A **Fill faktor** je poměr mezi maximálním výkonem solárního článku a součinem napětí naprázdno s proudem nakrátko

^B **Boltzmannova konstanta** vyjadřuje vztah mezi teplotou a energií plynu, neboli jaké množství tepla je potřebné k zahřátí jedné částice ideálního plynu o jeden kelvin. Její hodnota je $k = 1.38064852 \cdot 10^{-23} \text{ [J} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$

1.1.2.2 Používané materiály

Materiálem s největší historií v oblasti fotovoltaiky je bezpochyby křemík, který díky svému hojnému výskytu a rozvinutým technologiím zpracování dominuje fotovoltaickému průmyslu. Majoritní podíl trhu náleží v současnosti solárním článkům z krystalického křemíku (92 % v roce 2014 [3]), které stále mají nejlepší poměr pořizovací ceny a potenciálně vyrobené energie. Růst poptávky vedl v tomto odvětví k přesunu většiny výroby do oblasti Číny a Taiwanu (69 % světové produkce [3]) a s tím spojený pokles ceny až na 0.58 € [2] na jeden W_p^c (Německo, únor 2016).

Druhou významnou skupinou produkce solárních panelů jsou tenkovrstvé technologie (9% světové produkce pro rok 2014 [3]). Nejčastěji zde mluvíme o plasmou deponovaném amorfním hydrogenovaném křemíku (a-Si:H), mikrokrystalickém křemíku (μ c-Si:H), kadmium telluridu (CdTe) a technologii CIGS (měď-indium-galium-selen).

Ačkoliv je produkce tenkovrstvých článků stále drahá v porovnání s výslednou účinností, ekologický aspekt těchto technologií je slibným prospektem pro budoucí rozvoj. Ve většině případů je v produkci tenkovrstvých článků využíváno teplot pod 600 °C, což v porovnání se zpracováním krystalického křemíku (c-Si), kdy je třeba dosáhnout teplot přes 1400 °C, jednoznačně ukazuje nižší hodnotu vyprodukovaného ekvivalentu CO₂ na kWh. Pro ilustraci lze uvést modul typu CdTe, který při účinnosti 12% dosahuje ekvivalentu CO₂ pod 15 g na kWh v kontrastu s 50 g na kWh pro c-Si [3].

^c W_p , neboli Watt-peak je míra nominálního výkonu solárního panelu při standardních podmínkách (dopadající energie $E=1 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$, AM 1.5, teplota panelu $T=25 \text{ °C}$)

2 Šíření světla v solárním článku

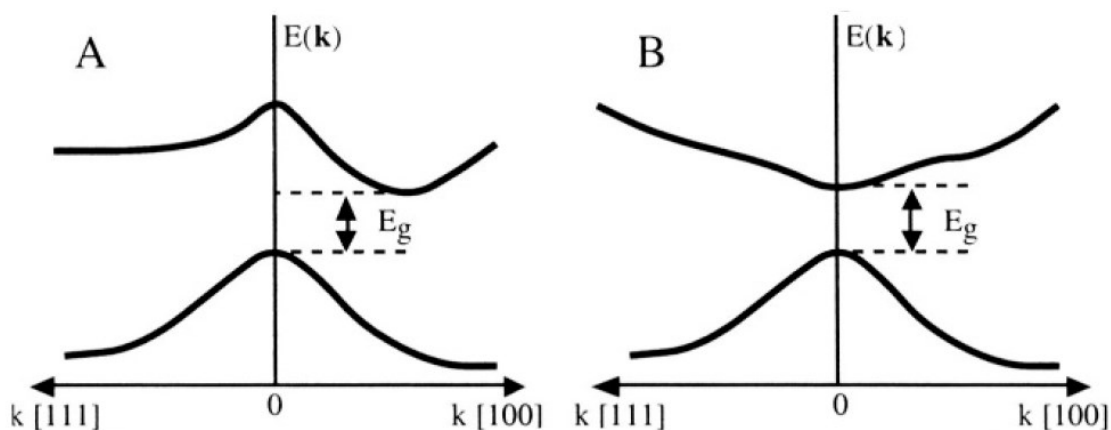
Účinnost solárního článku lze definovat jako poměr vyrobené energie a celkového množství fotonů dopadajících na článek. Cíl návrhu solárního článku můžeme stanovit jako dosažení co nejvyššího množství dopadajících fotonů na článek a jejich následné zachycení ve struktuře, dokud nejsou absorbovány. Ačkoliv hlavním tématem této práce je rozbor prvního fenoménu, tedy antireflexních vrstev, stručný popis samotné absorpce fotonu materiálem je nezbytný pro bližší pochopení činnosti solárního článku a role antireflexních vrstev v jeho struktuře.

2.1 Absorpce fotonu

V kapitole 1.1 byl jako absorbovaný foton definován ten, který překročí určitou hranici absorpční energie daného materiálu (velikosti zakázaného pásu). Ve skutečnosti je mechanismus absorpce složitější a nelze předpokládat absorpci každého takového fotonu. Důležitým faktorem je charakter pásového modelu ve vztahu k vlnové délce, kterým lze rozdělit polovodiče na přímé a nepřímé (v odborné literatuře častěji nalezneme anglický pojem *direct and indirect gap semiconductor*).

2.1.1 Přímý a nepřímý polovodič

Pro bližší nahlédnutí do procesu absorpce je nejprve nutné zmínit skutečnost, že mimo energie fotonu hraje v procesu absorpce výraznou roli i jeho hybnost. V kvantové mechanice je hybnost reprezentována vlnovým vektorem (k), který je nepřímo úměrný vlnové délce fotonu. Tento jev je často reprezentován závislostí vektoru (k) na energii E při teplotě 0 K, kdy lze zanedbat příspěvek termální složky energie.



Obrázek 2.1 Pásový diagram nepřímého (vlevo) a přímého (vpravo) polovodiče [6]

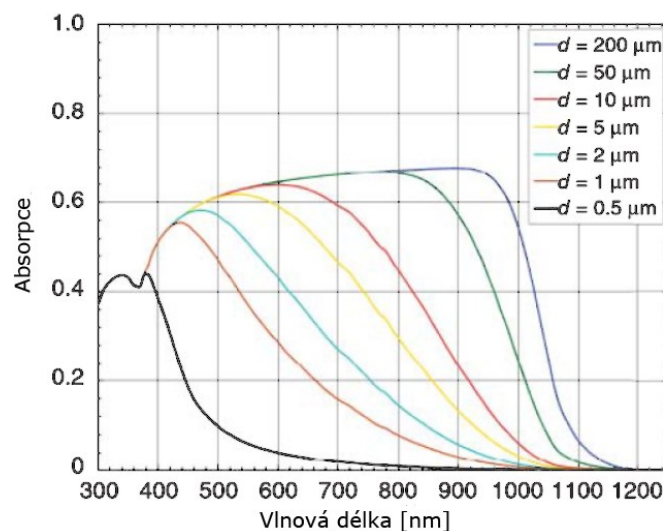
Je nutné si uvědomit, že foton může přestoupit přes zakázaný pás pouze při zachování své vlnové délky a parametr (k) zůstává neměnný. V případě přímého polovodiče (Obrázek 2.1) nastává minimální energie vodivostního pásu a maximální energie valenčního pásu při stejné hodnotě (k), podmínka je splněna a foton přestupuje do vodivostního pásu při zachování hybnosti. Přímé polovodiče mají tedy vysokou pravděpodobnost absorpce fotonu s dostatečnou energií a jsou využívány v tenkovrstevných technologiích. Pro příklad vrstva o tloušťce $1\ \mu\text{m}$ z CdTe je schopna absorbovat 90 % [5] dopadajících fotonů tohoto typu.

Naproti tomu v případě nepřímého polovodiče nejsou extrémní energií pásového modelu dosaženy při stejných hodnotách (k). Pro přestup fotonu je zapotřebí asistence vibrační krystalové mřížky neboli kvazičástice s názvem fonon. Ta má relativně malou rychlost, nízkou energii a vysokou hybnost. Pokud poté k absorpci fotonu dochází zároveň s absorpcí fononu, může být absorbován i foton s nižší energií a pokud je při absorpci fonon emitován musí mít naopak foton energii mírně vyšší.

2.1.2 Absorpce v krystalickém křemíku

Křemík patří mezi nepřímé polovodiče a je tedy relativně špatný absorbér světla. Pro vlnové délky pod 500 nm je absorpční hloubka^D v řádu mikronů a následně prudce roste až do řádů centimetrů pro 1150 nm [7]. Vyšší účinnosti článku tedy docílíme buďto použitím silnější vrstvy křemíku nebo optimalizováním světelné cesty v materiálu.

Na obrázku 2.2 je zobrazena absorpce c-Si pro různé tloušťky vrstvy. Pro pochopení kontextu hodnot je nutné zmínit skutečnost, že kontrast indexu lomu mezi křemíkem ($n_{\text{Si}} \approx 3.5$) a vzduchem ($n_{\text{a}} \approx 1$) je poměrně vysoký pro viditelné spektrum, což způsobuje slabou absorpci i přes malou absorpční hloubku v oblasti nízkých vlnových délek.

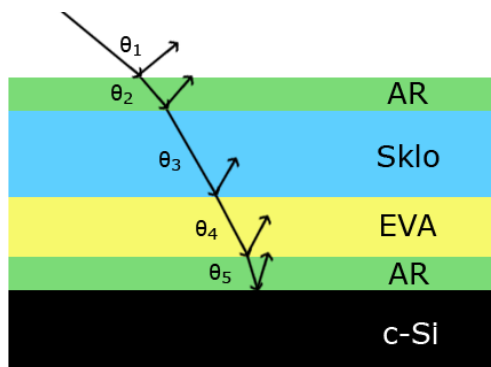


Obrázek 2.2 Absorpce c-Si pro jeho různé tloušťky v závislosti na vlnové délce [7]

^D **Absorpční hloubka** (δ) je vzdálenost na které dojde k poklesu intenzity světla na $1/e$ po vstupu do materiálu

2.2 Optické ztráty v solárním článku

Z kapitoly 2.1.2 víme, že křemík má vysoký index lomu oproti vzduchu. Standardní solární článek tedy obsahuje mimo vrstvy c-Si také polymerem (většinou EVA: ethylvinyl-acetate) laminovanou vrstvou skla na osvětlované straně a vrstvu bílého polymeru na straně druhé. Jak sklo, tak i vrstva c-Si je opatřena antireflexní (AR) vrstvou. Příklad této konstrukce je zobrazen na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Struktura standardního solárního článku c-Si se zobrazenou transmisí a reflexí na jednotlivých rozhraních

2.2.1 Ztráty reflexí a absorpcí

Ztráty reflexí představují hlavní podíl optických ztrát v solárním článku. V předchozí kapitole byla konstrukce solárního článku definována jako série rozhraní materiálů (Obrázek 2.3), kde reflexe na každém takovémto rozhraní odpovídá Fresnelovým rovnicím definovaným pro P a S polarizované světlo na rovném rozhraní homogenních médií jako funkce komplexního indexu lomu n , úhlu dopadu θ_i a úhlu lomu θ_t . n_{rx} je reálná část indexu lomu a k_x je imaginární část indexu lomu neboli extinkční koeficient:

$$n_x = n_{rx} + ik_x \quad (2.1)$$

$$r_p = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}; \quad r_s = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (2.2)$$

Úhly dopadu a lomu poté odpovídají Snellovu zákonu:

$$n_1 \cos \theta_i = n_2 \cos \theta_t \quad (2.3)$$

Hodnota reflexe je většinou zobrazována v míře své intenzity R , tedy kvadrátu příslušného r . Transmittance T je následně pro systém s jedním rozhraním definována jako doplněk R do jedné. V případě většiny krycích materiálů a i v případě křemíku je extinkční koeficient v oblasti slabé absorpce řádově nižší než index lomu a lze jej tedy

zanedbat. Indexy lomu potom mají pouze reálnou složku a lze přímo vyjádřit intenzitu paprsků šířících se uvnitř struktury. V opačném případě se musíme spokojit s hodnotou reflexe vně absorbujícího prostředí.

Pro struktury, ve kterých se jednotlivé vrstvy pohybují v řádech mikrometrů a méně, je nutné počítat s několikanásobným odrazem, neboli paprsek odražený může znovu koherentně (bereme v úvahu fázi elektromagnetické vlny) interferovat na předešlém rozhraní, dokud nedojde k jeho absorpci v jednom z materiálů.

Oproti tomu v případě vrstev větší tloušťky se jedná o nekoherentní skládání a je dostatečné zohlednit při interferenci pouze intenzitu paprsku.

Pokud lze vícenásobné odrazy zanedbat úplně, je útlum světla absorpcí v materiálu popsán Lambert-Beerovým zákonem při zanedbání reflexe:

$$\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-\alpha(\lambda)d} \quad (2.4)$$

kde $I(\lambda)$ je výstupní intenzita světla, $I_0(\lambda)$ intenzita dopadajícího světla, $\alpha(\lambda)$ absorpční koeficient a d tloušťka absorpčního média. První tři proměnné jsou funkcemi vlnové délky a rovnice je tedy vždy definována na určité vlnové délce λ .

2.2.2 Význam antireflexních vrstev

Jelikož je reflexe kvadraticky závislá na rozdílu indexu lomu materiálů na rozhraní, rozdělení této difference na řadu menších kroků vede k výraznému snížení ztrát reflexí. Chceme tedy docílit, aby mezi každými sousedními vrstvami solárního článku byl rozdíl indexu lomu co nejmenší. V případě vrstvy skla ($n_g \approx 1.5$) a EVA ($n_{EVA} \approx 1.48$ [7]) je tato podmínka splněna a výsledná reflexe je zanedbatelná ($R < 10^{-4}$). Pro zbývající rozhraní (EVA/c-Si a sklo/vzduch) je rozdíl indexu lomu vyšší a je zde využito antireflexních vrstev.

Pokud uvažujeme rozhraní dvou vrstev materiálu s indexy lomu n_1 a n_2 , nejmenší hodnoty reflexe je dosaženo přidáním vrstvy materiálu, jehož index lomu n_{AR} odpovídá následujícímu vztahu:

$$n_{AR} = \sqrt{n_1 \cdot n_2} \quad (2.5)$$

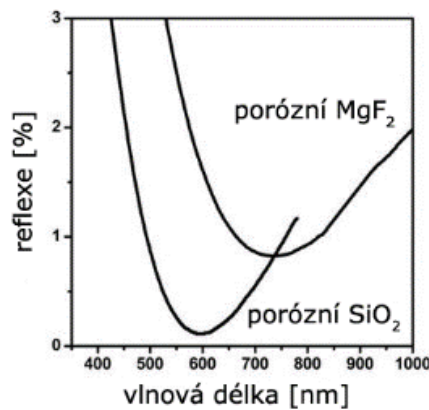
Mimo indexu lomu je důležitá i samotná tloušťka AR vrstvy, kdy můžeme docílit destruktivní interference reflexí z přední a zadní strany této vrstvy. Tento jev je závislý na vlnové délce a pro určitou hodnotu λ ho lze dosáhnout při použití takzvané čtvrtvlnové vrstvy (quarter-wave coating), neboli tloušťka vrstvy d odpovídá:

$$d = \frac{\lambda}{4 \cdot n} \quad (2.6)$$

Teoreticky je tedy možné dosáhnout nulové reflexe v celém spektru za použití vícenásobných AR vrstev. Z ekonomických důvodů toho samozřejmě využito není a i jednoduché AR vrstvy se staly normou teprve v posledních několika letech produkce solárních článků.

2.2.3 Materiály antireflexních vrstev

V případě rozhraní sklo/vzduch je nejčastěji využíváno nano-porézních vrstev, kdy jsme vytvářením póru v materiálu schopni redukovat jeho index lomu. Vhodnými materiály jsou zde MgF_2 ($n \approx 1.38$) a SiO_2 ($n \approx 1.45$), kde je nejefektivnější využití oxidu křemičitého, který při potřebné poréznosti 50 % dosahuje požadovaného indexu lomu [8]. Tato poréznost je v reálných aplikacích menší z důvodu potřebné dlouhodobé stability materiálu, ale i přes to je běžně dosažena redukce reflexe na rozhraní z 4 % na 1 % [7].



Obrázek 2.4 Reflexe jedné vrstvy porózního SiO_2 a MgF_2 [8]

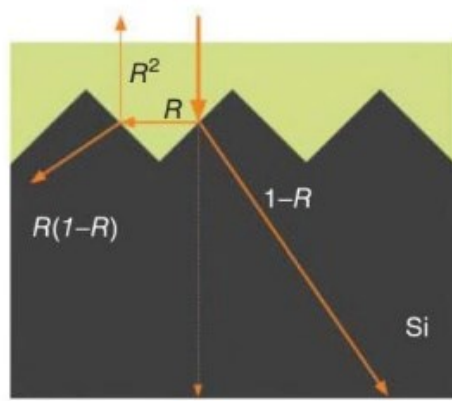
Zajímavějším je rozhraní EVA/c-Si, kde AR vrstva musí navíc plnit i úlohu pasivační vrstvy, která slouží k redukci ztrát rekombinací na povrchu c-Si omezením volných vazeb atomů křemíku. Pro samotnou pasivaci, SiO_2 a Al_2O_3 ($n \approx 1.77$) jsou často používány [9], ale vzhledem k jejich nízkému indexu lomu je vhodnější hydrogenovaný nitrid křemičitý ($\text{Si}_3\text{N}_4\text{:H}$) s indexem vyšším ($n \approx 1.95$). Nejčastější metodou nanášení této vrstvy je plazmou asistované napařování, kde lze modifikací toku plynů NH_3 a SiH_4 redukovat index lomu od 1.82 do 2.62 (pro vlnovou délku 632.8 nm) [5]. Takto vytvořená vrstva je v literatuře často označována jako SiN_x .

Pokud uvažujeme jednoduchou vrstvu SiN_x na rozhraní, lze variací její tloušťky t docílit změny barvy solárního článku. V komerčním použití převažují články modré ($t \approx 80 \text{ nm}$) vzhledem k optimální účinnosti, ale výroba článků jiných barev je možná s mírným poklesem v jejich účinnosti. Nevýhodou jednoduché vrstvy je relativně malý počet barev, kterých lze modulací tloušťky docílit a relativně velké dodatečné ztráty reflexí. Pokud potřebujeme širší variaci barev a zároveň omezit dodatečné ztráty reflexí, je nutné aplikovat AR vrstev více. Jednou z možností je použití tří vrstev ve složení

$\text{SiN}_x|\text{SiO}_2|\text{SiN}_x$, kde je docíleno větší palety dosažitelných barev [10]. Perspektivní technologií je také vytvoření mnohonásobných AR vrstev elektrochemickým leptáním nanoporózního křemíku.

2.2.4 Texturace povrchu

V předešlých kapitolách byly optické ztráty popisovány vždy pro rovné povrchy. Pro ilustraci si můžeme představit na tento povrch kolmo dopadající paprsek, který do materiálu projde beze změny svého směru. Pokud není materiálem plně absorbován, projde jím po nejkratší možné trase (uvažujme nekonečnou plochu rozhraní). Tento jev je ze své definice nevhodný pro solární článek, jelikož nejkratší cesta materiálem znamená i nejmenší pravděpodobnost absorpce fotonu v krystalickém křemíku.



Obrázek 2.5 Pohyb světla na rozhraní s texturovaným Si pyramidovou strukturou [7]

Cestu fotonu lze ovlivnit změnou morfologie povrchu c-Si, kdy v dnešní produkci je běžně užíváno pyramidové struktury. Dopadající foton je v tomto případě lomen do materiálu pod úhlem (Obrázek 2.5) a jeho cesta je podstatně prodloužena. Pozitivní aspekt je i cesta fotonu odraženého, který díky tvaru povrchu opět naráží do materiálu a pravděpodobnost jeho průchodu rozhraním roste. Výsledná reflexe klesá přibližně z R na R^2 , například tedy z 10 na 1 %. Vytvoření pyramid na povrchu křemíkového substrátu je docíleno anizotropním leptáním v alkalickém roztoku, například v hydroxidu draselném (KOH). Tento proces probíhá nejefektivněji ve směru $\langle 100 \rangle$ a vytváří stabilní c-Si fazety $\langle 111 \rangle$. Pokud je c-Si substrát krystalově orientován ve směru $\langle 100 \rangle$, formují fazety na povrchu pyramidy. Použitím SiO_2 masky lze vytvořit i pyramidy invertované.

Souhrn modifikací pro zadržení fotonu ve struktuře je označován jako model zachycení světla (*Light trapping model*). Jeho hodnota je vyjádřena funkcí parametru n a značena Z . Například použitím reflektoru na zadní straně solárního článku je cesta fotonu prodloužena dvakrát (uvažujme absolutní reflexi na rozhraní c-Si/reflektor), tedy $Z = 2n$.

2.3 Matematický model reflexe

Základní typ měřeného článku je jednoduchá vrstva SiN_x na křemíkovém substrátu. Matematicky lze takový článek modelovat reflexí na rozhraní vzduch/ SiN_x a SiN_x/Si (Obrázek 2.6).

| | | | |
|-------|-----|------------|----------------|
| n_0 | | | Vzduch |
| n_1 | d | α_1 | SiN_x |
| n_2 | | α_2 | c-Si |

Obrázek 2.6 Matematický model jednoduché AR vrstvy

Nechť tedy máme soustavu dvou rozhraní, kde na každém vznikají příslušné reflexe. Pro rozhraní vzduch/ SiN_x ji nazveme r_{01} a pro $\text{SiN}_x/\text{c-Si}$ r_{12} . Při výpočtu uvažujeme nepolarizované světlo a jednotlivé reflexe (2.8) odpovídají Fresnelovým rovnicím. Při výpočtu uvažujeme index lomu komplexní (2.1) definován mimo reálné části i extinkčním koeficientem k (2.7), kde $\alpha(\lambda)$ je absorpční koeficient a λ vlnová délka. Extinkční koeficient je pro řadu materiálů dostupný jako sada hodnot a není ho nutné počítat. V případě vzduchu lze poté k zanedbat úplně vzhledem k jeho nízké hodnotě v celém výpočetním spektru.

$$k = \frac{\alpha(\lambda) \cdot \lambda}{4\pi} \quad (2.7)$$

$$r_{xy} = \frac{n_x - n_y}{n_x + n_y} \quad (2.8)$$

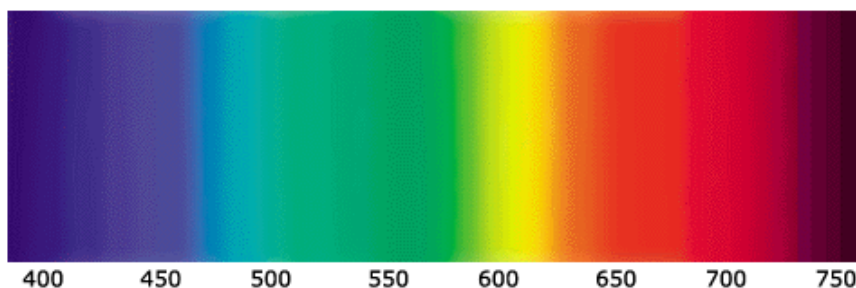
Pokud máme stanovené r_{01} a r_{12} , žádanou hodnotu r_{02} (2.9) vypočteme sečtením nekonečné řady příspěvků od mnohonásobných reflexí s uvážením navíc vlivu tloušťky vrstvy a následně umocníme pro získání hodnoty reflexe R_{02} (2.10). V případě povrchu s morfologií náhodných pyramid aproximujeme reflexi položením R^2 .

$$r_{02} = \frac{r_{01} + r_{12} \cdot e^{-2i\beta}}{1 + r_{01}r_{12} \cdot e^{-2i\beta}} \quad \text{kde } \beta = \frac{2\pi \cdot N \cdot d}{\lambda} \quad (2.9)$$

$$R_{02} = |r_{02}|^2 \quad (2.10)$$

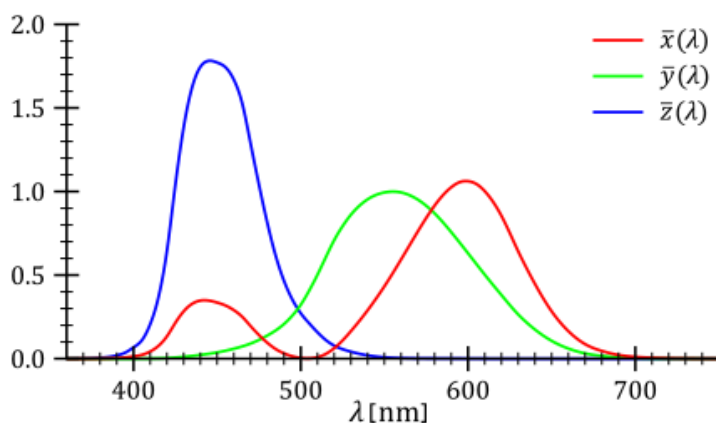
2.4 Reprezentace spektra do RGB

Spektrum světla je definováno jako funkce $P(\lambda)$, která každé vlnové délce přiřadí intenzitu jí vyzařovanou. Lidské oko je schopno rozeznat pouze malou část a definujeme tedy viditelné spektrum, které se průměrně pohybuje od 390 do 700 nm.



Obrázek 2.7 Viditelné spektrum (vlnové délky v nm)

Základem převodu informace v podobě spojitého spektra na barevnou informaci je definování CIE srovnávacích funkcí. Těmito funkcemi byly institucí CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) stanoveny virtuální barvy X, Y a Z, jejichž kombinací lze vytvořit libovolnou viditelnou barvu. Hodnoty příspěvků určité vlnové délky byly určeny pro průměrnou rozlišovací schopnost lidského oka při rozsahu vlnových délek od 380 do 780 nm.



Obrázek 2.8 CIE srovnávací funkce [11]

CIE srovnávací funkce $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ a $\bar{z}(\lambda)$ definují relativní příspěvek světla o vlnové délce λ k hodnotám X, Y a Z, které vypočteme pomocí obdélníkové aproximace integrálu produktu srovnávací funkce a intenzity světla P po celém rozsahu hodnot λ .

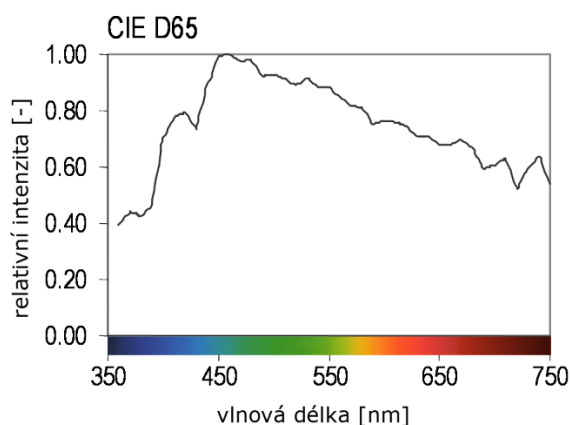
$$X = \sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} \bar{x}(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

$$Y = \sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} \bar{y}(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (2.11)$$

$$Z = \sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} \bar{z}(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

Výstupní hodnoty měření reflexe $R_{\%}$ jsou procentuálního charakteru na jednotlivých vlnových délkách. Jako intenzitu zdroje světla, kterým je materiál při pozorování barvy osvětlován, vezmeme spektrum standardního světelného zdroje P_{D65} . Pro tuto potřebu je organizací CIE definován standardní zdroj D65 (Obrázek 2.9), který tvarem spektra odpovídá průměrnému polednímu slunečnímu svitu v Severní Evropě.

$$P = \frac{R_{\%}}{100} \cdot P_{D65} \quad (2.12)$$



Obrázek 2.9 Spektrum standardního CIE D65 zdroje světla

Hodnota Y nese informaci o svítivosti zdroje. Pokud tedy zavedeme výpočet přes redukované spektrum reflexí, je nutné vztáhnout hodnoty XYZ k hodnotě Y_{D65} (2.13).

$$Y_{D65} = \sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=780nm} \bar{y}(\lambda) \cdot P_{D65}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (2.13)$$

$$X_r = \frac{X}{Y_{D65}} \quad Y_r = \frac{Y}{Y_{D65}} \quad Z_r = \frac{Z}{Y_{D65}} \quad (2.14)$$

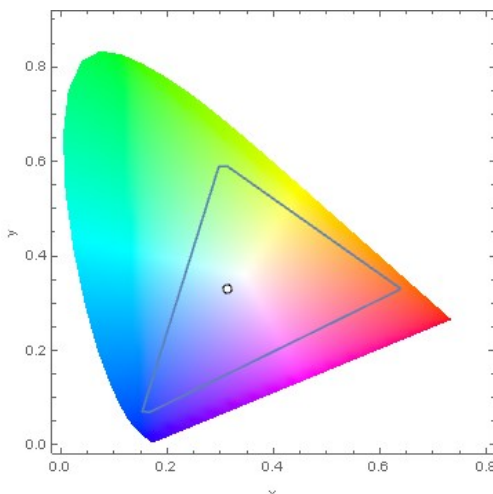
Pro vypočtené hodnoty $X_r Y_r Z_r$ existuje jednoduchý převod pomocí 3x3 matice do lineárního RGB (2.15).

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = [M]^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Hodnoty inverzní matice záleží primárně na typu referenční bílé (D60,D65) a typu RGB pracovního modulu (nejčastěji sRGB). Pro příklad je níže uvedena inverzní matice M pro převod do sRGB [12].

$$[M]^{-1} = \begin{bmatrix} 3.2404542 & -1.5371385 & -0.4985314 \\ -0.9692660 & 1.8760108 & 0.0415560 \\ 0.0556434 & -0.2040259 & 1.0572252 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Převod ze souřadnic XYZ na sRGB je limitován a může tedy nastat případ kdy XYZ barva nelze do sRGB adekvátně zobrazit. Důvodem je omezené množství barevných kombinací, které sRGB model obsahuje. V chromatickém diagramu je toto omezení dobře znázornitelné (Obrázek 2.10).



Obrázek 2.10 Chromatický diagram xy s vyznačeným trojúhelníkem sRGB a bodem D65

Barvu XYZ lze v chromatickém diagramu zobrazit pomocí jednoduchého výpočtu (2.17), kdy jednotlivé virtuální barvy podělíme součtem hodnot XYZ a jsme tedy schopni barvu XYZ popsat novými parametry xyY .

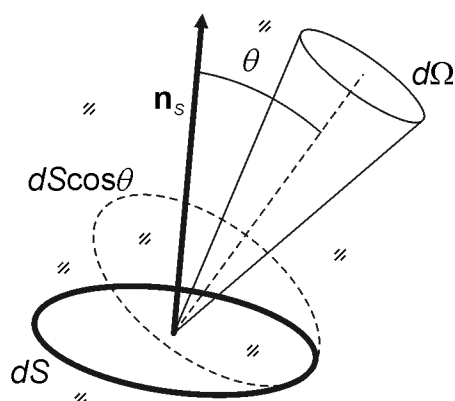
$$x = \frac{X}{(X + Y + Z)} \quad y = \frac{Y}{(X + Y + Z)} \quad (2.17)$$

2.5 Étendue

Pojem étendue v optice popisuje schopnost daného systému přijmout světlo. Pro element plochy dS optického systému, který vyzařuje (nebo jím prochází) světlo, je étendue G definována následovně:

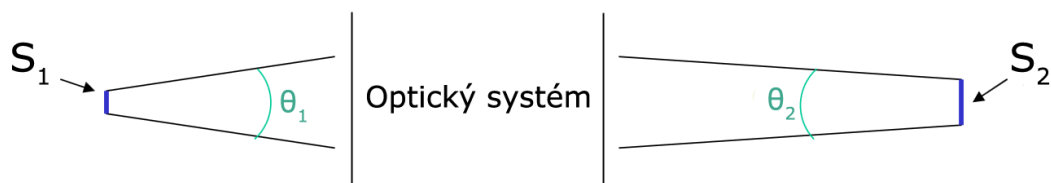
$$dG = n^2 \cdot dS \cdot \cos\theta \cdot d\Omega \quad (2.18)$$

kde n je index lomu média elementu plochy, Ω prostorový úhel vyzařovaných paprsků a θ úhel jeho natočení vůči normále n_s plochy dS (Obrázek 2.11).



Obrázek 2.11 Étendue v prostorovém zobrazení [13]

Důležitým poznatkem je skutečnost, že étendue bezztrátového optického systému je neměnná, tedy je stejná na vstupu i výstupu. Jeho hodnota je přitom určena právě takovým prvkem tohoto systému, jehož étendue je nejmenší.



Obrázek 2.12 Jednoduchý optický systém

Pokud poté uvažujeme jednoduchý optický systém v dvojrozměrném zobrazení (Obrázek 2.12) lze při konstantním étendue a shodném prostředí rovnici 2.18 zjednodušit na relaci úhlu vyzařování θ a plochy S .

$$S_1 \cdot \Omega_1 = S_2 \cdot \Omega_2 \quad (2.19)$$

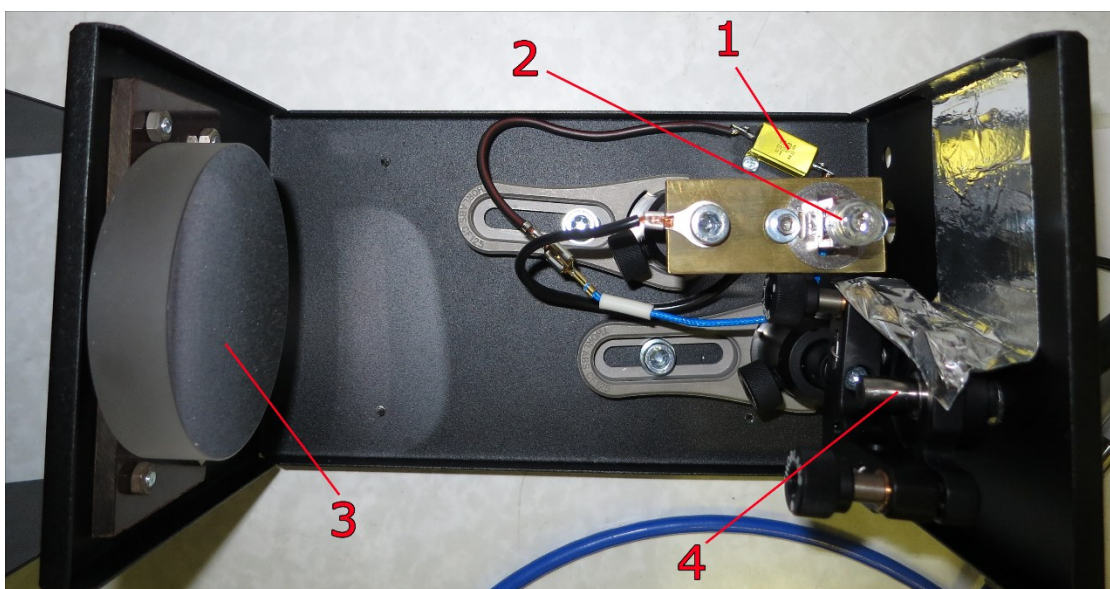
Součin plochy a prostorového úhlu vyzařovaného (přijímaného) světla je tedy v celém systému vždy konstantní.

3 Měřicí přípravek

Přípravek pro měření reflexe je složen z pěti částí, které budou samostatně popsány v následujících kapitolách. Jsou jimi zdroj světla, optická cesta, softwarové zpracování a soupravy pro měření reflexe a transmise.

3.1 Zdroj světla

Důležitými parametry světelného zdroje pro měření reflexe (transmise) solárního článku jsou intenzita světla, spektrální podobnost AM 1.5 a navázání do optického světlovodu. Pro tento účel je k dostání řada hotových světelných zdrojů, kterých není použito především z důvodu nestandardních rozměrů použitého světlovodu a také vysoké pořizovací ceny. Zdroj světla byl v rámci práce sestaven a výsledné zapojení je následovné.



1- Elektrický obvod 2- Halogenová žárovka 3- Zrcadlo 4- Uchycení světlovodu

Obrázek 3.1 Světelný zdroj

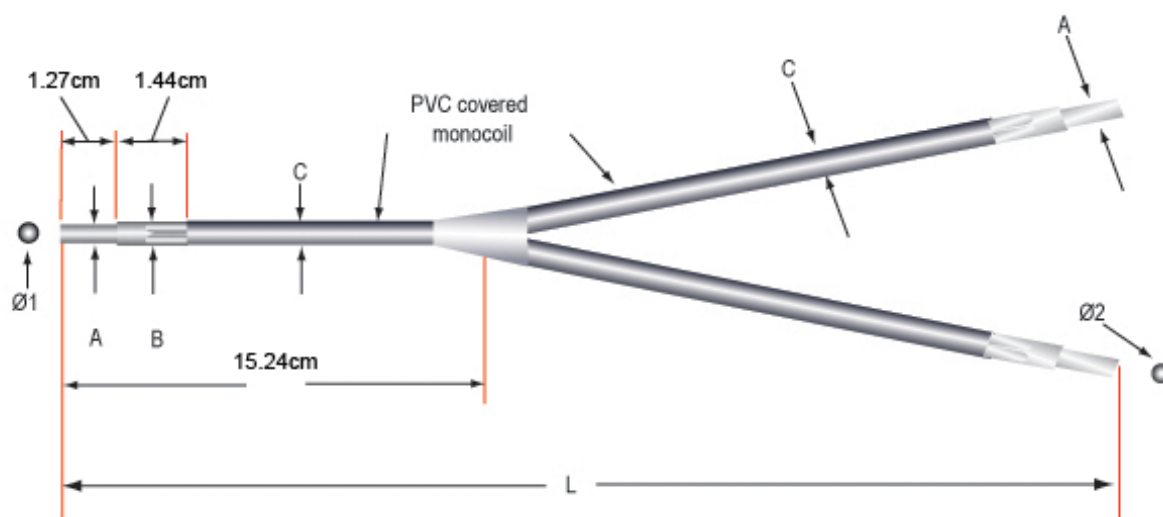
Základ zdroje tvoří stejnosměrný obvod s halogenovou žárovkou (2) o výkonu 100 W napájenou ze stabilizovaného zdroje Groupner 13.8 V, jehož napětí je přes výkonový předřadník (1) rozloženo na výsledných 13 V na žárovce. Sériový odpor také slouží jako omezovač zapínacího proudu obvodem.

Vlákno žárovky je za pomoci konkávního hliníkem potaženého zrcadla ($\varnothing 75 \text{ mm}$, $f = 150 \text{ mm}$) promítnuto na vstup světlovodu (4). Jednotlivé části jsou vyjma zrcadla upevněny na optickém systému nastavitelném ve všech osách a jejich pozice byla pomocí aktuálního sledování výstupního signálu nastavena na nejvyšší možnou intenzitu ve světlovodu.

3.2 Optická cesta

Základem měření reflexe je použití duálního světlovodu, tedy dvou světlovodů, které jsou od určitého místa spleteny. Zdroj světla je navázán na jeden z oddělených světlovodů a měřený vzorek je osvětlován spletenou částí. Následně odražené světlo je zachyceno částí náležící světlovodu druhému, který je navázán na spektrometr.

Použitý světlovod je dodáván firmou Edmund optics^E a jeho rozměry jsou následující:



Obrázek 3.2 Duální světlovod [14]

| Ø1 [cm] | Ø2 [cm] | L [cm] | A [cm] | B [cm] | C [cm] |
|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 0.635 | 0.45 | 91.44 | 0.79 | 1.07 | 1.04 |

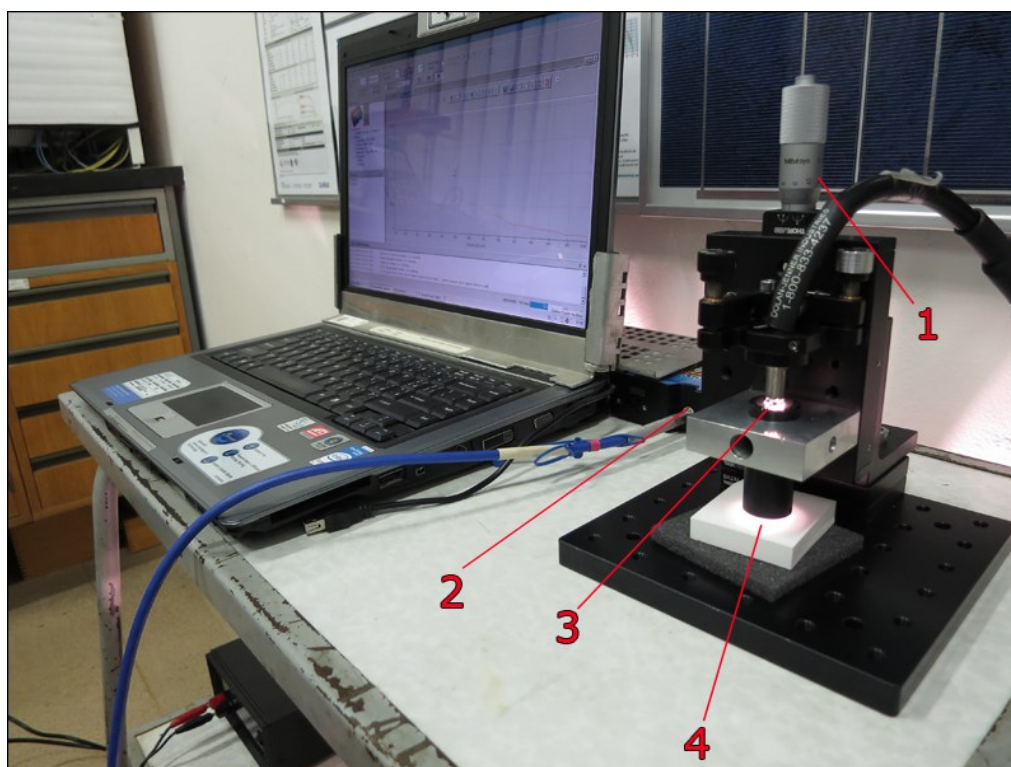


Obrázek 3.3 Spletená část duálního světlovodu

^E Kód zboží #54199

3.3 Souprava měření reflexe

Umístění měřeného vzorku je realizováno za pomoci systému sestaveného z optických komponentů firmy Thorlabs. Na čtvercové hliníkové základně je umístěn mikroposuv (1) s realizovaným úchytem světlovodu, jehož úhel natočení lze modifikovat. Na optický světlovod je navázán přípravek pro zvýšení vstupního úhlu, který doléhá na měřený materiál (4) podložený pěnovou podložkou. Výstupní světlovod je navázán na světlovod spektrometru (2) za pomoci ztrátové spojky.



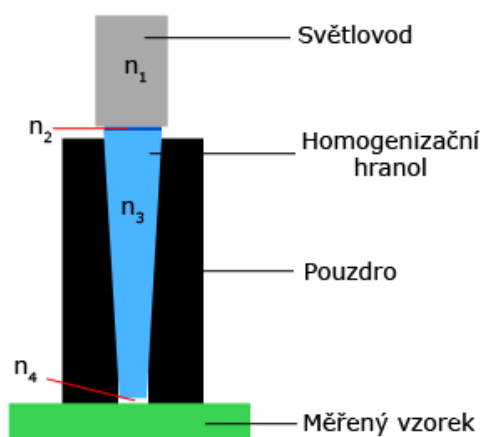
1- Mikroposuv 2- Spektrometr 3- Spojení světlovod – hranol 4- Měřený vzorek

Obrázek 3.4 Umístění měřeného vzorku (na obrázku kalibrační) a softwarové zpracování

Přípravek pro zvýšení vstupního úhlu byl realizován dvěma způsoby, konkrétně použitím homogenizačního hranolu a homogenizační trubice s vnitřním zrcadlem, které budou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

3.3.1 Homogenizační hranol

Homogenizační hranol plní v soupravě úlohu rozšíření úhlu zachycení odraženého světla od vzorku a také světelný svazek promíchává. Jeho princip je založen na totálním odrazu světla, neboli paprsek dopadá na krajní rozhraní pod takovým úhlem, že dochází pouze k reflexi a ne k jeho lomu do druhého média. Díky tomu jsou ztráty intenzity minimální. Zvýšení úhlu zachycení lze nejlépe popsat veličinou étendue (kapitola 2.5). Jelikož je plocha spodního čela hranolu menší než u propojení se světlovodem, musí se zákonitě zvětšit úhel, do kterého vyzařuje (zachytává) světlo.



Obrázek 3.5 Homogenizační hranol

Nevýhodou použití hranolu je množství rozhraní, na kterých může dojít k nežádoucí reflexi. Hranol je k světlovodu připevněn lepidlem, které i přes vhodně zvolený index lomu obsahovalo drobné defekty (vzduchové bubliny) a malá část intenzity se na tomto rozhraní ztrácí. K dalším, podstatně vyšším, ztrátám docházelo na rozhraní hranol/vzduch u měřeného vzorku.

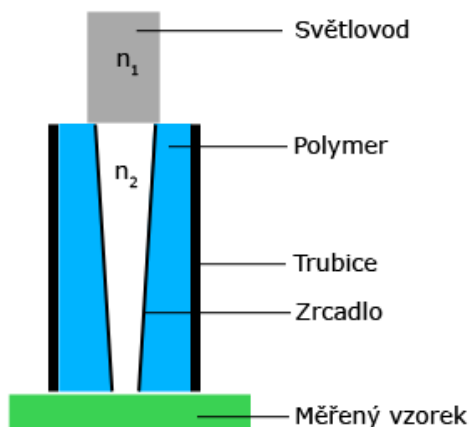
Reflexe na rozhraní se vyjma poklesu intenzity světla ve světlovodu projeví i vysokým spektrem nulového odrazu, neboli část světla je odražena do výstupního optického světlovodu i v případě použití černé reference jako vzorku.

3.3.2 Homogenizační trubice s vnitřním zrcadlem

Pro omezení ztrát reflexí na rozhraních bylo navrženo řešení vnitřního zrcadla. V tomto případě je světlovod navázán na dutinu o tvaru homogenizačního hranolu (Obrázek 3.6), která má na stěnách stříbrné zrcadlo. Výsledná souprava tedy obsahuje pouze rozhraní světlovod/vzduch v optické cestě a ztráty reflexí jsou minimalizovány.

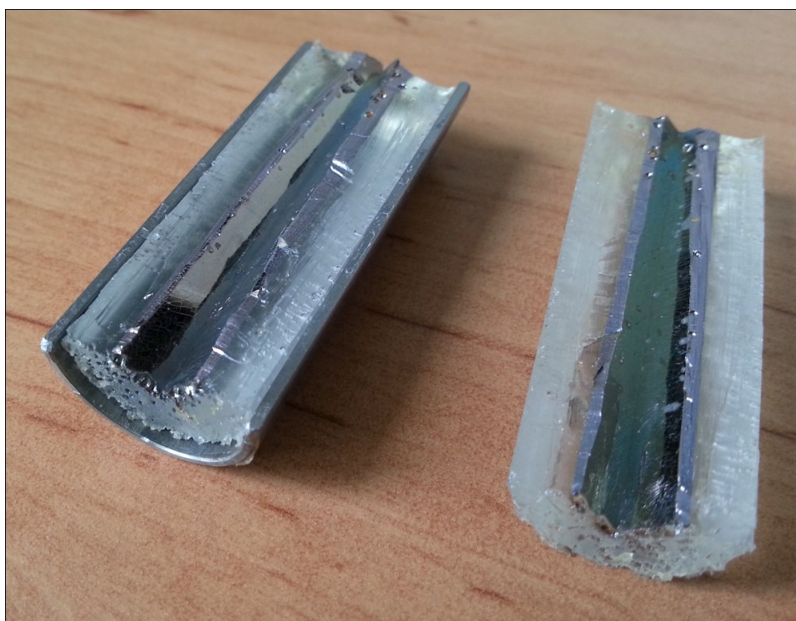
Přípravek byl vyroben naplněním kovové trubice o rozměrech pouzdra hranolu tekutým polymerem, kde vnitřního tvaru bylo docíleno umístěním homogenizačního hranolu do jejího středu. Polymer byl následně vytvrzen v peci o 100 °C po dobu jedné hodiny, vyjmut z trubice a po uhlopříčce vnitřního motivu rozříznut.

Zrcadlo bylo na vnitřní části polymeru napařeno z tantalové lodičky stříbrným drátkem a pokryto vrstvou MgF_2 rovněž napařením.



Obrázek 3.6 Polymer s vnitřním zrcadlem

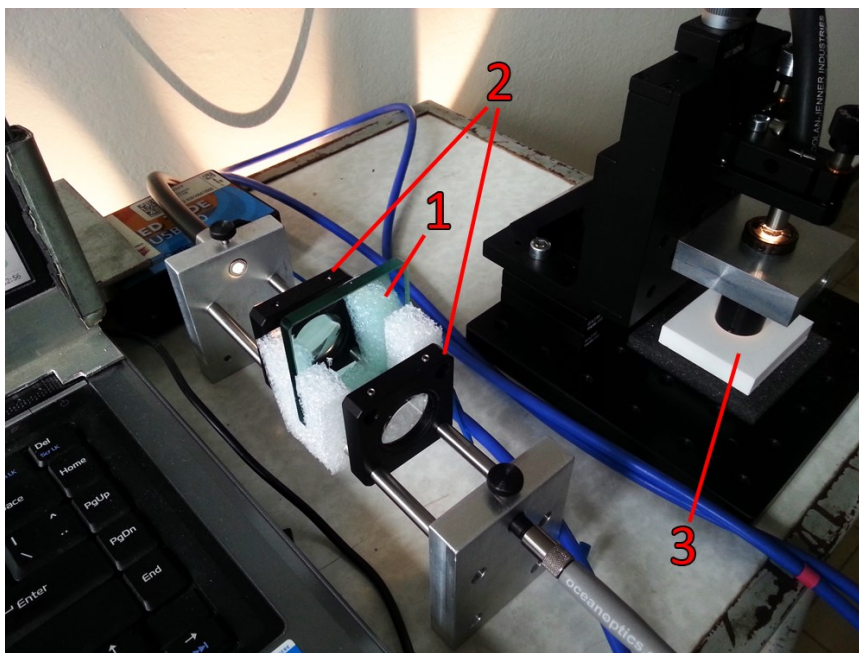
Vyrobený prototyp zrcadla obsahoval řadu defektů, které mohou měření ovlivnit. Samotný polymer měl díky rychlosti vytvrzování vysoký počet vzduchových bublinek, které na vnitřním otisku hranolu vytvořily nerovnosti. Bublinky blízké k povrchu byly přítomností vakua při napařování vytlačeny a zapříčinily vznik děr na povrchu výsledného zrcadla (Obrázek 3.7). Nepříznivý je také tvar vrchního čela polymeru, který vzhledem k úbytku objemu během vytvrzování nemá rovinný charakter.



Obrázek 3.7 Naprášené zrcadlo na vnitřních stěnách polymeru

3.4 Souprava měření transmise

Měření reflexe bylo později doplněno nastavbou pro měření transmise materiálu. Při měření je do soupravy měření reflexe umístěna bílá reference (3) a je tedy dosaženo maximální možné intenzity ve výstupním světlovodu. Použitím spojných čoček (2) je vytvořen paralelní svazek světla, který prochází vzorkem (1) a je navázán do světlovodu spektrometru.



1- Vzorek

2- Spojné čočky

3- Bílá reference

Obrázek 3.8 Souprava měření transmise

3.5 Softwarové zpracování

Zpracování odraženého světla je realizováno spektrometrem Ocean Optics RED TIDE 650 a příslušným programem SpectraSuite. Program je nainstalován na přenosném počítači, který je součástí měřicí soupravy (viz kapitola 3.3).

3.5.1 Spektrometr

Použitý spektrometr je typu UV-Vis-NIR, tedy s rozsahem (350-1000 nm) pokrývajícím celé viditelné spektrum světla a částečně spektra ultrafialové a infračervené. Základní princip funkce spektrometru je vytvoření rovnoběžného svazku paprsků kolimátorem, který následně dopadá na mřížku (případně hranol), kde je svazek rozložen na jednobarevné paprsky lišící se svým směrem. Následně jsou paprsky spojkou či zrcadlem soustředěny na CCD detektor, který je schopen na základě fotoefektu převést dopadající světlo na elektronickou informaci o jeho intenzitě.

3.5.2 Měření reflexe a transmise

Pro činnost měřicí soupravy je využíváno funkce přímého měření reflexe založené na porovnání odraženého spektra vzorku I_{rm} se spektry nulového I_{rn} a absolutního odrazu I_{ra} . Reflexe je vypočtena z následujícího vztahu:

$$R_{\%} = \frac{I_{rm} - I_{rn}}{I_{ra} - I_{rn}} \cdot 100 [-] \quad (3.1)$$

Samotné měření tedy probíhá následovně. Umístěním bílé reference do měřicí soupravy uložíme do paměti programu spektrum absolutního odrazu a stejný postup zopakujeme pro referenci černou. Následně umístíme do soupravy měřicí vzorek a zvolíme v SpectraSuite měření reflexe, které průběžně počítá míru reflexe dle výše uvedeného vztahu, tedy koriguje spektrum odraženého světla pomocí uloženého nulového a následně procentuálně porovnává s korigovaným spektrem absolutního odrazu.

Pro případ transmise probíhá měření obdobně, kdy absolutní transmise I_{ta} je měřena bez přítomnosti vzorku a nulová transmise I_{tn} při vypnutém zdroji světla. Měřená intenzita I_{tm} je oproti reflexi podstatně nižší a je tedy nutné vhodně nastavit měřítko SpectraSuite.

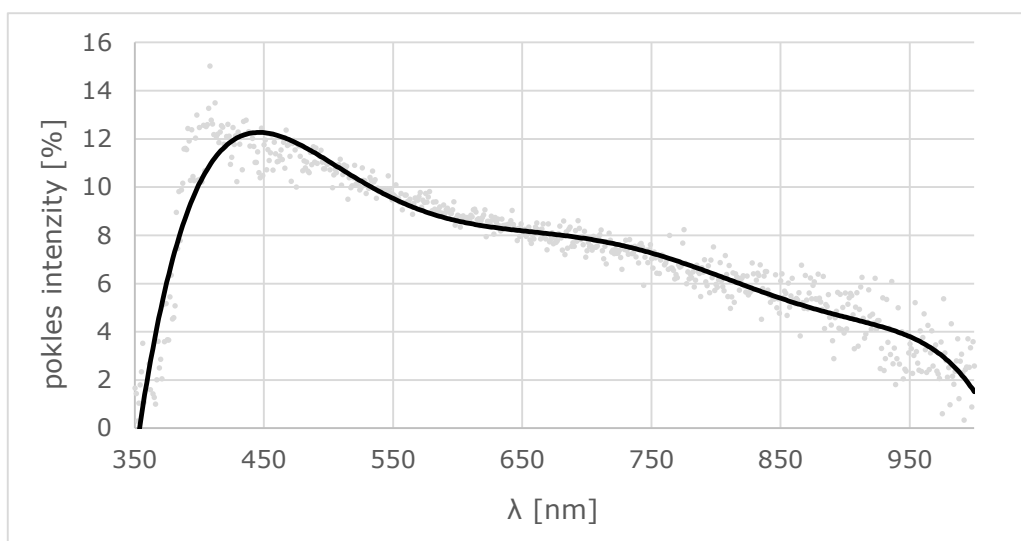
$$T_{\%} = \frac{I_{tm} - I_{tn}}{I_{ta} - I_{tn}} \cdot 100 [-] \quad (3.2)$$

4 Měření

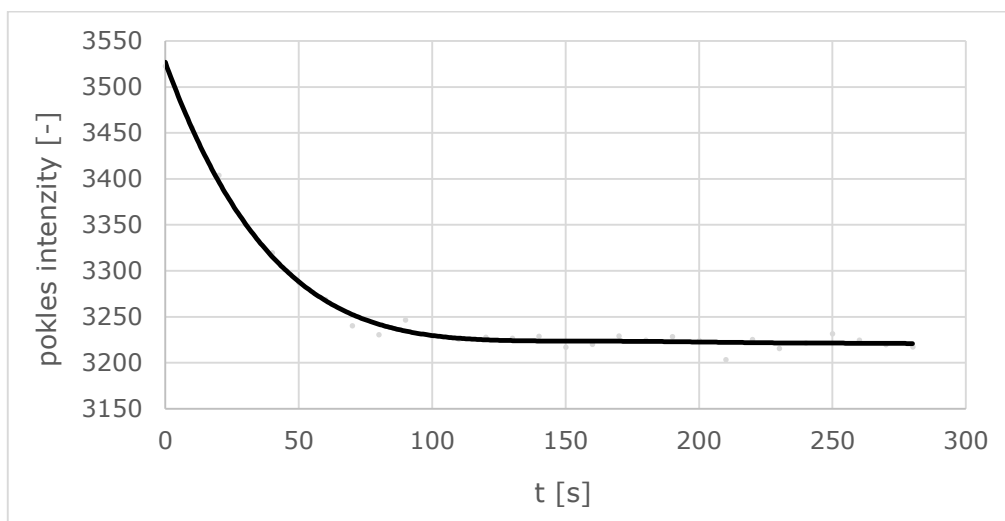
Provedená měření lze rozdělit do dvou hlavních částí, kdy v první části byla ověřena činnost světelného zdroje a v druhé části byla provedena měření reflexe a transmise.

4.1 Vývoj intenzity zdroje

Světelný zdroj byl testován z hlediska vývoje světelné intenzity v čase, neboli po jaké době lze prohlásit jeho výstup za ustálený a měření tedy nejsou změnou intenzity ovlivňována.



Obrázek 4.1 Procentuální pokles intenzity po pěti minutách

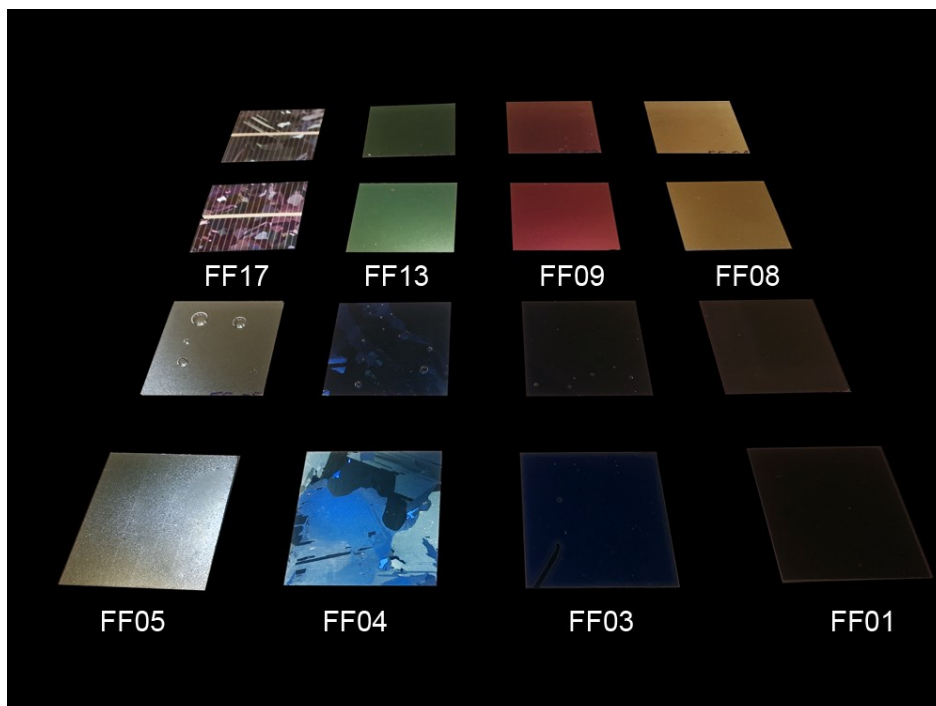


Obrázek 4.2 Pokles intenzity pro $\lambda = 608 \text{ nm}$

Z výše uvedených grafů je patrné, že k ustálení intenzity zdroje ve světlovodu dochází zhruba po dvou minutách a následná měření lze tedy prohlásit za neovlivněná z pohledu proměnné intenzity.

4.2 Měření reflexe

Souprava testovaných vzorků se skládala z šesti c-Si a dvou mc-Si článků s různými tloušťkami antireflexních vrstev SiN_x ve variantách bez ochranného skla a s ním. Jednotlivé vzorky se lišily i morfologií povrchu, kde mimo planárních čtverců byli měřeny vzorky s náhodnými pyramidami. Souprava pro měření reflexe byla v konfiguraci s homogenizačním hranolem (kapitola 3.3.1).



Obrázek 4.3 Vzorky pro měření reflexe

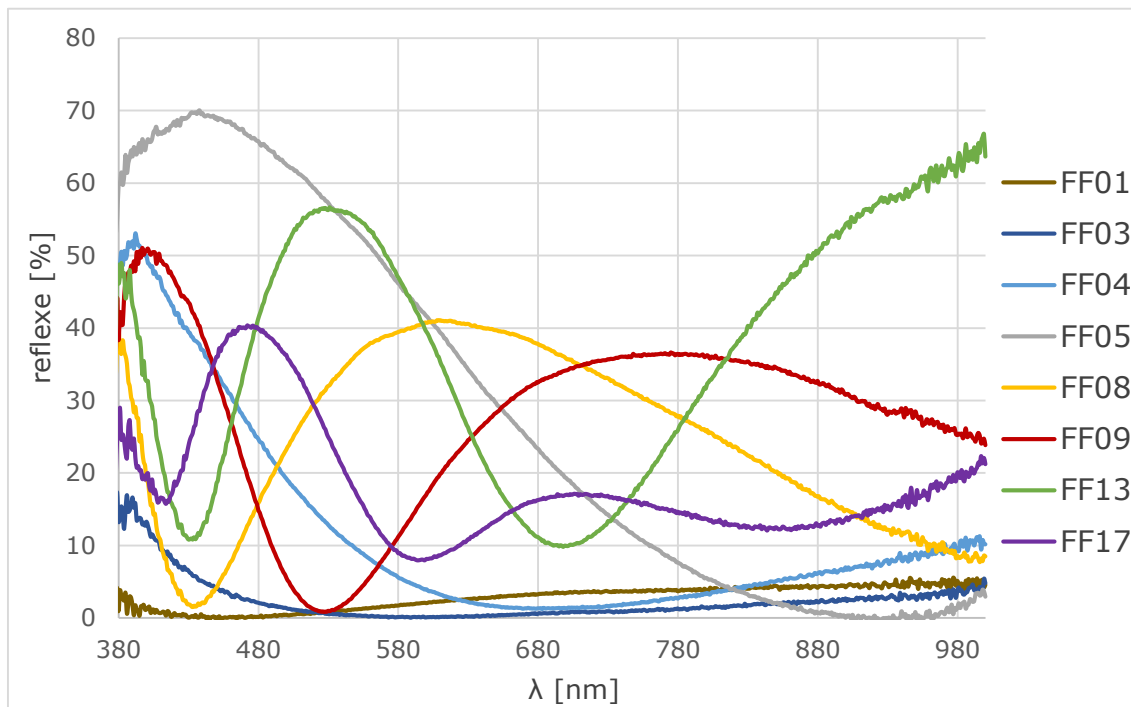
| vzorek | substrát | leptání | struktura | barva | tloušťka [nm] |
|--------|----------|---------|------------------|----------------------|---------------|
| FF01 | c-Si | MK3 | SiN _x | tmavě hnědá | 58 |
| FF03 | c-Si | MK3 | SiN _x | tmavě modrá | 70 |
| FF04 | mc-Si | MK1 | SiN _x | modrá | 80 |
| FF05 | c-Si | MK1 | SiN _x | světle modrá | 110 |
| FF08 | c-Si | MK1 | SiN _x | zlatá | 155 |
| FF09 | c-Si | MK1 | SiN _x | magenta | 195 |
| FF13 | c-Si | MK1 | SiN _x | zelená světlejší | 240 |
| FF17 | mc-Si | MK3 | SiN _x | modro-fialovo-zelená | 180 až 250 |

Tabulka 4.1 Parametry AR vrstev měřených vzorků

MK1 - leptání v 60% KOH při teplotě 85°C
 - morfologie povrchu - leptové čtverce na rovině 100

MK3 - texturace c-Si v 3% NaOH (KOH) s IPA
 - morfologie povrchu - "náhodné" pyramidy na rovině 100

Měření bylo realizováno pro vlnové délky od 380 do 1000 nm. Spodní rozsah od 350 nm byl pro vyhodnocení výsledků vynechán z důvodu procentuálně vysoké fluktuace intenzity v čase v této oblasti, která způsobila nepříjemné zkreslení hodnot reflexe.



Obrázek 4.4 Výsledky měření reflexe

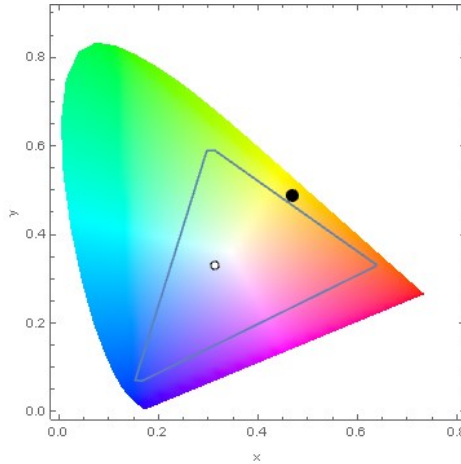
4.2.1 Reprezentace do RGB

Jednotlivá spektra byla postupem uvedeným v kapitole 2.4 přepočtena do XYZ souřadnic a převedena do sRGB. Jelikož je interpretace barvy závislá na použitém zobrazovacím médiu či technologii tisku dokumentu, jsou barvy v tabulce 4.2 pouze orientační a klíčové jsou samotné souřadnice v sRGB.

| vzorek | sRGB | D65 barva |
|--------|---------------|-----------|
| FF01 | (45,26,4) | |
| FF03 | (0,11,73) | |
| FF04 | (0,94,185) | |
| FF05 | (130,198,248) | |
| FF08 | (249,216,0) | |
| FF09 | (132,42,181) | |
| FF13 | (127,209,153) | |
| FF17 | (0,135,183) | |

Tabulka 4.2 RGB reprezentace měřených spekter reflexí

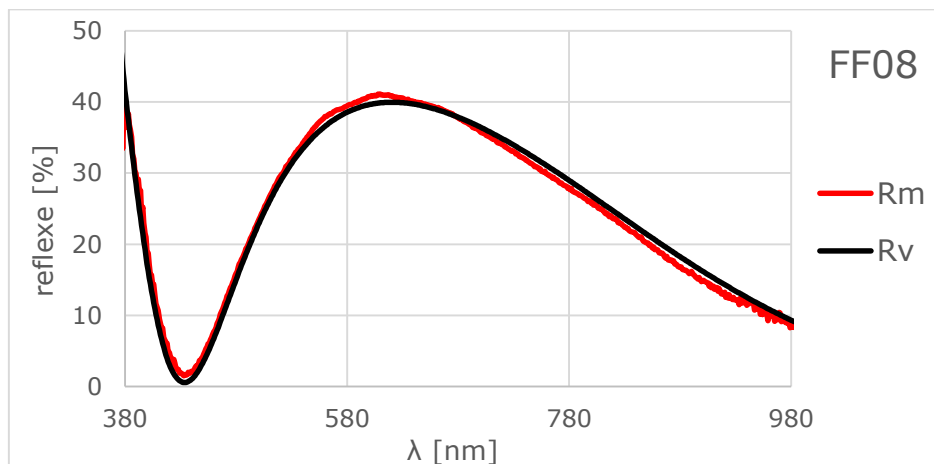
Pro vzorky FF03, FF04, FF08 a FF17 se potvrdil teoretický předpoklad nemožnosti přesného převodu z XYZ do sRGB. Pro reprezentaci tohoto jevu je v programu pro přepočet přidáno zobrazení chromatického grafu s trojúhelníkem sRGB, ve kterém je zobrazena xy pozice barvy vzorku.



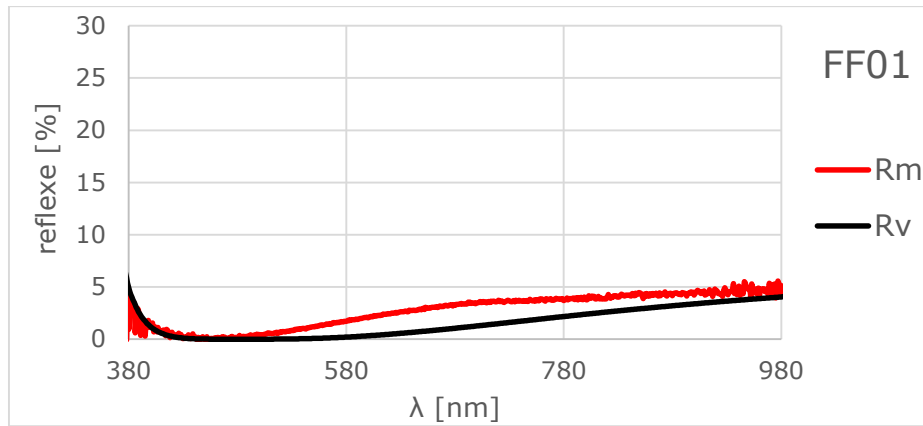
Obrázek 4.5 Chromatický diagram s vyznačeným sRGB a barvou vzorku FF08 (černý bod)

4.2.2 Porovnání reflexe s matematickým modelem

Pro jednotlivé tloušťky antireflexní vrstvy SiN_x a různé morfologie jejího povrchu byla vypočtena reflexe R_v dle matematického modelu popsaného v kapitole 2.3. Takto vytvořené soubory hodnot byly graficky porovnány s reflexí měřenou R_m ve společném grafu. Níže uvedené příklady reprezentují vzorky s různou morfologií povrchu, planární pro FF08 a náhodné pyramidy pro FF01. Porovnání zbylých vzorků je uvedeno v příloze B. Naměřená spektra jsou rozšířena koeficienty v rozmezí od 1 do 1.1.



Obrázek 4.6 Porovnání měřeného (R_m) a vypočteného (R_v) spektra FF08



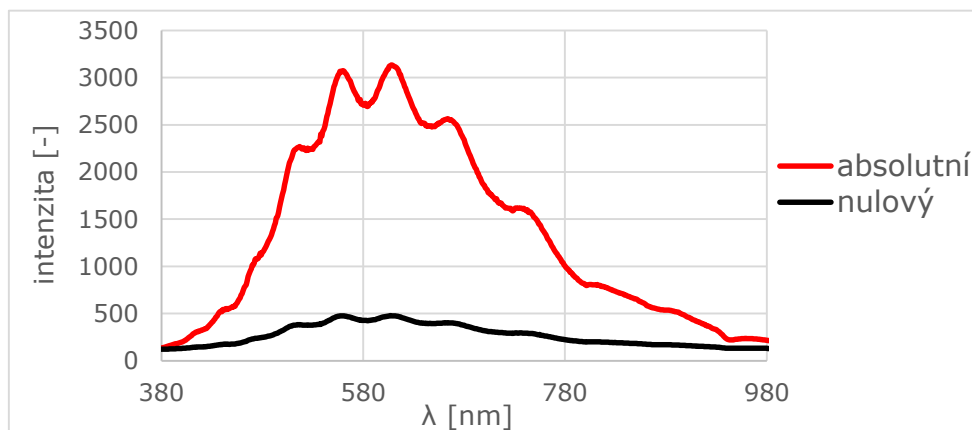
Obrázek 4.7 Porovnání měřeného (R_m) a vypočteného (R_v) spektra FF01

Pro výpočet byla použita externě získaná data indexu lomu n a extinkčního koeficientu k pro c-Si [16] a SiN_x [17].

4.2.3 Spektrum nulového a absolutního odrazu

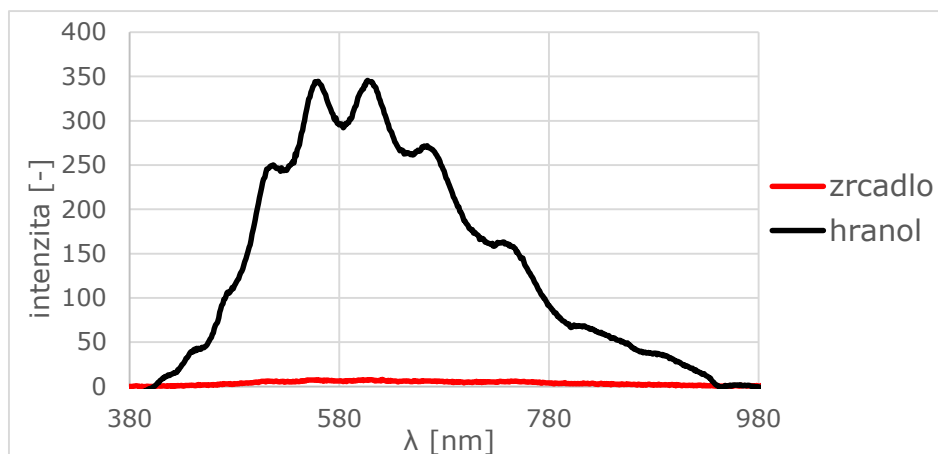
Pro měření reflexe je nutné v SpectraSuite uložit spektrum odrazu absolutně černé a bílé reference, které však v reálu nedosahují nulové či absolutní reflexe. Z charakteru těchto spekter lze také stanovit kvalitu měřicího systému, kde hlavními faktory jsou ztráta intenzity, změna tvaru spektra a množství světla odraženého před kontaktem se vzorkem.

Samotná konstrukce měřicího systému prošla řadou změn během návrhu, přičemž první realizovanou variantou bylo uskupení s homogenizačním hranolem (kapitola 3.3.1). Orientačním měřením výstupního světla hranolu bylo zjištěno zachování tvaru spektra i jeho intenzity, kdy lze s přihlédnutím na chybu měřicí metody její pokles považovat za zanedbatelný pro účel měření. Negativním aspektem tohoto návrhu je spektrum nulového odrazu neboli množství světla odraženého do výstupního světlovodu při umístění černé reference jako vzorku (Obrázek 4.8). Toto je způsobeno množstvím rozhraní, přes které světlo prostupuje, a další návrh se zaměřoval právě na zlepšení tohoto parametru.



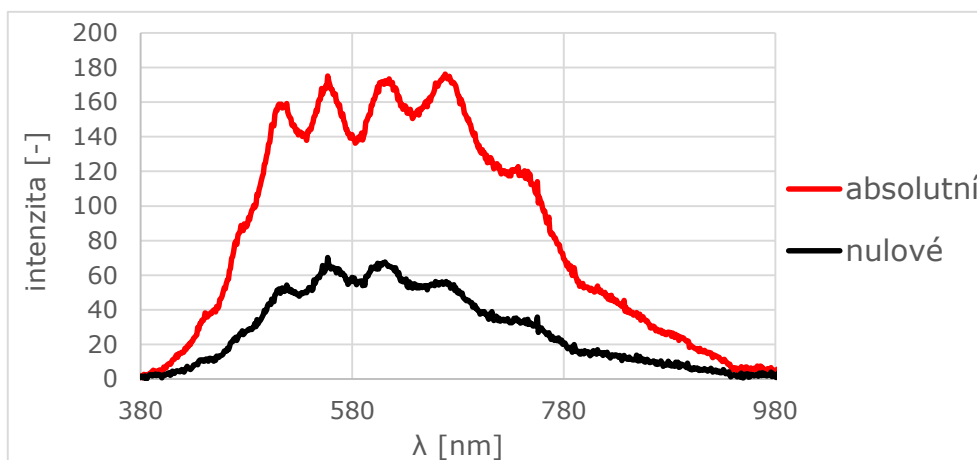
Obrázek 4.8 Spektrum absolutního a nulového odrazu varianty s homogenizačním hranolem

Zhotovením polymeru s vnitřním zrcadlem (kapitola 3.3.2) bylo omezeno množství rozhraní, kde by k reflexi mohlo docházet. Ačkoliv došlo k snížení intenzity nulového spektra o více než 90 % oproti variantě s homogenizačním hranolem (Obrázek 4.9), je vzhledem k nízké hodnotě intenzity odražené od vzorku podíl spektra nulového a absolutního (Obrázek 4.10) dvojnásobný oproti první realizované variantě.



Obrázek 4.9 Spektra nulového odrazu obou variant zapojení

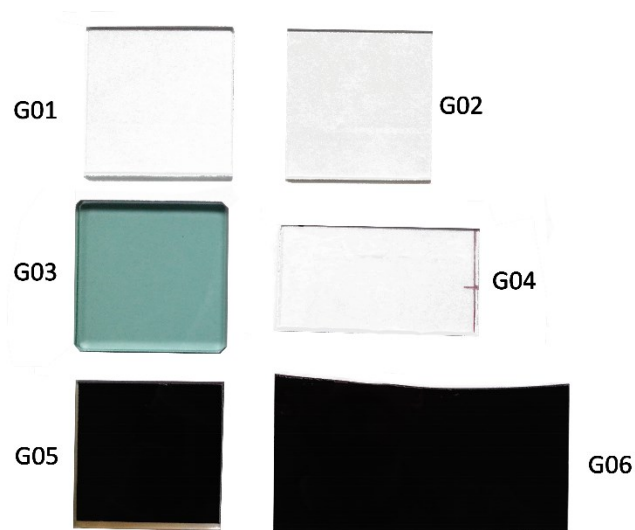
Pokles výstupní intenzity soupravy je způsoben již použitím stříbrného zrcadla, jehož reflexe se pohybuje kolem 95 % [18] v měřeném spektru. Jelikož je odraz v dutině mnohonásobný, je nutné počítat s nižší intenzitou i při dokonale vyrobeném přípravku. Defekty zrcadla k tomuto jevu přispívají a výsledná dutina propouští pouze 14 % intenzity světla ve světlovodu. Pokud dále uvažujeme, že světlo po reflexi od vzorku touto cestou prochází znovu, je vstupní intenzita do spektrometru znatelně nižší. Pro úspěšnou aplikaci metody zrcadlové dutiny je nutné zdokonalit technologický postup výroby zrcadla pro dosažení nižších ztrát intenzity průchodem přípravkem. Z absolutního spektra (Obrázek 4.10) je také patrná změna jeho tvaru způsobená vrstvou MgF_2 na povrchu stříbrného zrcadla.



Obrázek 4.10 Spektrum absolutního a nulového odrazu varianty s vnitřním zrcadlem

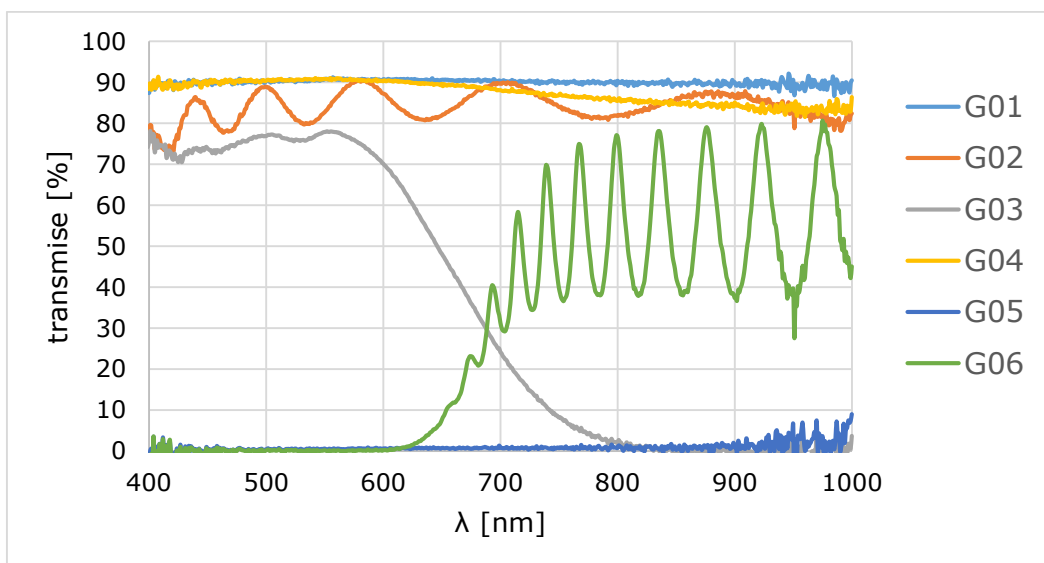
4.3 Měření transmise

Měření transmise se tato práce dotýká okrajově a pro výsledky měření šesti vzorků bylo vyhodnoceno pouze grafické porovnání.



| vzorek | materiál | dodatečné informace |
|--------|-----------------|--|
| G01 | bílé sklo | |
| G02 | ZnO | 1 μm na skleněném substrátu |
| G03 | zelené sklo | vysoký obsah Fe |
| G04 | standardní sklo | |
| G05 | CIGS | |
| G06 | amorfní křemík | 2 μm vrstva |

Tabulka 4.3 Vzorky pro měření transmise

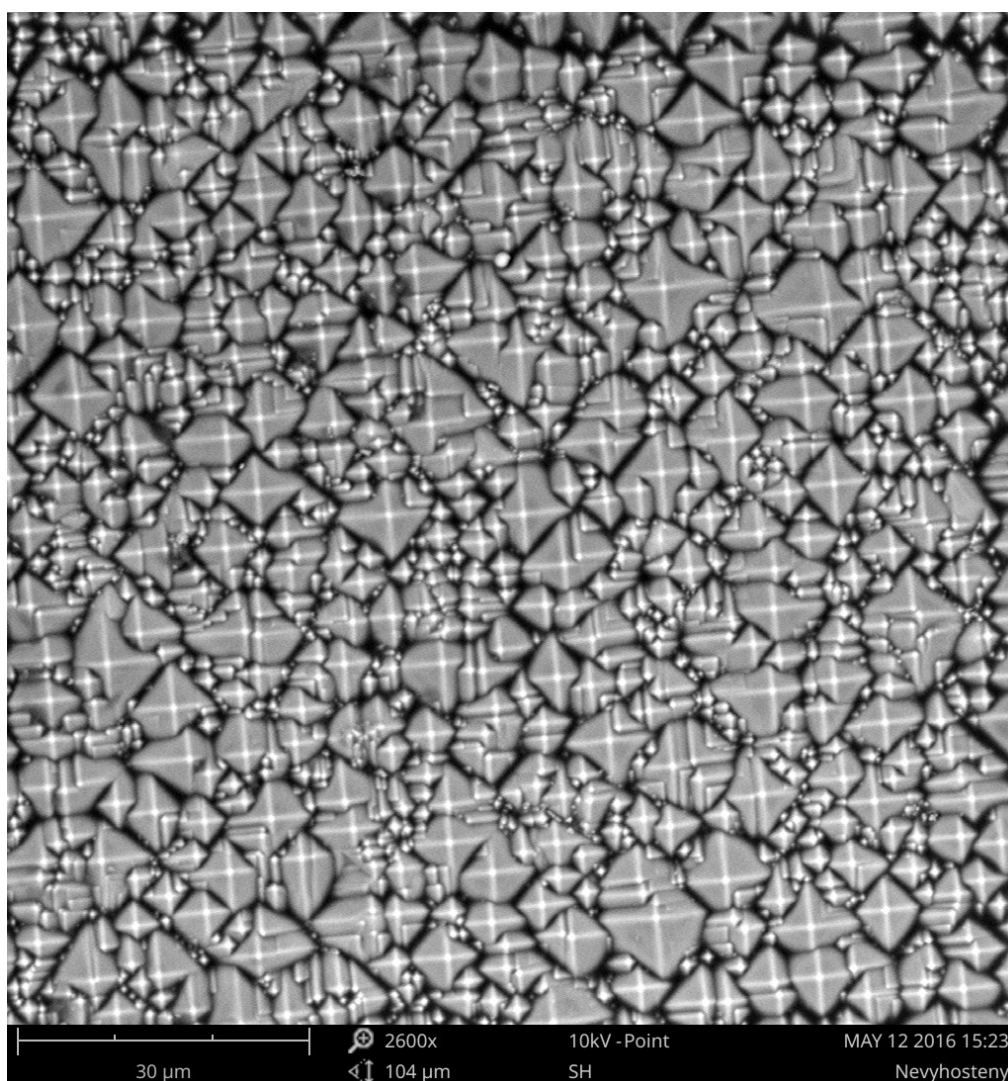


Obrázek 4.11 Výsledky měření transmise

4.4 Studium povrchu elektronovým mikroskopem

Povrch křemíkového substrátu (wafer) je v komerčních fotovoltaických článcích texturován pro snížení reflexe (kapitola 2.2.4). Standardně je užíváno pyramidové struktury na povrchu substrátu, jejíž kvalitu můžeme posuzovat z hlediska uniformity velikosti pyramid a množství povrchových defektů.

Snímek povrchu (Obrázek 4.12) byl pořízen pro vzorek c-Si s antireflexní vrstvou tloušťky $t = 80 \text{ nm}$ stolním elektronovým mikroskopem Phenom World. Povrch má pyramidovou strukturu, kdy se výška jednotlivých pyramid pohybuje v rozmezí od 1 do $7.5 \text{ }\mu\text{m}$. Převažují pyramidy větších rozměrů a při analýze se tedy pohybujeme v oblasti geometrické optiky (vlnová délka je kratší než rozměry pyramid).



Obrázek 4.12 Snímek pyramidové struktury pořízený elektronovým mikroskopem

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo studium antireflexních vrstev solárního článku se zaměřením na články barevné. V teoretické části byly definovány matematické modely pro simulaci reflexe solárního článku s jednoduchou antireflexní vrstvou SiNx a převedení spektra reflexe pomocí vjemových funkcí lidského oka do barevného modelu RGB. Oba modely byly realizovány v programu Wolfram Mathematica. Reflexi lze modelovat pro planární povrch a povrch s leptanými pyramidami.

Pro měření byla navržena a sestavena souprava pro měření reflexe založená na použití duálního světlovodu. Jako zdroj světla slouží halogenová žárovka, jejíž vlákno je promítnuto konkávním zrcadlem na vstup světlovodu. Pro zvýšení úhlu zachycení a promíchání světelného svazku byly na základě analýzy soupravy parametrem étendue mezi výstup světlovodu a měřený vzorek umístěny přípravky s použitím homogenizačního hranolu a homogenizační trubice s vnitřním zrcadlem.

Pro homogenizační hranol bylo docíleno zanedbatelné ztráty intenzity světla a zachování tvaru spektra zdroje. Nulové spektrum neboli míra odrazů na vnitřních rozhraní činila průměrně 15 %. Homogenizační trubice s vnitřním zrcadlem byla sestrojena za účelem snížení množství rozhraní, přes které světlo putuje, a tím i potenciálního snížení nulového spektra. Přípravek byl vyroben umístěním homogenizačního hranolu do středu trubice a následným zalitím polymerem. Zrcadlo bylo napařeno stříbrem na rozříznutý polymer a pokryto vrstvou MgF_2 . Vlivem neabsolutních odrazů na stříbrném zrcadle a povrchových defektů vzniklých při výrobě, klesla znatelně intenzita odraženého světla a míra nulového spektra činí 30%. Pro možnost použití této varianty je nutné zdokonalení technologického postupu výroby, jelikož při nízké intenzitě odraženého světla je měření ovlivňováno fluktuací intenzity v čase. Použitím vrstvy MgF_2 jako ochrany před oxidací stříbrného zrcadla dochází také k mírné změně tvaru výstupního spektra přípravku.

Měření reflexe bylo provedeno pro osm vzorků křemíkových solárních článků s různými tloušťkami antireflexní vrstvy SiNx . Pro krystalický křemík odpovídají naměřené hodnoty tvarově matematickému modelu a přepočtené RGB barvy korespondují s barvou jednotlivých článků. Matematický model reflexe odpovídá naměřeným hodnotám pro oba typy povrchových struktur, tedy planární a s leptanými pyramidami. V případě multikrystalického křemíku je měřená reflexe vyšší než modelovaná, což je pravděpodobně způsobeno nepřesností aproximace reflexe na povrchu s leptanými pyramidami. Pro multikrystalický křemík je vytvoření této povrchové struktury obtížnější a výsledný pokles reflexe je nižší než u křemíku krystalického. Souprava měření reflexe byla později rozšířena nástavbou pro měření transmise, kde byly jako testovací vzorky zvoleny čtyři typy skel, CIGS a amorfni křemík.

Konstrukce obou souprav a provedená měření byly publikovány na IWPTV'16 [19] (8th International Workshop on Teaching in Photovoltaics) a je plánováno jejich využití při výuce na ČVUT FEL, katedře elektrotechnologie. Výhledově lze na práci navázat především zdokonalením přípravku pro zvýšení úhlu zachycení světla a navržením matematického modelu pro vícenásobné antireflexní vrstvy.

Použité zdroje

1. MERTENS, Konrad a překlad GUNTHER ROTH. *Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice*. First edition. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 1118634160.
2. PvXchange, PV price index [online]. 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z <http://www.pvxchange.com>.
3. FTHENAKIS, V., MASON, J. E. a ZWEIBL, K. *Energy Policy*, 2008, 37, 387-399
4. FRAUNHOFER ISE. *Photovoltaics report*, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, 2016. Dostupné z <https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf/files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>
5. IRVINE, Stuart J. *Materials challenges: inorganic photovoltaic solar energy*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2015. RSC energy and environment series, 12. ISBN 184973187X.
6. COLINGE, Jean-Pierre, COLINGE, Cynthia A. *Physics of semiconductor devices*. 2. opl. Boston, Mass: Springer, 2006. ISBN 9780387285238
7. WEHRSPORN, Ralf B., GOMBERT, Andreas a Uwe RAU (eds.). *Photon Management in Solar Cells*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2015.
8. GLAUBITT, Walther, LÖBMANN, Peer. Antireflective coatings prepared by sol-gel processing: Principles and applications. *Journal of the European Ceramic Society*. Amsterdam: Elsevier Ltd. 2012. vol. 32, no. 11 ISSN 0955-2219
9. DITTRICH, Thomas. *Materials concepts for solar cells*. New Jersey: Imperial College Press, 2015. ISBN 1783264454.
10. SELJ, J. H., MONGSTAD, T. T., SØNDENA, R. a MARSTEIN, E. S. Reduction of optical losses in colored solar cells with multilayer antireflection coating. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Amsterdam: Elsevier Ltd. 2011. col. 95, no. 9 ISSN 0927-0248
11. ACDX. Commons.wikimedia.org : The CIE standard observer color matching functions [online]. 2008 [citace Březen 2016]. Dostupný pod licencí Creative Commons - ACDX 2.0 Generic na WWW: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6233111>
12. RGB/XYZ Matrices. Bruce Lindbloom [online]. 2001 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_RGB_XYZ_Matrix.html
13. Étendue. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=31659769>
14. Dual Branch Light Guides. *Edmund Optics* [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.edmundoptics.com/illumination/fiber-optic-illumination/>
15. *Trends 2015 in Photovoltaic application* [online]. In: . 2015, s. 61 [cit. 2015-12-07]. ISBN 978-3-906042-37-4. Dostupné z: <http://www.iea-pvps.org/>

16. SCHINKE, C., PEEST, P. C., SCHMIDT, J., BRENDDEL, R., BOTHE, K., VOGT, M. R., KRÖGER, I., WINTER, S., SCHIRMACHER, A. a LIM, S., *et al.* *Uncertainty analysis for the coefficient of band-to-band absorption of crystalline silicon*, AIP Advances **5**, p. 067168, 2015.
17. DUTTAGUPTA, S., MA, F., HOEX, B., MUELLER, T. a ABERLE, A. *Optimised antireflection coatings using silicon nitride on textured silicon surfaces based on measurements and multidimensional modeling*, Energy Procedia **15**(0), pp. 78–83, 2012.
18. CHU, C. T., FUQUA, P. D. a BARRIE, J. D. *An electrochemical impedance spectroscopy study of durable silver coatings*. OSA, 2004
19. NEVYHOŠTĚNÝ, R., HRZINA, P. a HOLOVSKÝ, J. *Teaching aid for spectral properties of solar cells. Proceedings of the 8th International Workshop on Teaching in Photovoltaics IWTPV'16*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-05935-7

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1.1 Absorpce světla na fotodiodě [1]..... | 14 |
| Obrázek 1.2 VA charakteristika osvětlované fotodiody [1]..... | 14 |
| Obrázek 1.3 Konstrukce solárního článku [1]..... | 15 |
| Obrázek 1.4 Náhradní schéma solárního článku | 15 |
| Obrázek 1.5 V-A charakteristika a výkonová křivka solárního článku | 16 |
| Obrázek 2.1 Pásový diagram nepřímého (vlevo) a přímého (vpravo) polovodiče [6] .. | 19 |
| Obrázek 2.2 Absorpce c-Si pro jeho různé tloušťky v závislosti na vlnové délce [7] | 20 |
| Obrázek 2.3 Struktura standardního solárního článku c-Si se zobrazenou transmisí a reflexí na jednotlivých rozhraních | 21 |
| Obrázek 2.4 Reflexe jedné vrstvy porózního SiO ₂ a MgF ₂ [8] | 23 |
| Obrázek 2.5 Pohyb světla na rozhraní s texturovaným Si pyramidovou strukturou [7] | 24 |
| Obrázek 2.6 Matematický model jednoduché AR vrstvy | 25 |
| Obrázek 2.7 Viditelné spektrum (vlnové délky v nm) | 26 |
| Obrázek 2.8 CIE srovnávací funkce [11]..... | 26 |
| Obrázek 2.9 Spektrum standardního CIE D65 zdroje světla | 27 |
| Obrázek 2.10 Chromatický diagram xy s vyznačeným trojúhelníkem sRGB a bodem D65 | 28 |
| Obrázek 2.11 Étendue v prostorovém zobrazení [13] | 29 |
| Obrázek 2.12 Jednoduchý optický systém | 29 |
| Obrázek 3.1 Světelný zdroj..... | 31 |
| Obrázek 3.2 Duální světlovod [14]..... | 32 |
| Obrázek 3.3 Spletená část duálního světlovodu | 32 |
| Obrázek 3.4 Umístění měřeného vzorku (na obrázku kalibrační) a softwarové zpracování..... | 33 |
| Obrázek 3.5 Homogenizační hranol | 34 |
| Obrázek 3.6 Polymer s vnitřním zrcadlem | 35 |
| Obrázek 3.7 Naprášené zrcadlo na vnitřních stěnách polymeru..... | 35 |
| Obrázek 3.8 Souprava měření transmise..... | 36 |
| Obrázek 4.1 Procentuální pokles intenzity po pěti minutách | 39 |
| Obrázek 4.2 Pokles intenzity pro $\lambda = 608$ nm | 39 |
| Obrázek 4.3 Vzorky pro měření reflexe..... | 40 |
| Obrázek 4.4 Výsledky měření reflexe | 41 |
| Obrázek 4.5 Chromatický diagram s vyznačeným sRGB a barvou vzorku FF08 (černý bod)..... | 42 |
| Obrázek 4.6 Porovnání měřeného (R _m) a vypočteného (R _v) spektra FF08 | 42 |
| Obrázek 4.7 Porovnání měřeného (R _m) a vypočteného (R _v) spektra FF01 | 43 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 4.8 Spektrum absolutního a nulového odrazu varianty s homogenizačním hranolem..... | 43 |
| Obrázek 4.9 Spektra nulového odrazu obou variant zapojení..... | 44 |
| Obrázek 4.10 Spektrum absolutního a nulového odrazu varianty s vnitřním zrcadlem | 44 |
| Obrázek 4.11 Výsledky měření transmise..... | 45 |
| Obrázek 4.12 Snímek pyramidové struktury pořízený elektronovým mikroskopem... | 46 |

Příloha A

Převod spektra do RGB- Wolfram Mathematica

```
(* Import CIE funkcí pro rozsah 390-830 nm *)
CIE = Import["BP/RGB/cie_funkce.txt", "Table"] // MatrixForm;
(* Spektrum zdroje světla *)
D65 = Import["BP/RGB/d65.txt", "Table"] // MatrixForm;
(* Reflexe vzorku 0-1 *)
Vzorek = Import["BP/RGB/vzorky/ff04.txt", "Table"] // MatrixForm;

(* Parametr intenzity zdroje *)

$$L = \sum_{\lambda=1}^{440} \text{CIE}[[1]][[1, 2]] * \text{D65}[[1]][[1]];$$

(* XYZ parametry odraženého spektra *)

$$X = \sum_{\lambda=1}^{440} \text{CIE}[[1]][[1, 1]] * (\text{D65}[[1]][[1]] * \text{Vzorek}[[1]][[1, 2]]);$$


$$Y = \sum_{\lambda=1}^{440} \text{CIE}[[1]][[1, 2]] * (\text{D65}[[1]][[1]] * \text{Vzorek}[[1]][[1, 2]]);$$


$$Z = \sum_{\lambda=1}^{440} \text{CIE}[[1]][[1, 3]] * (\text{D65}[[1]][[1]] * \text{Vzorek}[[1]][[1, 2]]);$$

(* Vztažení XYZ odraženého světla k intenzitě zdroje *)
Xr = X / L;
Yr = Y / L;
Zr = Z / L;
(* Zobrazení kruhu s výslednou barvou *)
Graphics[{XYZColor[Xr[[1]], Yr[[1]], Zr[[1]]], Disk[]}]
(* Výpočet RGB souřadnic zabudovanou funkcí Wolfram Mathematica *)
x = ColorConvert[XYZColor[Xr[[1]], Yr[[1]], Zr[[1]]], "RGB"] // InputForm
(* Vypočtení chromatických souřadnic a jejich zobrazení v chromatickém grafu *)
x = X / (X + Y + Z);
y = Y / (X + Y + Z);

chroma = ChromaticityPlot["sRGB"];
Show[chroma, Graphics[{PointSize[0.03], Point[{x[[1]], y[[1]]}]}]]
```

Modelování reflexe- Wolfram Mathematica

```
(* Reflexe je počítána od 300 do 1200nm *)

ClearAll[f];
(* Tloušťka antireflexní vrstvy *)
d = 113*10-9;
(* Indexy lomu *)
n0d = Import["BP/reflexe/n_vzduch.xlsx"];
n0 = Interpolation[n0d[[1]]];
n1d = Import["BP/reflexe/n_si3n4.xlsx"];
n1 = Interpolation[n1d[[1]]];
n2d = Import["BP/reflexe/n_csi.xlsx"];
n2 = Interpolation[n2d[[1]]];
(* Absorpční koeficienty - pokud nemáme přímo k *)
a2d = Import["BP/reflexe/a_csi.xlsx"];
a2 = Interpolation[a2d[[1]]];
(* Výpočet k pokud nejsou přímo dostupné hodnoty *)
k0 = 0;
k1d = Import["BP/reflexe/k_si3n4.xlsx"];
k1 = Interpolation[k1d[[1]]];
k2[λ_] := 
$$\frac{\alpha 2[\lambda] * \lambda * 10^{-7}}{4 * \text{Pi}}$$
;
(* Komplexní indexy lomu *)
N0[λ_] := n0[λ];
N1[λ_] := n1[λ] + I*k1[λ];
N2[λ_] := n2[λ] + I*k2[λ];
(* Sružené reflexe *)
r01[λ_] := 
$$\frac{N0[\lambda] - N1[\lambda]}{N0[\lambda] + N1[\lambda]}$$
;
r10[λ_] := 
$$\frac{N1[\lambda] - N0[\lambda]}{N1[\lambda] + N0[\lambda]}$$
;
r12[λ_] := 
$$\frac{N1[\lambda] - N2[\lambda]}{N1[\lambda] + N2[\lambda]}$$
;
β[λ_] := 
$$\frac{2 * \text{Pi} * N1[\lambda] * d}{\lambda * 10^{-9}}$$
;
r02[λ_] := 
$$\frac{r01[\lambda] + r12[\lambda] * e^{-2*I*\beta[\lambda]}}{1 + r01[\lambda] * r12[\lambda] * e^{-2*I*\beta[\lambda]}}$$
;
(* Grafické zobrazení a export hodnot do souboru *)

Plot[100*Power[Abs[r02[λ]], 2], {λ, 300, 1300}]
Export["reflexe.dat", Table[100*Power[Abs[r02[λ]], 2], {λ, 300, 980}]]
(* Pro povrch s leptanými pyramidami
Plot[100*Power[Power[Abs[r02[λ]], 2], 2], {λ, 380, 1300}]
Export["reflexe.dat", Table[100*Power[Power[Abs[r02[λ]], 2], 2], {λ, 300, 1200}]]
*)
```

Příloha B

Porovnání měřené reflexe z matematickým modelem

