



PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

KATEDRA
EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

Diplomová práce

Určení celkové a v čase
degradované účinnosti optické
části zařízení SkyFlower®

Autor	Bc. Martin Vacula
Vedoucí práce	Mgr. Miroslav Pech, Ph.D.
Konzultant	Mgr. Radim Čtvrtlík, Ph.D.
Studijní obor	Nanotechnologie
Forma studia	Prezenční
Rok	2018

Jméno a příjmení autora	Bc. Martin Vacula
Název práce	Určení celkové a v čase degradované účinnosti optické části zařízení SkyFlower®
Typ práce	diplomová
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky, Společná laboratoř optiky
Vedoucí práce	Mgr. Miroslav Pech, Ph.D.
Konzultant	Mgr. Radim Čtvrtlík, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2018
Počet stran	80
Počet příloh	0
Jazyk	český
Abstrakt	Diplomová práce se zabývá měřením změny fyzikálních vlastností odrazných fólií vystavených různým atmosférickým jevům po stanovenou dobu. Experimentálně změřená data byla porovnána a je jimi určena degradace odrazných fólií v závislosti na daných atmosférických jevech. Následně byla data nezatížených a degradovaných fólií použita ke stanovení účinnosti optické části zařízení SkyFlower® a byly vypočítány rozdíly v závislosti na způsobu zatěžování vzorků.
Klíčová slova	fólie, odraznost, rozptyl, tvrdost, modul pružnosti, UV záření, teplota, vlhkost, salinita

Author's first name and surname	Bc. Martin Vacula
Title	Total and time degraded efficiency determination of SkyFlower® device's optical part
Type of thesis	master
Department	Department of Experimental Physics, Joint Laboratory of Optics
Supervisor	Mgr. Miroslav Pech, Ph.D.
Consultant	Mgr. Radim Čtvrtlík, Ph.D.
Year of presentation	2018
Number of pages	80
Number of appendices	0
Language	czech
Abstract	This master thesis is focused on measuring the change of physical properties of reflective foils exposed to various atmospheric phenomena for specific period of time. The measuring contains several samples, all with specific properties. Samples were tested on various measuring devices. Experimentally measured data are compared and degradation of reflective foils according to specific atmospheric phenomena is defined. Those data were also used to calculate efficiency of SkyFlower® device's optical part and differences between them were defined.
Keywords	foil, reflectivity, scatter, hardness, elastic modulus, UV radiation, temperature, humidity, salinity

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Miroslava Pecha, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne

.....
podpis

Děkuji především svému vedoucímu diplomové práce Mgr. Miroslavu Pechovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost a odborné vedení při řešení dané problematiky.

Také děkuji Ing. Giladu Blauovi, Ph.D. za zadání práce s velice zajímavou problematikou a za poskytnuté konzultace a připomínky týkající se nejen této diplomové práce.

Mé díky patří také Mgr. Radimu Čtvrtlíkovi, Ph.D. za ochotu, vstřícnost a odborné rady po celou dobu vypracovávání mé diplomové práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Mgr. Liboru Nožkovi, Ph.D. za ochotu a odbornou pomoc při řešení daného tématu a Mgr. Janu Tomáštkovi za obětavou pomoc a rady.

Dále děkuji své rodině a přátelům za podporu a pozitivní smýšlení po celou dobu mého studia.

Na závěr bych chtěl také poděkovat poskytovatelům interního grantu Univerzity Palackého (IGA_PrF_2018_009), z něž byl můj výzkum podporován.

Obsah

Úvod	8
1. Teoretická část	9
1.1. Energie	9
1.1.1. Získávání energie na Zemi	11
1.1.2. Energie získaná ze Slunečního záření	13
1.1.3. Sluneční záření	13
1.2. Fotovoltaika (PV)	16
1.2.1. Historie	16
1.2.2. Fotovoltaický jev	16
1.2.3. Fotovoltaické články	16
1.2.4. Účinnost	18
1.2.5. Shockleyův-Queisserův limit (S-Q limit)	18
1.2.6. 3 generace PV	19
1.2.7. Multivrstvé PV články	21
1.2.8. Perovskitové PV články	21
1.2.9. Koncentrovaná fotovoltaika (CPV)	22
1.3. SkyFlower®	23
1.4. Optická část zařízení	25
1.4.1. Tenké vrstvy (TV)	25
1.4.2. Tenké optické vrstvy	25
1.4.3. Příprava tenkých vrstev	27
1.4.4. Odrazná fólie	29
1.4.5. Výroba BOPET fólií	31
2. Teorie měření	32
2.1. Optické vlastnosti	32
2.1.1. Měření spektrální odraznosti	32
2.1.2. Měření rozptylových vlastností	37
2.2. Mechanické vlastnosti	42
2.2.1. Indentace	42
2.2.2. Vrypová zkouška	44
2.2.3. NanoTest™ NTX600:	45
3. Experimentální část	46
3.1. Optické vlastnosti	47
3.1.1. Příprava vzorků pro optická měření	47
3.1.2. Spektrální odraznost	47
3.1.3. Rozptylové Vlastnosti	48
3.2. Mechanické vlastnosti	49
3.2.1. Příprava vzorků pro mechanická měření	49
3.2.2. Nanoindentace a vrypové zkoušky	50
3.3. Zátěžové testy	50
3.3.1. Poničení	51
3.3.2. Zvýšená teplota	51
3.3.3. Nízká teplota	52
3.3.4. UV záření	52
3.3.5. Vlhkost	53
3.3.6. Salinita	53
4. Výsledky a diskuse	54
4.1. Spektrální odraznost	54
4.1.1. Fólie ZF	54
4.1.2. Fólie Z a fólie ZFZ	55
4.1.3. Fólie A a fólie B	55
4.1.4. Fólie DA a fólie DB	56
4.1.5. Fólie HTA a fólie HTB	57
4.1.6. Fólie LTA a fólie LTB	57

4.1.7.	Fólie UVA a fólie UVB	58
4.1.8.	Souhrnné srovnání spektrálních odrazností	58
4.2.	Rozptylové vlastnosti	60
4.3.	Nanoindentace	62
4.4.	Vrypová zkouška	63
4.4.1.	Srovnání kritických zátěžných sil	63
4.4.2.	Snímky z konfokálního mikroskopu	65
4.4.3.	Topografie povrchů při zátěžné síle 30 <i>mN</i>	66
4.4.4.	Topografie povrchů při zátěžné síle 100 <i>mN</i>	67
4.5.	Test opotřebení	68
5.	Simulace pro výpočet celkové účinnosti zařízení SkyFlower®	69
5.1.	Program ZEMAX	69
5.2.	Simulace	69
5.3.	Výsledná účinnost	72
	Závěr	76
	Seznam použitých zdrojů	77
	Seznam použitých symbolů a zkratk	80

Úvod

Je obecně známo, že na Zemi jsou omezené zásoby surovin. Proto lidstvo hledá různé alternativní zdroje k zisku energie. Jedním z možných řešení problému s omezenými zásobami zdrojů je využití sluneční energie. K tomu slouží tzv. fotovoltaika, díky které je možné transformovat energii slunečních paprsků v elektřinu. SkyFlower[®] je inovativní zařízení navržené právě k tomuto účelu. S nápadem přišel Ing. Gilad Blau, Ph.D. (vlastník firmy Or Hama Energy[®] s.r.o.), který na SkyFlower[®] vlastní patent a již několik let se snaží zařízení co nejvíce zdokonalit. Ohledně problematiky optické části SkyFlower[®] tedy začala spolupráce a vytyčil se cíl diplomové práce. A sice proměřit materiály používané jako zrcadla ke koncentraci dopadajících paprsků. Dále vybrané materiály podrobit zátěžovým testům v konkrétních podmínkách, které úměle vyvolají jejich degradaci (změnu vlastností). Následně tyto vzorky opět proměřit a porovnat je jak mezi sebou, tak s nezátěžovými vzorky. Finální a stěžejní úkol je použít získané informace o poskytnutých materiálech, vypočítat celkovou optickou účinnost SkyFlower[®] a srovnat hodnoty pro nedegradované a degradované vzorky. Úkolem tedy není měnit geometrii samotného zařízení, ale pouze stanovit jeho účinnost. Pro tyto účely byl zvolen program ZEMAX, který je určený k simulacím a výpočtům shodujícím se s našimi požadavky.

V první teoretické části, která je spíše zaměřena na motivaci celé diplomové práce, je postupně popsáno, proč má SkyFlower[®] jako nástroj pro "výrobu" elektřiny velký potenciál. Nejprve jsou popsány možné způsoby zisku energie se zaměřením právě na energii ze Slunce. Poté způsob, jakým je transformována pomocí fotovoltaiky. Nastíněna je i problematika fotovoltaiky a úskalí s ní spojená. Následně je popsáno zařízení SkyFlower[®], jemuž je věnována samostatná kapitola. A na závěr první části jsou detailněji popsány odrazné materiály použité jako zrcadla v optickém koncentrátoru zařízení.

Druhá část je teoretickým popisem stěžejních měřících metod použitých v diplomové práci. Jedná se o metody zkoumající optické vlastnosti (měření spektrální odraznosti a měření rozptylových vlastností) a o metody zabývající se mechanickými vlastnostmi (nanoindentace a vrypová zkouška). Oba typy metod jsou v práci vyhodnoceny a komentovány zvlášť. Všemi zmíněnými metodami byly vzorky proměřeny a vyhodnoceny na Společné Laboratoři Optiky v Olomouci.

V následující experimentální části práce je popsáno vše, co se týče přípravy a provedení experimentů. Počínaje přípravou vzorků, přes nastavení laboratorní sestavy až po zvolené parametry měření. V této části práce jsou také obsaženy fotografie vzorků a použitých přístrojů.

Sekce výsledky a diskuse shrnuje poznatky získané z měření popsané v experimentální části. Je složena primárně z tabulek a grafů popisujících naměřené výsledky. Na konci každé kapitoly je shrnutí, kde jsou popsány poznatky z daného měření, a pokud to bylo možné, jsou v něm srovnány zkoumané vzorky.

Poslední a stěžejní část celé práce, která využívá všech dříve naměřených výsledků z optických měření, je simulace pro výpočet celkové účinnosti zařízení SkyFlower[®]. Zde byl v programu ZEMAX vytvořen model SkyFlower[®] a následně spočítány hodnoty účinnosti optické účinnosti celého zařízení pro všechny vzorky. Výsledky jsou ovedeny v tabulkách a na konci kapitoly komentovány.

Na závěr je nutno zmínit, že v diplomové práci nebudou uvedeny konkrétní hodnoty použité při výpočtech účinnosti ani přesný matematický popis SkyFlower[®]. A to z toho důvodu, že tyto informace byly poskytnuty firmou Or Hama Energy[®] s.r.o. za podmínky jejich neuvěření.

1. Teoretická část

1.1. Energie

Energie je skalární fyzikální veličinou. Popisuje schopnost hmoty, látky nebo pole konat **práci**, což je působení síly na těleso nebo silové pole, při němž dochází k posunutí, deformaci nebo ke změně rozložení potenciální energie v silovém poli. Jednotkou energie a zároveň práce je joule [J], v soustavě SI odvozená jednotka. Její vyjádření je $J = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$ nebo $N \cdot m$, kde kg je kilogram, m je metr, s je sekunda a N je newton. Slovně je 1 J energie předána tělesu, když se vlivem působící síly 1 N posune o vzdálenost 1 m . Jiná definice říká, že 1 J odpovídá uvolněnému teplu, když proud 1 A prochází odporem 1 Ω po dobu 1 s .

Jednotka 1 joule je poměrně malá, a proto se v praxi používají její násobky nebo jednotky odvozené. Jednotce 1 J odpovídá její ekvivalentní vyjádření pomocí výkonu, a sice 1 Ws (wattsekunda). Dále budu ve své práci používat tyto odvozené jednotky, jelikož v energetice lépe popisují získanou energii. Jednotka Ws vyjadřuje práci stroje s příkonem 1 W za 1 sekundu. Dále jsou uvedeny základní přepočty jednotek mezi J , Ws a jejich násobky.

- 1 $J = 1 Ws$
- 1 $J = 2,778 \cdot 10^{-7} kWh$
- 1 $kWh = 3\,600\,000 J = 3,6 MJ$

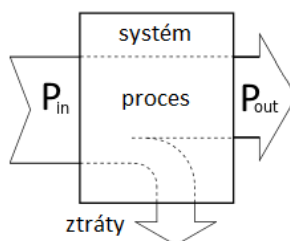
Důležitá vlastnost energie je taková, že nemůže zanikat, ale také nemůže být vytvořena. Energie vždy jen mění svou formu, a to konáním práce. V termodynamice se pro tyto jevy zavedlo teplo (termodynamická veličina, která vyjadřuje míru změny vnitřní energie) a v termodynamickém popisu se přeměna energie řídí zákony termodynamiky a sice prvním a druhým:

1. **termodynamický zákon** – je fyzikální formulací zákona zachování energie. Říká nám, že energie izolované soustavy je časově neměnná. Jinými slovy energie nemůže vznikat ani zanikat, pouze se může transformovat na jiný druh energie. Jiné vyjádření prvního termodynamického zákona říká, že nelze sestrojít perpetuum mobile prvního druhu, tedy stroj, který by stále dodával mechanickou energii, ale nespotřeboval by odpovídající množství energie jiného druhu.
2. **termodynamický zákon** – říká, že tepelná energie se nemůže předávat všemi směry. Těleso, které je chladnější, nemůže předávat teplo tělesu teplejšímu. [1]

Energie tedy může být převedena na jinou formu pomocí tzv. převodníků, ovšem ne beze ztrát v podobě tepla nebo vlivem překonávání odporu a jiné příčiny, neboť tyto převodníky nepracují ideálně. Energie je takto převedena na jinou formu s určitou účinností, která je vždycky menší než 100 % a liší se v závislosti na použitém přístroji a na formách energie, které transformujeme. **Účinnost** je dána vztahem

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100, \quad (1)$$

kde η je účinnost přeměny udávaná v % (po vynásobení 100) a je to poměr mezi energií, kterou stroj odevzdá P_{out} (výkonem) a energií převáděnou P_{in} (příkonem). Obecné schéma transformace energie převodníkem je na obrázku 1.



Obrázek 1 | Ilustrační schéma převodníku energie, upraveno z [2].

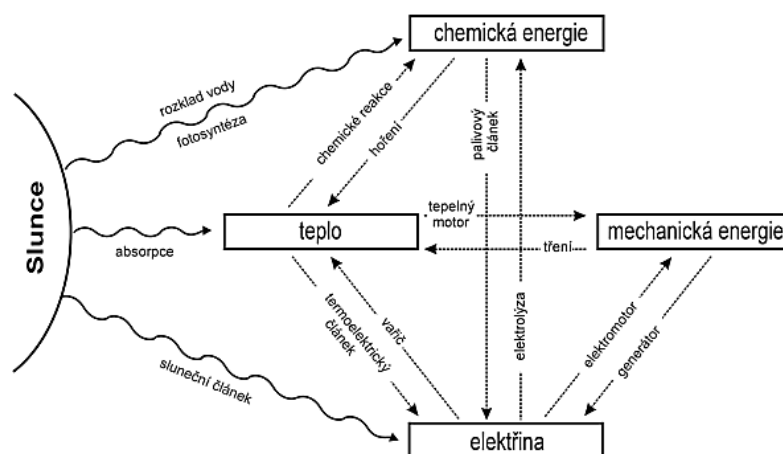
Tato účinnost se výrazně liší u jednotlivých druhů přeměn. Účinnosti přes 95 % dosahuje přeměna elektrické energie v mechanickou práci a naopak. Oproti transformaci elektrické energie v mechanickou dokážeme přeměnit tepelnou energii v mechanickou práci s účinností pouze 30-40 %, účinnost žárovky měnit elektřinu na světlo je pouhých 10 % a proces fotosyntézy měnící sluneční energii na energii chemickou má účinnost menší než 1 % [3].

Ve své práci se zabývám zvýšením efektivity zisku elektrické energie, proto vynechám účinnosti takových energetických přeměn, které se elektrické energie netýkají. V tabulce 1 je srovnání přeměny různých energií na energii elektrickou.

Proces přeměny	Typ přeměny	Účinnost
Výroba elektřiny		
Plynová turbína	Chemická → Elektrická	Až 40 %
Kombinace Plynové a parní turbíny	Chemická/Termální → Elektrická	Až 60 %
Vodní turbína	Gravitační → Elektrická	Až 90 % (prakticky dokázáno)
Větrná turbína	Kinetická → Elektrická	Až 59 % (teoretický limit)
Fotovoltaický článek	Radiační → Elektrická	6–40 % (závislé na technologii), 15-20 % nejčastěji, 85-90 % (teoretický limit)
Palivový článek	Chemická → Elektrická	Až 85 %
Uchování elektřiny		
Lithium-iontová baterie	Chemická ↔ Elektrická	80-90 %
Nikl-metal hydridová baterie	Chemická ↔ Elektrická	66 %
Olověný akumulátor	Chemická ↔ Elektrická	50-95 %

Tabulka 1 | Tabulka účinnosti vybraných převodníků při transformaci různých typů energie na energii elektrickou a účinnosti jejího uchování, upraveno z [2].

Přeměna energie ale neprobíhá pouze pomocí techniky. V přírodě se energie přeměňuje také. Na tomto procesu má největší podíl Slunce, z nějž na osvětlenou polokouli Země dopadá každou sekundu $1,74 \cdot 10^{14} J$ zářivé energie. Sluneční záření na Zemi dopadá od jejího vzniku přibližně před 4,5 miliardami let. Od té doby do současnosti na Zemi dopadlo nepředstavitelné množství energie, jejíž velká část se musela přeměnit na jiné formy. Většina byla přeměněna na teplo, jiná zase byla spotřebována na udržení koloběhu vody. Další podíl se uložil do pradávných rostlin a živočichů ve formě energie chemické. Tuhle uloženou energii nyní známe pod pojmem **fosilní paliva** a patří mezi ně zejména uhlí, ropa a zemní plyn. Téměř všechna energie, kterou máme v současnosti k dispozici je původem ze Slunce. Možnosti transformace energie a zařízení nebo procesy k nim potřebné jsou zobrazeny na obrázku 2 [4].



Obrázek 2 | Možné transformace energie a zařízení k nim potřebná, převzato z [5].

Přeměnou různých druhů energie pro lidské účely (zejména tedy na energii elektrickou) se zabývají různá technická odvětví jako jsou elektrotechnika, dopravní technika, radiotechnika, optika, ale zejména **energetika**. Energetika je označení pro společnosti, jejichž cíle jsou produkovat energii a poté ji prodávat. To ale zahrnuje také extrakci, zpracování, čištění a distribuci paliv, které jsou dalšími procesy při přeměně na energii. V současné době je lidstvo ve většině zemí na energii závislé, a proto je působení zmíněných společností neodmyslitelnou součástí současné společnosti. V následující kapitole budou popsány možnosti získání energie z různých zdrojů dostupných na Zemi [1].

1.1.1. Získávání energie na Zemi

Jak již bylo vysvětleno výše, energie se nedá vyrobit. Proto ji získáváme přeměnou z různých zdrojů, z nichž se každý vyznačuje jinou účinností a dostupností. Tyto zdroje energie dělíme do dvou skupin uvedených níže, kde do každé z nich patří několik zdrojů. Na obrázku 3 je poměr získané elektrické energie z různých zdrojů za rok 2012 a na obrázku 4 je ukázán maximální potenciál energie, který bychom teoreticky byli schopni za rok vytěžit. Ten má ale úplně jiné poměrové zastoupení.

1. **Neobnovitelné** – takové zdroje energie, u nichž se očekává vyčerpání v řádu stovek let, avšak jejich obnova by zabrala dobu mnohonásobně delší.

- **Uhlí** – je hořlavá sedimentární hornina složená převážně z uhlíku, vodíku a kyslíku. Další prvky, ze kterých se skládá jsou například síra, uran a thorium. Uhlí je v dnešní době jedna z nejdůležitějších energetických surovin, neboť jeho spalováním je pokryto přibližně 40 % celosvětového zisku elektřiny. Dále se využívá k vytápění a ohřívání vody, ale také je důležitou surovinou pro různá odvětví chemického průmyslu. Zásoby uhlí na Zemi podle odhadů vydrží až do roku 2150 za předpokladu, že roční spotřeba uhlí ve známých rezervách zůstane stejná. Teoretické celosvětové maximum vytěžitelných uhelných zásob je 12 %, zbytek je možné využít na extrakci ropy nebo spalováním přímo v nalezišti vytvořit zemní plyn.
- **Ropa** – je hořlavá kapalina skládající se z uhlovodíků, především alkanů. Ropa vzniká přeměnou odumřelých živočichů a rostlin v horninách. Ropa se v přírodě tvoří neustále, ale její vznik trvá několik milionů let, čímž se z lidského hlediska stává neobnovitelným zdrojem. Kromě zdroje energie je ropa důležitá pro výrobu potravin, neboť se z ní vyrábí umělá hnojiva v zemědělství. Ropa je čerpána z hloubek zhruba několika set m až deseti km , nebo vyvěrá tlakem společně se zemním plynem.
- **Zemní plyn** – je směs uhlovodíků vyskytující se v přírodě. Jeho hlavními složkami jsou metan a ethan, jejichž zastoupení může být různé. Zemní plyn je hořlavé fosilní palivo využívané jako zdroj energie, ale také jako surovina pro chemický a palivový průmysl, při vytápění a pro výrobu vodíku.
- **Rašelina** – je složena z velké části z organické hmoty (celulóza a organické kyseliny). Je to částečně rozložený, nahromaděný rostlinný materiál. Celosvětově rašelina pokrývá 2 % zemského povrchu a je v ní uloženo 8 miliard TJ energie. Využívá se jako palivo, podestýlka pro dobytek, k léčbě kloubů a k zadržování vlhkosti.
- **Jaderná energie** – je vázaná v jádru atomu, kterou dokážeme pomocí jaderných reakcí uvolnit. Fyzikální principy, kterými tuto energii získáváme jsou štěpná reakce, radioaktivní rozpad a termojaderná fúze. Z jaderné energie nyní získáváme přibližně 11 % celosvětové elektřiny. Jaderná energie se řadí mezi vyčerpávané zdroje, protože zásoby používaného uranu nejsou nekonečné. Problémem souvisejícím se získáním jaderné energie je ukládání vyhořelého paliva.

2. **Obnovitelné** – zdroje, ze kterých lze teoreticky těžit po další tisíce až miliardy let.

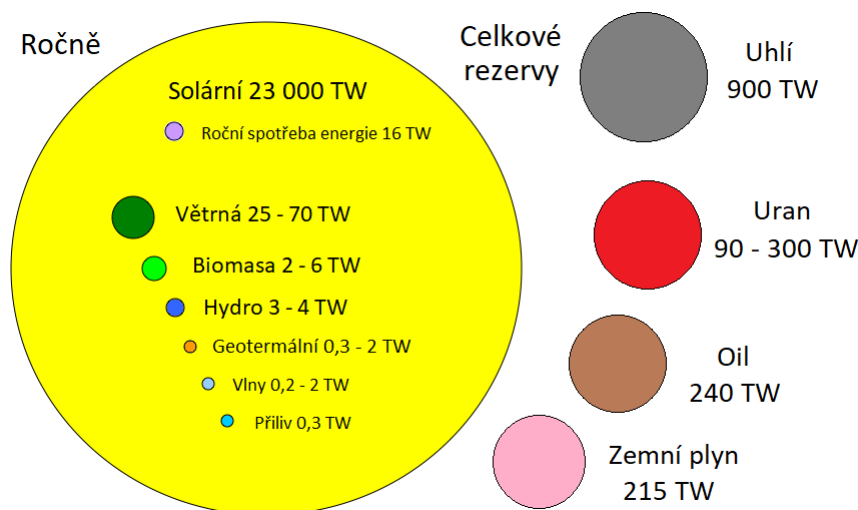
- **Sluneční energie** – vzniká díky probíhajícím termojaderným reakcím, při kterých se přeměňuje vodík na helium, a přitom uvolňuje obrovské množství energie. Tato energie na zemský povrch dopadá neuvěřitelné množství ve formě záření. Ve vzdálenosti, v níž se nachází Země, dopadá průměrný energetický příkon $1300 W/m^2$. Ten je však ovlivněn atmosférou, sklonem paprsků aj., a proto se na různých místech na Zemi liší.

- Vodní energie – je (po biomase) druhým nejvyužívanějším obnovitelným zdrojem. Využívá se její kinetické, potenciální a tepelné energie přeměnou na elektřinu (70 % získané elektřiny z obnovitelných zdrojů). V roce 2015 se z vodní energie získalo 16,6 % celosvětové elektřiny.
- Větrná energie – využívá síly proudění větru hlavně ve větrných elektrárnách, kde je transformována na elektřinu. Elektřina z větrných elektráren činila v roce 2015 téměř 4 % světové elektřiny.
- Geotermální energie – se využívá převážně k získání tepelné energie pro vytápění. Je to přírodní projev tepelné energie zemského jádra. Vzniká důsledkem slapových sil a rozpadem radioaktivních látek.



Obrázek 3 | Graf poměru vyrobené elektřiny z různých zdrojů, upraveno z [6].

Výše uvedené dělení ovšem není úplně přesné, neboť všechny zdroje se postupně obnovují, a ani Slunce není nevyčerpatelné. Navíc podle zákona o entropii není žádný ze zdrojů obnovitelný. Avšak v krátkodobém měřítku a se zanedbáním některých vlastností můžeme toto rozdělení považovat za správné [1, 7].



Obrázek 4 | Poměr světového potenciálu různých typů energie za rok a celkové zásoby neobnovitelných zdrojů, upraveno z [8].

1.1.2. Energie získaná ze Slunečního záření

Z minulé kapitoly stojí za povšimnutí energie slunečního záření, která několikanásobně převyšuje ostatní zdroje. Tato práce se zabývá právě energií ze slunečního záření a možnostmi vylepšení jejího zisku, neboť její potenciál je obrovský. Tato energie se dá využívat přímo, nebo nepřímo. Hlavní zdroje takto získávané energie jsou popsány níže.

1. **Nepřímé využití** – zahrnuje několik přírodních nebo technických mezikroků, než je sluneční záření převedeno na teplo nebo elektřinu.

- Energie vody – sluneční záření ovlivňuje koloběh vody na Zemi. Způsobuje, že se voda vypařuje a následné srážky z mraků naplní vodní koryta a nádrže. Voda je poté vháněna na lopatky turbín, které pohání generátor elektrického proudu.

Sluneční energie – *pohybová energie vody – pohybová energie turbíny – pohybová energie generátoru – elektrická energie*

- Energie větru – vlivem slunečního záření je ohříván vzduch, ten proudí z oblastí s vyšším tlakem do míst s nižším tlakem, a tak vzniká vítr, který má sílu potřebnou k roztočení vrtulí větrných elektráren.

Sluneční energie – *pohybová energie větru – pohybová energie vrtule – pohybová energie generátoru – elektrická energie*

- Energie biomasy – ke svému růstu spotřebuje sluneční záření rostlinná hmota, která spolu s odpadními produkty živočichů tvoří tzv. biomasu. Z ní vyrábíme pevná, kapalná a plynná biopaliva.

Sluneční energie – *chemická energie (fotosyntéza v rostlinách) – chemická energie (biopaliva) – teplo (spalování biopaliv)*

2. **Přímé využití** – transformuje energii slunečního záření přímo na teplo nebo na elektřinu.

- Přeměna na teplo – principem přeměny na teplo je pohlcovat záření tmavým povrchem solárních kolektorů, teplota se dá ještě zvýšit například soustředěním paprsků na malou plochu. Takto získané teplo je využito například k ohřevu vody.
- Přeměna na elektřinu – využitím PN přechodu polovodičů (fotovoltaických článků) se mění energie slunečního záření na elektřinu [4].

Dále bude řešena pouze přímá přeměna slunečního záření na elektrickou energii, a to v kapitole 1.2. Nejprve ale budou podrobněji rozebrány vlastnosti samotného slunečního záření dopadajícího na zemský povrch v kapitole 1.1.3.

1.1.3. Sluneční záření

Základní veličiny: se dělí na **radiometrické**, kde jsou energetické charakteristiky elmag. záření v jednotkách SI a na **fotometrické**, kde jsou energetické vlastnosti vztaženy na citlivost oka a udávají se ve vedlejších jednotkách. Kvantem záření je **foton**, jeho energie je závislá na vlnové délce λ (s jednotkou [nm]) podle vztahu 2.

$$E_p = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2)$$

kde E_p [J] je energie fotonu, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ je Planckova konstanta a $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rychlost světla. Jako příklady udávám energie fotonů s vlnovými délkami 380 nm, 780 nm (hranice viditelného spektra) a 555 nm (maximum zrakového vjemu). Hodnoty byly spočítány podle vzorce 2 a zaokrouhleny na 2 desetinná místa. e je elementární náboj a jeho hodnota je $1,602 \cdot 10^{-19}$.

$$E_{380} = 5,23 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,27 \text{ eV}$$

$$E_{555} = 3,58 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,23 \text{ eV}$$

$$E_{780} = 2,55 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,59 \text{ eV}$$

Všechny následující veličiny jsou spektrálně nezávislé (přeintegrované přes λ) a **zářivá energie** Q má jednotku [$J = m^2 kg \cdot s^{-2}$].

Hustota zářivé energie W [$J \cdot m^{-3}$] je prostorovou parciální derivací zářivé energie podle vzorce 3.

$$W = \frac{\partial Q}{\partial V}. \quad (3)$$

Zářivý tok Φ [W] (případně *světelný tok* [lm] – lumen, kde platí, že $1 W = 683 lm$ pro $\lambda = 555 nm$) je definován jako parciální derivace výkonu (energie) podle času (vztah 4).

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t}, \quad (4)$$

kde t [s] je čas a Q [J] je zářivá energie. Pro monochromatické světlo platí $Q = E_p N_p$. Obecně se jedná o sumu energií všech dopadajících fotonů. N_p je počet fotonů.

Intenzita vyzařování M_r [$W \cdot m^{-2}$] (případně *světlení* [$lm \cdot m^{-2}$]) je dána podílem zářivého toku na danou plochu (vztah 5). Také může být vyjádřena pomocí Poyntingova vektoru a cosinem úhlu dopadajících paprsků (vztah 6)

$$M_r = \frac{\partial \Phi}{\partial S} \quad (5)$$

$$M_r = \langle |\vec{S}_P| \rangle \cos \alpha, \quad (6)$$

kde S [m^2] je plocha, na kterou dopadá záření, Poyntingův vektor \vec{S}_P [$W \cdot m^{-2}$] je dán vektorovým součinem elektrické a magnetické intenzity $\vec{S}_P = \vec{E} \times \vec{H}$. Kde \vec{E} a \vec{H} je elektrická a magnetická intenzita a $\langle \circ \rangle$ značí průměrnou hodnotu v čase. α [$^\circ$] je úhel mezi poyntingovým vektorem a normálou na povrch, na který záření dopadá.

Zářivost I [$W \cdot sr^{-1}$] (případně *svítivost* [$cd = lm \cdot sr^{-1}$] – candela) dává hodnotu zářivého toku do prostorového úhlu ω podle vzorce 7.

$$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \omega}. \quad (7)$$

Zář L [$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$] (případně *jas* [$nit = cd \cdot m^{-2}$]) je definována jako zářivost na plochu pod úhlem Θ podle vzorce 8.

$$L = \frac{I}{\partial S \cos \Theta}. \quad (8)$$

Intenzita Ozáření E_e [$W \cdot m^{-2}$] (případně *osvětlení* [$lx = lm \cdot m^{-2}$] – lux) je veličina obdobná intenzitě vyzařování. Rozdíl je v tom, že intenzita ozáření dává informaci o zářivé energii dopadající na plochu podle vzorce 9.

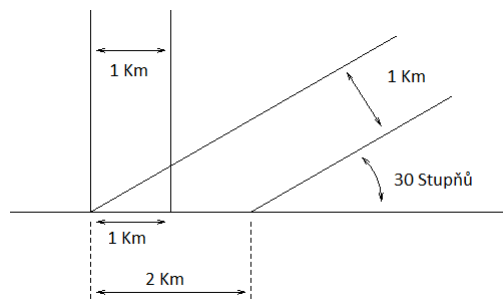
$$E_e = \frac{\partial \Phi}{\partial S}. \quad (9)$$

Ozáření H_e [$J \cdot m^{-2}$] (případně *osvit* [$lx \cdot s$]) se dá chápat jako expozice po daný čas tak, jak udává vzorec 10

$$H_e = \int_0^t E_e(t) dt, \quad (10)$$

jinými slovy je to určitý integrál intenzity ozáření od času nula do t [9].

Absorpce světla v atmosféře: ovlivňuje hustotu záření (intenzitu záření), která ze Slunce dopadá ve vzdálenosti 150 miliónů km od něj je $1367 \pm 7 W \cdot m^{-2}$. Toto číslo je nazváno **Solární konstanta**. Je v této vzdálenosti konstantní, protože světlo není ovlivněno atmosférickými vlivy. Avšak Země má atmosféru a její dráha kolem Slunce je eliptická, což jsou faktory ovlivňující tuto intenzitu záření. Záření dopadající na zemský povrch je tedy pohlcováno a rozptýlováno. Nejvyšší intenzitu má při kolmém dopadu. Na obrázku 5 je ukázáno, jak může úhel dopadu ovlivnit plochu, na kterou paprsky dopadnou (když plocha vzroste, sníží se tak intenzita).



Obrázek 5 | Ovlivnění intenzity záření úhlem dopadu paprsků, upraveno z [10].

UV záření o nízkých vlnových délkách (menších než $290 nm$) je zcela pohlceno ozónovou vrstvou a vlnové délky v rozmezí $290-320 nm$ jsou pohlceny částečně. Dále jsou v atmosféře pohlcovány vybrané části z infračerveného záření, a to oxidem uhličitým a vodou. V souvislosti s atmosférou dělíme sluneční záření na tři složky:

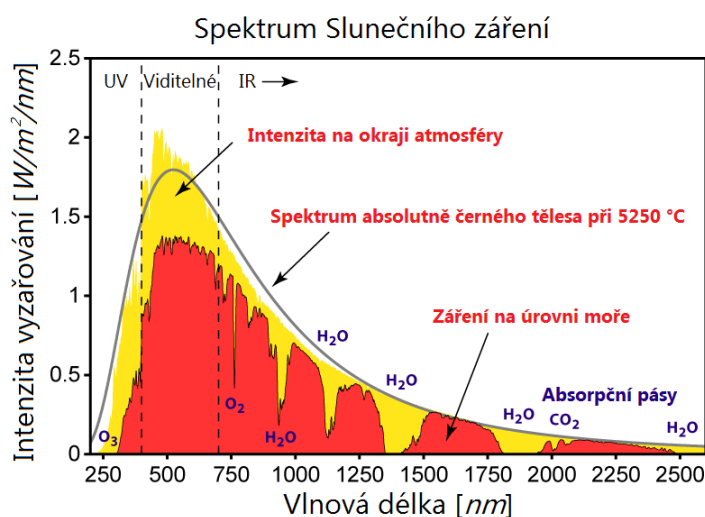
1. **Přímé** – prochází atmosférou přímo s malým prostorovým úhlem.
2. **Difúzní** – je záření rozptýlené nebo odražené nejen částicemi v atmosféře.
3. **Globální** – celkové dopadající záření na zemský povrch, součet přímého a difúzního.

Existuje ale i další dělení slunečního záření podle toho, jak prochází / neprochází atmosférou. Míra ovlivnění záření atmosférou je znázorněna na obrázku 6 a liší se případy jsou popsány značením **AM (air mass)**.

- **AM0** – v grafu žlutě vyobrazená intenzita záření neovlivněna atmosférou. Jak již bylo uvedeno na začátku kapitoly, je to záření ve vzdálenosti 150 miliónů km od Slunce a jeho intenzita je $1367 \pm 7 W \cdot m^{-2}$.
- **AM1,5** – v grafu červeně vyobrazené spektrum záření odpovídá celkovému teoretickému využitelnému výkonu. Jeho menší intenzita je způsobena průchodem atmosférou a závisí na její průhlednosti.
- **AM1** – je hodnota pro Slunce nacházející se v zenitu pod úhlem devadesáti stupňů. Takové záření urazí v atmosféře nejmenší dráhu [11].

Spektrum slunečního záření a jeho využití: jak již bylo naznačeno výše, záření přicházející ze Slunce není monochromatické. To znamená, že nevyzařuje pouze na jedné vlnové délce, ale v celém spektru, jak je vyobrazeno na obrázku 6. Tento fakt s sebou přináší výhody i nevýhody. Výhodou je, že je možné používat různá zařízení, která pracují s jiným účelem a všechna mohou fungovat na odlišných částech spektra. Příkladem jsou **solární panely** a **fotovoltaické články**. Infračervenou část spektra využívají primárně solární panely (mají funkci transformovat záření na tepelnou energii), kdežto viditelná a UV oblast s větší energií je zase využívána ve fotovoltice k přeměně záření na energii elektrickou.

Na druhou stranu, nevýhodou šířky spektra je to, že nemůžeme plně využít potenciálu jen jednoho převodníku (například fotovoltaických článků), neboť záření s vysokými vlnovými délkami již nemá dostatečnou energii na jejich chod. I přes tento fakt bychom pomocí fotovoltaických článků s účinností 15 % byli schopni pokrýt celosvětovou spotřebu energie a stačilo by k tomu pokrytí pouhého 1 % ze světových pouští. Realizace ovšem není jednoduchá z důvodů uchování a transportu získané energie. Následující kapitola 1.2 se bude zabývat právě fotovoltikou.



Obrázek 6 | Poměr intenzity záření uvnitř a mimo atmosféru, upraveno z [11].

1.2. Fotovoltaika (PV)

Fotovoltaika využívá přímého **fotovoltaického jevu** neboli přímé přeměny záření Slunce na elektrickou energii (stejnsměrný proud). K tomuto jevu dochází u konkrétních materiálů přirozeně, ovšem s rozdílnými účinnostmi, výhodami, ale i omezeními. PV jevu využívá celá řada zařízení, která jsou upravována podle místa působení, přírodních podmínek a jiných faktorů, které je mohou ovlivnit. Využití PV se ale neomezuje pouze na Zemi, ale stala se řešením pro získání energie pro družice, satelity a jiná vesmírná plavidla.

1.2.1. Historie

PV jev byl poprvé zaznamenán francouzským fyzikem A. E. Becquerelem v roce 1839, ale první PV článek byl sestaven až 44 let poté Charlesem Frittem, který použil selen a tenkou vrstvu zlata. V roce 1954 společnost Bell Laboratories experimentovala s polovodiči a objevila, že správně dopovaný křemík je velmi citlivý na světlo. První fotovoltaické články využívané na přeměnu sluneční energie měly účinnost kolem 6 %. Vzápětí v roce 1958 byl pomocí této technologie poháněn satelit Vanguard 1. V současnosti se zkoumají různé materiály a způsoby, jak nejlépe využít energii ze Slunce, důsledkem toho je dělení PV do tří generací, které budou popsány v následujících kapitolách. Do budoucna se počítá se zvýšením % výtěžnosti elektrické energie právě pomocí PV zařízení (1/20 až 1/10 celosvětové spotřeby elektřiny).

1.2.2. Fotovoltaický jev

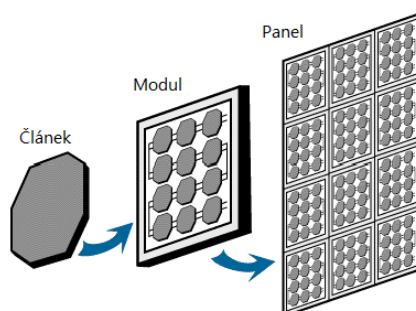
Fotoelektrický jev, na kterém je celá PV založena, byl popsán v roce 1905 Albertem Einsteinem¹. V PV jde o přeměnu energie záření (fotonů) na elektrickou energii (elektrony ve vodivostním páse). Tato přeměna je realizována vzájemným působením záření a hmoty na fotodiodách, kde dochází k pohlcení energie nesené fotonem a k následnému uvolnění elektronů, které jsou dále odváděny do akumulátoru nebo ke spotřebiči. Jednotlivým diodám se říká PV články, které jsou dále spojovány do komplexnějších uspořádání obecně se nazývajících PV panely (viz. obrázek 7).

1.2.3. Fotovoltaické články

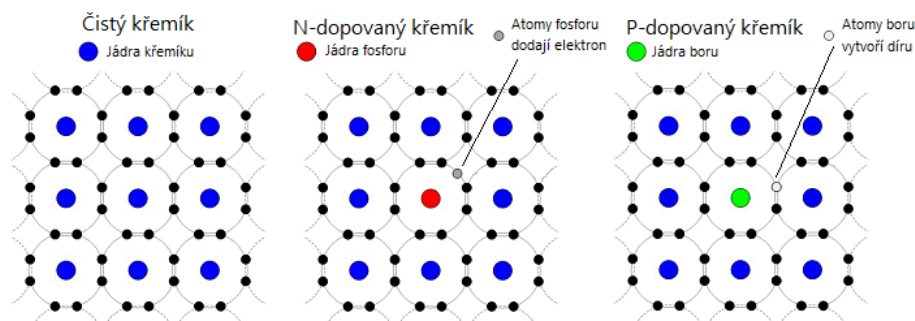
PV článek je velkoplošná polovodičová dioda, která využívá PN přechodu. Nejjednodušší provedení takového PV článku je složeno z krystalického křemíku (Si) typu P (pozitivně nabitého) a N (negativně nabitého) tak, jak je ukázáno na obrázku 8. Samotný křemík je čtyřvazný a se svými čtyřmi elektrony ve valenční vrstvě vytvoří tetraedrální uspořádání, kde s každým svým sousedem zformuje kovalentní vazbu. Křemík jako takový by tedy nebyl nabitý pozitivně ani negativně. Proto se využívá tzv. dopantů ze III. nebo V. skupiny, které mají 3 nebo 5 elektronů ve valenční

¹Za svou práci na fotoelektrickém jevu byl v roce 1921 Albert Einstein oceněn Nobelovou cenou.

vrstvě. Aby se tedy docílilo pozitivně nabitě vrstvy, užívá se dopace ze III. skupiny, například borem (B). Stejným způsobem se vytvoří i negativně nabitá vrstva s příměsí ku příkladu arsenu (As) nebo fosforu (P). Přiložením takových vrstev k sobě vznikne PN přechod, na kterém se vytvoří elektrická bariéra. Ta zabraňuje volnému průchodu elektronů z míst jejich větší koncentrace do míst s koncentrací menší. Stěžejní vlastností výše popsaného uspořádání je jednoduchý průchod elektronů z vrstvy P do N, zatímco k průchodu opačnému nedochází.

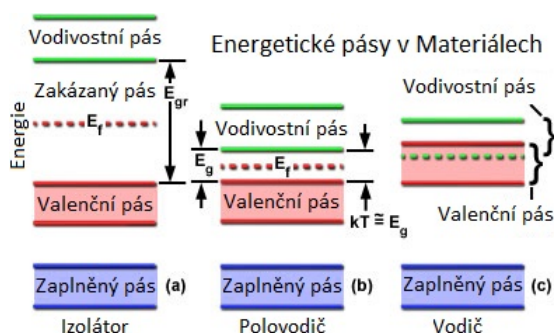


Obrázek 7 | Ukázka PV článku a jeho složení do modulu a panelu, upraveno z [12].



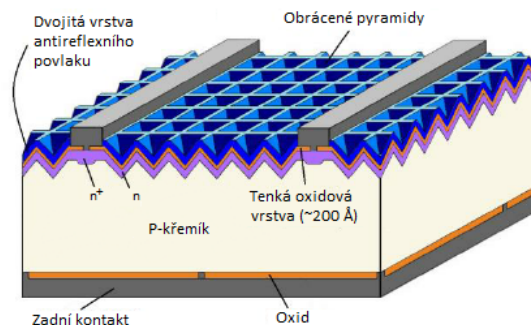
Obrázek 8 | Mřížka křemíku dopovaná na N-tyt a na P-tyt, upraveno z [13].

Záření dopadající na vrstvu typu N (pokud má dostatečnou energii: $E_r \geq E_g$, viz. kapitola 1.1.3) je schopno vyrazit elektron z valenčního pásu. Takto vyražený elektron putuje do vodivostního pásu, odkud je přepraven pomocí elektrod. Pásová struktura polovodiče je na obrázku 9. Pro křemík je šířka zakázaného pásu 1,12 eV.



Obrázek 9 | Schéma valenčního, zakázaného a vodivostního pásu pro izolátor, polovodič a vodič. E_g je minimální energie potřebná k překonání zakázaného pásu [13].

Schéma PV článku je ukázáno na obrázku 10. Záření dopadající na PV článek produkuje proud i napětí a generuje tak elektrickou energii. Pokud materiál úspěšně absorbuje záření, které excituje elektron na vyšší energetickou hladinu (vzniká pár elektron – díra), může pak takový elektron putovat externím obvodem, kde odevzdá část své energie a poté se vrátí do PV článku. Po navrácení dochází k rekombinaci páru elektron – díra a proces se může opakovat [14]. Za povšimnutí stojí zdrsňený povrch PV článku na straně, na kterou dopadá záření. Tímto opatřením je docíleno snížení odražení paprsků povrchu nežádoucím směrem a zároveň je zvýšena plocha PV článku.



Obrázek 10 | Schéma fotovoltaického článku, upraveno z [15].

1.2.4. Účinnost

V kapitole 1.2.3 byl popsán princip, na jakém fungují PV články. V dnešní době na tomto principu pracuje drtivá většina PV zařízení. V čem se ale jednotlivá zařízení liší je jejich složení, zapojení a hlavně účinnost. Jak již bylo zmíněno, historicky první PV článek pracoval s účinností 6 %. V dnešní době se účinnosti klasických PV panelů pohybují kolem 15 % (opět záleží na zařízení). Momentálně je nejvyšší dosažená účinnost **46 %**, avšak zařízení s takovými účinnostmi jsou z pravidla příliš drahá na to, aby byla komerčně dostupná. Elektrická účinnost PV článku se počítá podle vzorce 11.

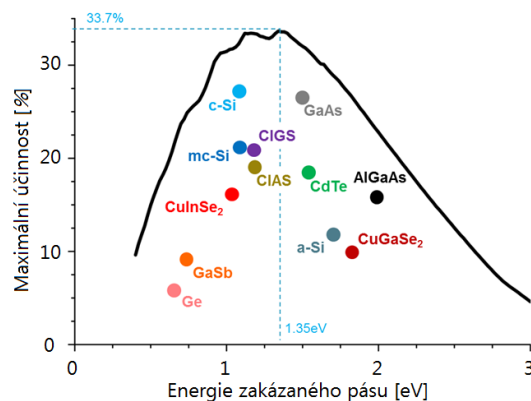
$$\eta = \frac{P_m}{\Phi \cdot A_{cell}} \cdot 100, \quad (11)$$

kde P_m je maximální výkon, kterého lze dosáhnout (měření probíhá za ideálních laboratorních podmínek), Φ je dopadající zářivý tok (podle vztahu 4) a A_{cell} je plocha kolektoru (článku). Vzorec se v podstatě shoduje se vztahem 1, jen je upraven na jeden PV článek [16].

Každým rokem se lidstvu daří sestavit PV články s vyšší účinností, avšak účinnost do nekonečna zvyšovat nelze. Alespoň ne klasickými metodami. Zatím byly popsány pouze jednoobvodové PV články. Ty se vyznačují tím, že mají právě jeden PN přechod. A právě u takových PV článků existuje teoretické omezení účinnosti nazvané Shockleyův-Queisserův limit.

1.2.5. Shockleyův-Queisserův limit (S-Q limit)

S-Q limit je vypočítaná maximální hodnota účinnosti transformace energie pomocí PV článku čítající **jediný PN přechod**. Tento limit je spočítán za předpokladu, že šířka zakázaného pásu je **1,4 eV**, byla použita hodnota slunečního spektra **AM 1,5** (viz kapitola 1.1.3) a dopadající záření bylo aproximováno pro záření černého tělesa o teplotě **6000 K**. Výsledná teoretická maximální účinnost je tedy **33,7 %** [17]. Na Obrázku 11 je zobrazeno toto maximum spolu s několika materiály a jejich šířkou zakázaného pásu a účinností.



Obrázek 11 | Graf S-Q limitu s vybranými materiály pro jeden PN přechod, upraveno z [17, 18].

Na začátku této kapitoly je řečeno, že maximální dosažená účinnost je 46 %, ale S-Q limit je 33,7 %. To proto, že S-Q limit platí pouze pro PV články vyznačující se právě jedním PN přechodem. Tyto PV články jsou z tzv. 1. a 2. generace fotovoltaiky. Zvýšení účinnosti řeší 3. generace, která nevyužívá klasický PN přechod. Rozdíly a PV články různých generací jsou popsány v následující kapitole.

1.2.6. 3 generace PV

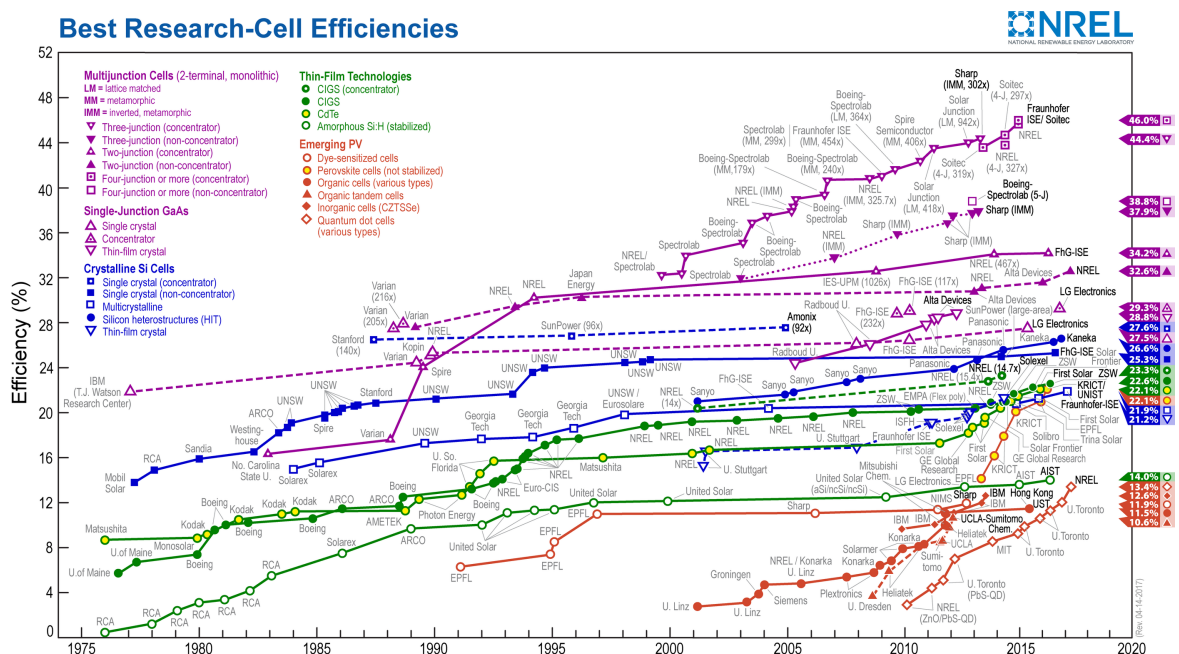
Vývoj PV struktur a jejich účinnosti jsou zobrazeny v grafu na obrázku 12. Jednotlivé generace jsou popsány níže.

- **1. generace:** zahrnuje především křemíkové ("plátkové") struktury PV článků s jedním PN přechodem tak, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. První generace představuje dominantní skupinu PV článků na trhu, která činí přibližně 86 % výrobků, neboť jejich výhodami jsou spolehlivost a trvanlivost.

Mezi tyto struktury patří **monokrystalický křemík** se svou maximální účinností 27,6 % (koncentrovaná PV) a 25 % (nekoncentrovaná PV). Další křemíkovou strukturou je **polykrystalický křemík** s účinností 21,3 %, dále **křemíkové heterostruktury** (25,6 %) a nakonec **tenkovrstvé krystaly** s nejnižší účinností mezi strukturami v první generaci čítající 21,2 %.

- **2. generace:** je na rozdíl od první připravena jako tenká vrstva (v řádu μm) nanesená na polovodičovém podkladu. Tyto vrstvy jsou až 1000 \times tenčí než bulkové struktury z první generace. To s sebou nese několik vlastností. Výhodou tenkých vrstev je, že mohou být využity na různých površích a v různých situacích. Další výhodou je menší množství použitého materiálu k výrobě takových PV článků a jsou tudíž levnější. Naproti tomu celkově menší účinnost oproti bulkovým strukturám a komplikovaná příprava jsou jejich hlavními nevýhodami. Mezi polovodičové materiály používané k výrobě tenkovrstvých PV článků patří hlavně Cu, In, Ga a Se, které jsou obecně známy pod označením **CIGS struktury**.

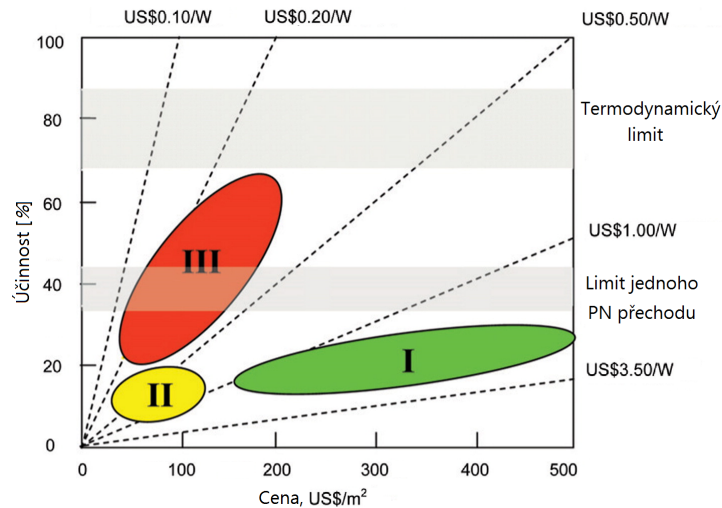
Z konkrétních zástupců tedy již zmíněná **CIGS struktura** dosahuje maximální účinnosti 23,3 % (koncentrovaná PV) a 22,3 % (nekoncentrovaná PV). Poté sloučenina **CdTe** má nižší účinnost 22,1 % a nakonec **amorfní Si:H** dosahuje nejnižší 13,6 % účinnosti z druhé generace. [19]



Obrázek 12

Srovnání vývoje a momentálních maxim účinností různých moderních technologií v PV. 1. gen. – modrá, 2. gen. – zelená, 3. gen. – fialová a oranžová. Z důvodu své komplexnosti byl obrázek ponechán v anglickém jazyce, převzato z [20].

- **3. generace:** na rozdíl od první a druhé nevyužívá jen klasického PN přechodu k oddělení zářením generovaných nosičů náboje (využívá ale například tenkých vrstev stejně, jako je tomu u druhé generace). Do třetí generace PV patří například **perovskitové solární články**, **tandemové články** složené z více vrstev, a tedy i s více než jedním PN přechodem, **solární články z kvantových teček**, **fotoelektrochemické články** a jiné. Cílem třetí generace PV je mimo jiné zvýšení účinnosti článků a snížení nákladů na jejich výrobu, a tudíž i zvýšení přístupnosti energie získané ze Slunce. Dalším cílem je nalézt alternativní materiály pro PV účely [20]. Na obrázku 13 je ukázáno srovnání jednotlivých generací PV (závislost ceny na účinnosti).



Obrázek 13 | Porovnání ceny a účinnosti tří generací PV. 1. gen. – zelená, 2. gen. – žlutá, 3. gen. – červená, upraveno z [21].

Co se účinnosti týče, tak ze 3. generace stojí za zmínku určitě **multivrstvé PV články**, jejichž účinnost dosahuje rekordních **46 %** (4 a více vrstev), dále **kvantové tečky (11,3 %)**, různé **organické články (11,5 %)** a perspektivní **perovskitové PV články** s nejrychlejším nárůstem účinnosti a momentální hodnotou účinnosti **22,1 %**.

33,7 % je S-Q limit maximální účinnosti PV zařízení využívající právě jeden PN přechod. Nyní bude podrobněji popsáno, k jakým ztrátám energie při transformaci dochází. Pokud foton dopadající na PV článek 1. generace nemá energii přesně odpovídající energii zakázaného pásu ($E_p \neq E_g$), mohou nastat dva případy, které způsobí ztráty energie. První z nich je **neabsorbování fotonu**, který má nižší energii, než jaká je potřebná k překonání zakázaného pásu ($E_p < E_g$). Druhá z možností je absorpce fotonu s větší energií než energie zakázaného pásu ($E_p > E_g$). Poté dochází k **termalizaci**, při které elektron předá energii mřížce. K dalším ztrátám dojde při **průchodu nosičů náboje elektrickým obvodem**. Nakonec po průchodu obvodem dochází k **rekombinaci páru elektron – díra** (vzniklých absorpcí záření) a s ní spojené emisi záření. Poslední zmíněný jev je nevyhnutelný a teoretické termodynamické maximum účinnosti transformace je uváděno jako **67-87 %**.

To, čím se zabývá 3. generace PV, jsou mimo jiné způsoby, jak překonat S-Q limit a co nejvíce se přiblížit limitu termodynamickému, ale také hledá alternativní způsoby přeměny energie. V současné době se vydává třemi směry.

- Zvýšení počtu energetických úrovní potřebných k excitaci elektronů, jinými slovy použít více materiálů s různými energiemi zakázaného pásu.
- Snaha excitovat dva nebo více nosičů náboje jedním fotonem s vysokou energií *nebo* k překonání zakázaného pásu využít více nízkoenergetických fotonů.
- Poslední přístup se snaží zachytit nosič náboje předtím, než dojde k jeho relaxaci na mřížce (termalizaci).

Z uvedených přístupů se prozatím povedlo překonat S-Q limit pouze pomocí přidání více energetických hladin, proto bude tato úspěšná metoda podrobněji popsána v následující kapitole. Kromě **multivrstvého systému** bude také věnována pozornost **perovskitovým PV článkům**,

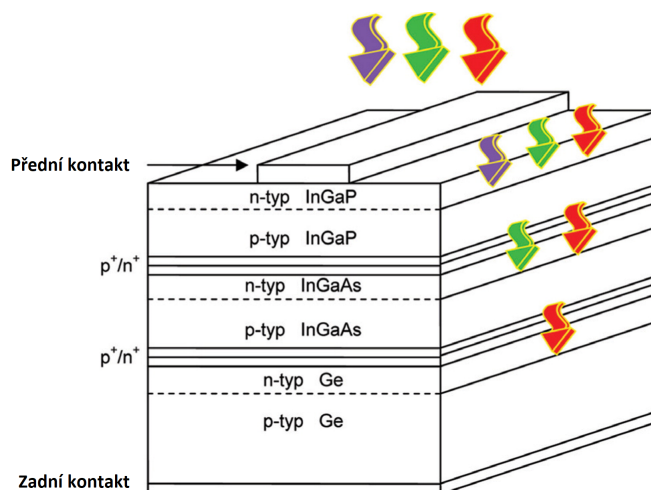
neboť ty se staly jednou z nejperspektivnějších a nejrychleji se vyvíjející (co se účinnosti týče) technologií v oblasti PV (viz. obrázek 12) [21].

1.2.7. Multivrstvé PV články

Multivrstvé PV články (**tandemové články**) využívají prvního přístupu k překonání S-Q limitu. Skládají se z tenkých polovodičových vrstev nanesených na sobě s podmínkou, že dopadající paprsky nejprve excitují elektrony ve vrstvě se zakázaným pásem s nejvyšší energií. Dále paprsky, které neměly dostatečnou energii na excitaci v první vrstvě, procházejí do vrstvy druhé, kde zase část dopadajícího spektra excituje elektrony z druhého materiálu. Ty, které ani zde neměly dostatečnou energii, prostupují dále. Tento proces se opakuje tolikrát, kolik vrstev PV článek obsahuje. Na obrázku 14 je vyobrazeno schéma tandemového PV článku. Propojení takových vrstev může být realizováno dvěma způsoby.

1. **Mechanicky naskládané:** kdy se s každou vrstvou zachází jako se samostatným článkem. To znamená jeden vstup a výstup pro každou vrstvu zvlášť.
2. **V sérii:** kde jsou všechny vrstvy propojeny sériově. Celý článek má potom jeden vstup a jeden výstup.

Pro zafixované spektrum dávají oba typy stejnou účinnost (například použití ve vesmíru), avšak v proměnlivém spektru v atmosféře má mechanický přístup lepší flexibilitu. Aby bylo docíleno nejvyšší účinnosti u tandemového PV článku, musí být brán zřetel na šířku zakázaného pásu, tloušťku a dopování vrstev tak, aby dopadající spektrum záření bylo co nejlépe rozděleno mezi jednotlivé vrstvy [21].

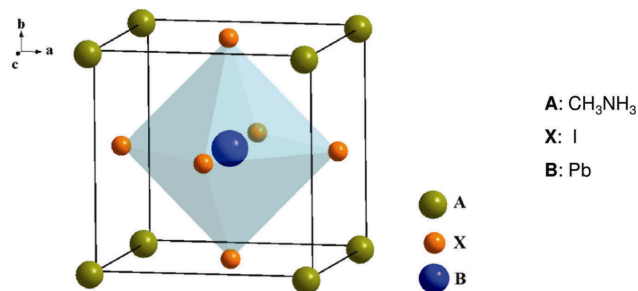


Obrázek 14 | Zjednodušené schéma tandemového článku se třemi vrstvami. Šířka zakázaného pásu klesá směrem od dopadajícího záření, upraveno z [21].

1.2.8. Perovskitové PV články

Jsou založeny na sloučenině perovskitové struktury (viz obrázek 15). Tato sloučenina byla poprvé použita jako barvivo pohlcující světlo dopadající na článek. Naměřila se účinnost přibližně 3,8 % a ještě ke všemu perovskit nebyl v elektrolytu (ve kterém působil jako barvivo) stabilní. Avšak tento experiment jen odstartoval výzkum ohledně perovskitů a za 7 let svou účinnost zvýšil na 22,1 %. To je zatím nejrychlejší pokrok v technologii PV článků.

Hlavní výhodou perovskitu je do budoucna předpokládané zvýšení účinnosti a velmi nízká výrobní cena. Nevýhodou je na druhou stranu jejich velmi nízká stabilita na vzduchu. Perovskitové PV články tedy v atmosférických podmínkách rychle degradují. I přesto některé společnosti odhadovaly, že se perovskitové PV moduly dostanou na trh už v roce 2017. Více o perovskitech například v [22, 23].



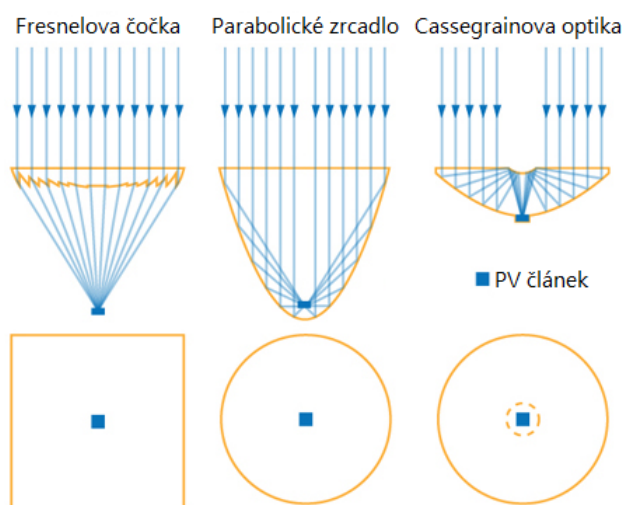
Obrázek 15 | Krystalová struktura organicko – neorganického perovskitového halidu $CH_3NH_3PbI_3$, upraveno z [22].

1.2.9. Koncentrovaná fotovoltaika (CPV)

V minulých kapitolách je nastíněno, jakými způsoby se dají zvýšit účinnosti PV zařízení díky zlepšování PV článků. Avšak metody přípravy vysoce účinných článků (tandemů) jsou velmi náročné a také drahé. Pokud bychom měli takovými PV články pokrýt velkou plochu, bylo by to vysoce nákladné. Jako řešení se nabízí využití optického zařízení ke koncentraci paprsků z velké plochy pomocí čoček nebo zrcadel do ohniska (kde se nachází onen drahý a vysoce účinný PV článek) osvětleného silou i několika set Sluncí. To není nic jiného než poměr mezi plochami zrcadel/čoček a PV článků. Různé způsoby realizace jsou ukázány na obrázku 16 a říká se jim fotovoltaické koncentrátory neboli koncentrovaná fotovoltaika (CPV). Nyní budou shrnuty výhody a nevýhody takových zařízení.

- **Výhody:**

1. Velmi malá plocha (v porovnání s velikostí celého zařízení) drahého a složitě připravovaného, avšak vysoce účinného PV článku. Oproti tomu levná zrcadla, popřípadě čočky, které mají za úkol co nejpřesněji koncentrovat dopadající záření z velké plochy do ohniska. Společně mají tyto dva parametry potenciál snížit cenu elektrické energie ze Slunce a tím zvýšit její dostupnost, ale také zvýšit množství energie, kterou dokáže zařízení získat pokrytím větší plochy. Mimo jiné, tyto PV články by kvůli jejich ceně nebylo možné jinak rozumně využít.
2. To, že se právě tandemy a jiné vysokovýkonné PV články hodí pro CPV, je způsobeno tím, že s narůstajícím počtem vrstev tandemového článku se zvyšuje poměr napětí ku proudu. Dojde tedy ke snížení odporových ztrát při velkých hodnotách hustoty proudu procházejících obvodem CPV.



Obrázek 16 | Různá schémata možných realizací CPV pomocí čoček a zrcadel, upraveno z [24].

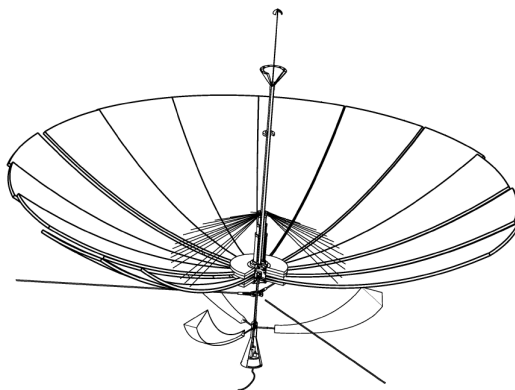
- **Nevýhody:**

1. Pro svůj chod potřebují CPV zařízení přímý svit dopadajících paprsků, aby bylo zajištěno maximální efektivity. Některá zařízení proto obsahují čidla na sledování Slunce a jsou přizpůsobena tomu, aby se k němu mohla směřovat a zajistit tak co nejvyšší účinnost.
2. CPV také oproti klasickým PV článkům nepracují při zatažené obloze, proto se pro taková zařízení hledají oblasti s co největším počtem solárních dnů za rok. Solární den je termín pro takový den, kdy slunečnímu záření nebrání oblačnost v dopadu na zemský povrch.
3. CPV bývá velmi komplexní systém, který je mnohem méně modulární než klasické PV články. Je tedy snaha budovat zařízení velkého rozměru například na ostrovech, kde je ověřená malá roční oblačnost [21].

Metodu CPV využívá zařízení **SkyFlower[®]**, které bude podrobněji popsáno v kapitole 1.3. Budou popsány výhody a nevýhody zařízení, ale také způsoby, jakými jsou vyřešeny právě nevýhody popsané v této kapitole, které souvisí se zařízeními využívajícími CPV. Ve SkyFlower[®] je použit vysoce výkonný křemíkový článek [25]. Ty spolu s dalšími III-V multivrstvými články nyní dosahují až 40 % účinnosti pod koncentrovaným světlem.

1.3. SkyFlower[®]

SkyFlower[®] je zařízení na výrobu elektrické energie fungující na principu optického koncentrátoru (viz. ilustrace na obrázku 17) a skládá se z několika stěžejních částí. Jednou z nich je koncentrátor parabolického typu, který koncentruje paprsky ze Slunce do ohniska. V ohnisku se nachází sada PV článků specificky rozmístěných po obvodu válce. Válec je mimo jiné vybaven turbínami, které vhání okolní vzduch dovnitř válce a starají se tak o chlazení PV článků. Dále je zařízení vybaveno servo motory a čidly pro detekci záření, díky nimž je schopno sledovat Slunce po obloze a docílit tak maximální efektivity. Celé zařízení drží pohromadě odlehčené karbonové tyče, ohnuté do požadovaných tvarů včetně toho, aby bylo docíleno postačující pevnosti. Níže v kapitole jsou uvedeny hlavní výhody a nevýhody zařízení.

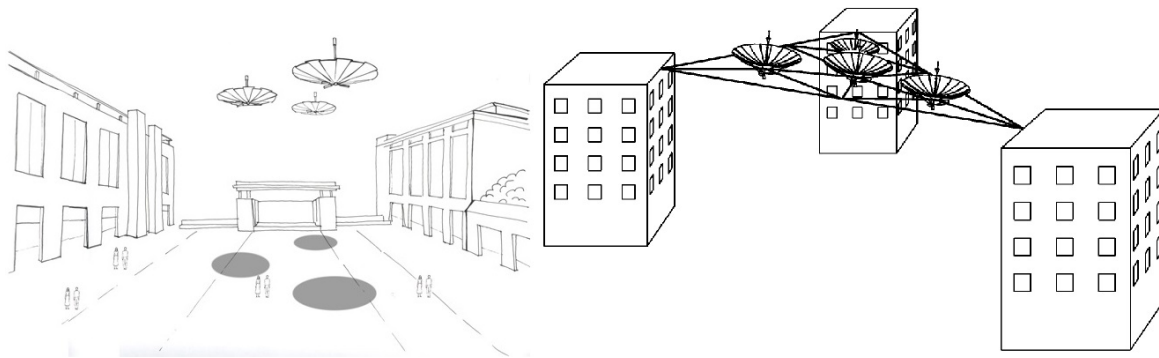


Obrázek 17 | Ilustrační obrázek zařízení SkyFlower[®], upraveno z [26].

V této diplomové práci je klíčovou částí zařízení právě parabolický koncentrátor. Nejedná se ovšem o klasické zrcadlo, nýbrž o zrcadlo sestavené ze segmentů vyrobených z odrazných fólií (ty budou podrobněji diskutovány v kapitole 1.4.4).

- **Výhody:**

- **Hmotnost** celého zařízení je díky koncentrátoru složeného z velmi lehkých fólií vypočítána na pouhých **3,5 kg** (momentálně **6 kg** prototyp). Díky tomu je možné SkyFlower[®] umístit na místa, která jsou klasickým CPV zařízením nepřístupná (například zavěsit na lana mezi domy).
- Efektivní **plocha koncentrátoru je 21,192 m²** a průmětová plocha je přibližně **16.557 m²**, což (společně možnostmi upevnění) ze SkyFlower[®] činí skvělý nástroj pro zastíňování potřebných oblastí. Ilustrace na obrázku 18.



Obrázek 18 | Ilustrační obrázky upevnění SkyFlower[®], kdy kromě výroby elektřiny také zastiňuje dané oblasti, převzato z [26, 27].

- SkyFlower[®] je také vybaveno zařízením pro **dvousé sledování Slunce** s maximálním vychýlením až 60° , čímž je v daném rozmezí úhlů docíleno maximální efektivity a zastínění.
 - Další výhodou související s volbou fólií je **schopnost se uzavřít**. Zařízení je schopno určit, kdy již není výhodné být aktivní (například, když jsou již sluneční paprsky pod vyšším úhlem, než je maximální vychýlení) a za účelem ochrany odrazné plochy se "sbalí". Stejně ke sbalení dojde při nepříznivých podmínkách. Takle vlastnost prodlužuje celkovou životnost SkyFlower[®].
 - S tím také souvisí **vysoká odolnost** vůči dešti, větru (průduchy mezi segmenty koncentrátoru), písku (sbalením a rozbalením se zařízení zbaví většiny nanesenin), prachu, hmyzu atd.
 - SkyFlower[®] se dokáže teoreticky dostat až na výkon **5 kW za den**. Samozřejmě se musí vzít v potaz geografické podmínky v dané oblasti, oblačnost, počet solárních dnů a jiné vlivy. Výkon současných prototypů se pohybuje v rozmezí 3-4 kW za den. To je dáno ne zcela ideálními podmínkami a technologickou dokonalostí, se kterou byl maximální výkon vypočten.
 - Použité PV články jsou na bázi c-Si (crystalline silicon) a dosahují **účinnosti 28 %** [25].
 - V porovnání s konkurenčními zařízeními SkyFlower[®] vyniká svou **rychlou instalací** a nenáročnou údržbou.
 - A na závěr, zařízení je zcela **recyklovatelné** na konci svého životního cyklu (odhadovaného na 20 let).
- **Nevýhody:**
 - Hlavní nevýhodou je riziko poškození fólií, které mají nižší mechanickou odolnost než klasická zrcadla. Toto riziko se mění v závislosti na oblasti, kde je zařízení instalováno. Je zřejmé, že v některých oblastech bude riziko větší (pouštní oblasti), než v oblastech s příznivými podmínkami.
 - Jelikož se jedná o CPV, je jasné, že pro správné fungování je nutný přímý sluneční svit. To souvisí s počtem solárních dnů v oblasti instalace. SkyFlower[®] proto není uzpůsobeno pro provoz v libovolných oblastech, ale je nutné promyslet, zdali se v daných geografických podmínkách investice vyplatí.

K sestavení SkyFlower[®] bylo zapotřebí znalosti mnoha oborů techniky (optika, nanotechnologie, fotovoltika, termodynamika, mechanika, elektronika aj.). Koncentrující část skládající se z odrazných fólií s tvarem paraboly spadá pod **optiku**. Cíl je zjistit, která odrazná fólie se pro SkyFlower[®] nejvíce hodí a vypočítat účinnost celého zařízení. Veškeré informace o SkyFlower[®] byly zjištěny z [27] a při konzultacích se zástupci firmy Or Hama Energy[®] s.r.o.

1.4. Optická část zařízení

Předmětem experimentální části této diplomové práce je podrobit testům několik druhů odrazných fólií a přijít na to, jaké budou mít vlastnosti vzhledem k potřebám zařízení **SkyFlower**[®]. Odrazné fólie zahrnují hned několik vědních disciplín (optika, nanotechnologie aj.). Důvodem, proč byly vybrány právě fólie, aby zastaly funkci odrazných zrcadel se dá částečně vyčíst již z předchozí kapitoly 1.3, podrobněji bude tato problematika řešena v kapitole 1.4.4. V následující kapitole 1.4.1 budou obecně popsány tenké vrstvy a jejich příprava.

1.4.1. Tenké vrstvy (TV)

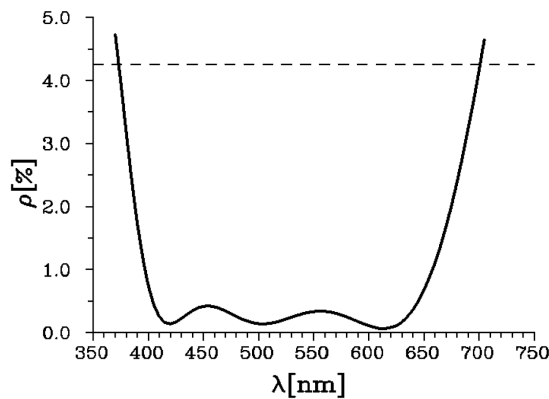
Pojmem TV se rozumí jakákoli vrstva s tloušťkou v rozmezí od několika *nm* až po desítky *μm*. Většinou je taková vrstva nanosená na substrátu za účelem jeho povrchové úpravy a tedy zlepšení optických, mechanických a jiných vlastností. Tyto chemické a fyzikální vlastnosti jsou většinou odlišné od objemových analogů stejných materiálů. Což otevírá nové možnosti výzkumu materiálů a jejich odlišných vlastností v důsledku **povrchových a kvantových jevů** projevujících se při zmenšování k hranici nanometrů. Dalším důležitým parametrem je **nerovnováha depozičních procesů**, která také ovlivní výsledné vlastnosti TV. Se snahou miniaturizovat se v současnosti setkáme téměř ve všech oblastech lidské činnosti a užívání TV je tudíž naprosto nezbytné. Hlavní výhodou miniaturizace je snížení množství potřebného materiálu k výrobě daného produktu. Z toho přímo vyplývají další výhody. A sice snížení celkové hmotnosti, finančních nákladů a celkového rozměru výrobku. Zde je uvedeno několik příkladů aplikací TV v současném průmyslu.

- **Elektrotechnika a strojírenství** – jsou snad nejnepřehlednějším příkladem miniaturizace a využití TV. V současné době se zde jedná o neodmyslitelné součástky moderní techniky jako jsou například integrované obvody, MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*), popřípadě nově se rozvíjející NEMS (*NanoElectroMechanical Systems*), různé vodivé, ale transparentní povlaky a mnoho dalších.
- **Energetika** – využití v energetice již bylo nakousnuto v minulých kapitolách. Jedná se o speciální vrstvy (reflexní, antireflexní, fotovoltaické) určené k použití například u solárních panelů, baterií nebo u PV článků.
- **Mechanika** – v oblasti mechaniky jde dominantně o zkvalitnění povrchů. Toho může být docíleno různými způsoby v závislosti na požadovaných vlastnostech. U spousty vrstev je nutno přijít s co nejlepšími výsledky odolnosti vrstvy vůči opotřebení (případně korozi). Toho lze dosáhnout díky zlepšení parametrů jako jsou tvrdost, houževnatost, chemická a tepelná stálost a jiné. V medicínských nebo jiných aplikacích může být žádoucí dosáhnout biokompatibility, kdy proti cizorodému tělesu s takovou vrstvou nebude zasahovat ochranný mechanismus živého organismu.
- **Optika** – je nejnápadnějším odvětvím využití TV, jelikož se často jedná o jevy viditelné okem. K optickým jevům vzniklým užitím TV patří reflexe, antireflexe, difrakce, interference a jiné. K reálným aplikacím se využívají například pokrytí čoček antireflexní vrstvou, k výrobě různých filtrů, k nanesení reflexní vrstvy na odrazná zrcadla a k mnoha dalším aplikacím. Optické vlastnosti TV vrstev a jejich užití je popsáno v následujícím odstavci.

1.4.2. Tenké optické vrstvy

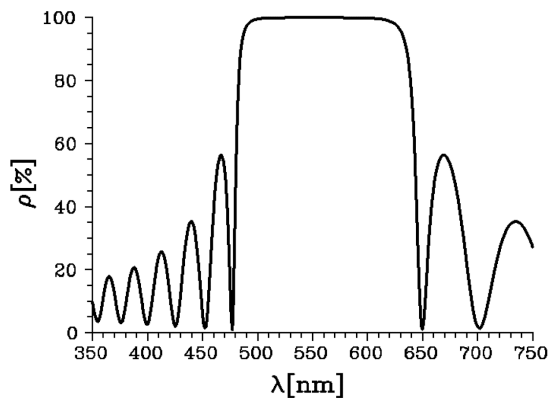
Tenkými optickými vrstvami se obvykle označují dielektrické, kovové, polovodičové (nebo kombinace) materiály nanosené jako TV na vhodném substrátu. Tloušťka takových vrstev se často udává v jednotkách násobku vlnové délky, pro kterou je vrstva určena (typickým příkladem optické tloušťky je $\lambda/4$) a jsou převážně v jednotkách nanometrů. Vrstvy mohou mít různou strukturu podle požadovaných vlastností. Příkladem mohou být třeba homogenní / nehomogenní nebo izotropní / anizotropní nebo struktury disponující magnetickými vlastnostmi. Je dobré si povšimnout, že vlastnosti ovlivní i počet nanesených vrstev, ten se pohybuje od jedné až do několika desítek. Při aplikacích optických TV se klade důraz vždy na jiné parametry v závislosti na podmínkách, při kterých budou TV užívány.

Antireflexní vrstvy: mají za úkol (jak již název vypovídá) snížit odraznost substrátu. Klasicky se takové omezení nerealizuje v celém průběhu spektra, ale pouze na omezené oblasti vlnových délek, případně pro konkrétní vlnovou délku. Díky takovým vrstvám lze zvýšit světelnost fotografických objektivů a potlačit šum v obraze. Další aplikací je snížení reflexe optických prvků v laserových zařízeních. To nabude velkého významu u vysokých intenzit záření. Na obrázku 19 je vyobrazen průběh antireflexních vrstev.



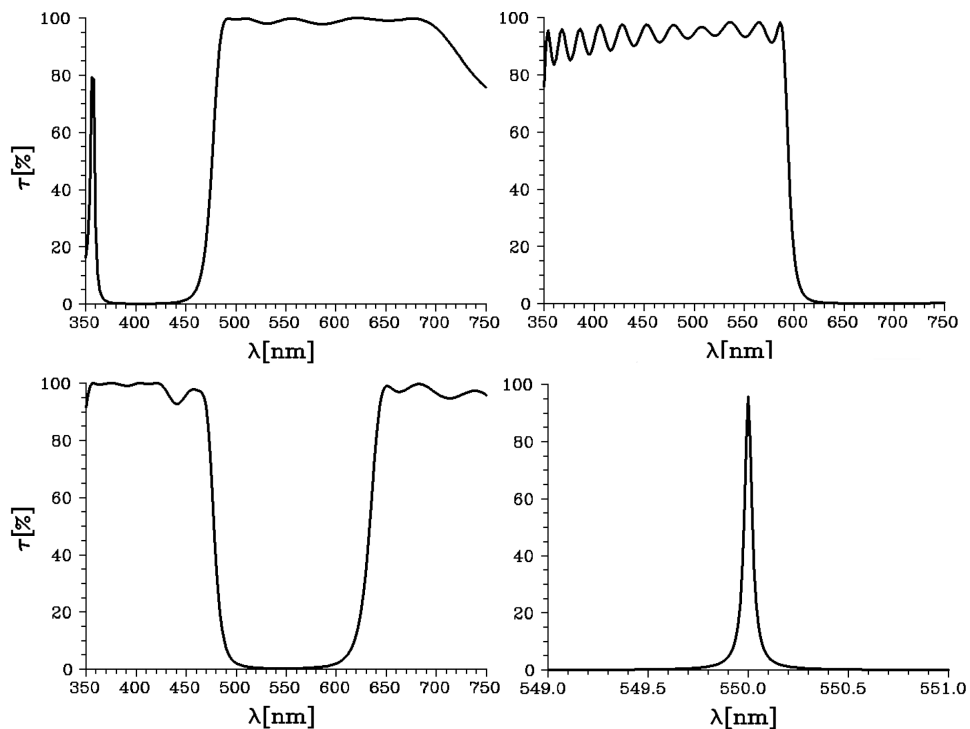
Obrázek 19 | Příklad průběhu odraznosti ρ antireflexních vrstev v závislosti na vlnové délce λ . Čárkovane je znázorněna odraznost substrátu a plnou čarou je znázorněna odraznost celé soustavy, převzato z [28].

Vysoce reflexní vrstvy: naproti antireflexním vrstvám stojí vysoce odrazné vrstvy, jejichž účelem je vytvořit zrcadla s co nejvyšší odrazností nebo nízkou absorpcí. Zároveň je žádoucí, aby zrcadla byla odolná vůči ozáření intenzivními světelnými svazky (obvykle v úzkém spektru), což najde své využití u laserů. Míra odraznosti, absorpce a odolnosti dosažené zrcadly vyrobenými z dielektrických TV značně převyšuje hodnoty dosažené u klasických kovových zrcadel. Tenkovrstvá zrcadla dokáží odolat ozáření v rozmezí $0,3-4,7 \text{ MJ/m}^2$, kdežto Al zrcadlo vydrží ozáření přibližně 10 kJ/m^2 . Obrázek 20 znázorňuje průběh takové soustavy TV.



Obrázek 20 | Příklad průběhu odraznosti ρ periodických vysoko reflexních dielektrických vrstev (zrcadla) v závislosti na vlnové délce λ , převzato z [28].

Filtry: využití optických filtrů je například v televizní nebo fotografické technice. Hlavní výhodou dielektrických interferenčních filtrů oproti barvivovým je jejich vyšší účinnost filtrace barev. Interferenčními filtry se myslí takové optické filtry, které dokáží propouštět pouze infračervené nebo ultrafialové záření o dané vlnové délce. Jejich princip je založen na odstranění nežádoucího záření pomocí destruktivní interference. Mezi filtry rozeznáváme horní a dolní propust, pásmovou zádrž a úzkopásmové filtry, které se vyznačují tím, že propouští jen velmi malou část spektra. Často jsou realizovány na principu Fabryho-Perotova filtru a užívají se ve spektroskopích. Šířka i poloha propustnosti je volitelná. Na obrázku 21 jsou ukázky různých typů filtrů [28].



Obrázek 21 | Příklad průběhu transmise τ v závislosti na vlnové délce λ . Postupně: horní propust, dolní propust, pásmová zadrž a úzkopásmový filtr, převzato z [28].

1.4.3. Příprava tenkých vrstev

Příprava TV neboli nanášení vrstvy na substrát nebo na dříve nanesenou vrstvu se nazývá **depozice**. Jedním z nejpodstatnějších parametrů depozice je tloušťka vrstvy. Ta se pohybuje v rozmezí několika nm až po řády μm . Většina depozičních technik dokáže vrstvy nanášet s přesností desítek nm , avšak existují i metody schopné nanášet jednoatomové vrstvy. Depoziční metody se primárně dělí podle způsobu nanášení na **chemickou** a **fyzikální**.

Chemická depozice: je typická svým tekutým prekurzorem, ve kterém dochází k chemickým změnám na povrchu pevné látky. Důsledkem je vznik pevné vrstvy. Tekutina obklopuje daný pevný objekt, proto mohou vrstvy vznikat na jakémkoli povrchu. U chemické přípravy jen velice málo záleží na směru, kudy se částice vydají z důvodu kapalného prostředí. Depozici chemickou cestou můžeme dále rozdělit na několik metod podle fáze prekurzoru. Zde je uvedeno pouze několik příkladů.

- **Sol-gel** – neboli solution-gel metoda využívá kapalnou prekurzor. Tím je nejčastěji prášek organicko-kovových částic v organickém solventu. Jedná se o jednoduchou nenáročnou metodu, která vykazuje přesné výsledky v oblasti krystalických fází. Název sol-gel je odvozen od průběhu metody, kdy se ze solu (roztoku) postupně stává gelu podobný dvoufázový systém.
- **Spin coating** – je metoda, která používá kapalnou nebo sol-gel prekurzor. Ten je nanášen na hladký plochý substrát, který rotuje s definovatelnou frekvencí. Díky tomu se dá ovlivnit, jak rychle se bude po substrátu šířit nanášená kapalina. Na tom přímo závisí tloušťka vrstvy a její homogenita. Nanášení více vrstev za účelem zvýšení tloušťky je také možné. Používají se i různé další parametry jako je například tepelné opracování při depozici, což ovlivní krystalovou strukturu. Podobnou metodou je **dip coating**, která vychází ze stejných podmínek tekutého nebo sol-gelového prekurzoru, avšak substrát je v něm zcela ponořen a následně vytahován za definovatelných podmínek (rychlost, sklon aj.).
- **Chemická depozice z plynné fáze (CVD, Chemical vapour deposition)** – využívá na rozdíl od výše uvedených metod plynný prekurzor. Často jde o halidy nebo hydridy deponovaného prvku. Komerční techniky užívají převážně velmi nízké tlaky plynného prekurzoru.

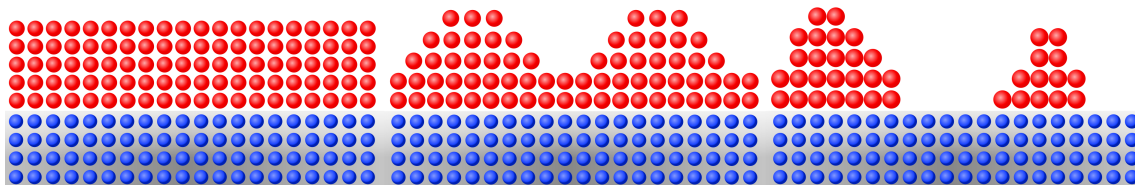
Metoda CVD se dělí na několik dalších dílčích metod, které se od sebe liší použitými parametry. MOCVD (*metal-oxide CVD*) používá jako prekurzor organicko-kovový plyn. PECVD (*plasma enhanced CVD*) užívá jako prekurzor ionizovanou páru nebo plasmu. PECVD jako jediná z metod spoléhá na elektromagnetické vztahy (elektrický proud, mikrovlnou excitaci) k produkci plasmy. Ostatní fungují na bázi chemických reakcí.

Fyzikální depozice: pracuje s fyzikálními (mechanickými, elektromechanickými nebo termodynamickými) procesy na přípravu TV. Oproti chemickým metodám, fyzikální metody vyžadují vakuové prostředí, aby bylo docíleno správné a žádoucí funkčnosti. Je to způsobeno vysokými energiemi (ty jsou potřebné k formování důležitých průmyslových materiálů), kterých chemickou depozicí nedosáhneme. Obecně platí, že při depozici fyzikální cestou je materiál umístěn do vysoce energetického, entropického prostředí, ze kterého jsou částice násilně vyráženy a následně dopadají na chladnější povrch substrátu, kde předají svou energii a usazují se. Kvůli vakuu částice obvykle po své dráze cestují přímo a dá se tím pádem prohlásit, že fyzikální metody jsou značně závislé na tomto směru.

- **Napařování** (*evaporation*) – je metodou patřící do skupiny fyzikální plynné depozice (*PVD – physical vapour deposition*). Používá oporové topné těleso k zahřívání materiálu. Zásadní je použití vysokého vakuu, aby vypařené částice správně dorazily na substrát, ale také aby na své cestě k němu nereagovaly nebo se nesrážely s jinými prvky. Vakuum také snižuje nečistoty v podobě nežádoucích prvků. K vyrážení částic z prekurzoru se užívá například proudu elektronů. Mluvíme potom o fyzikální plynné depozici pomocí elektronového paprsku (*EB-PVD – electron-beam PVD*).
- **Epitaxe molekulárním paprskem** (*MBE – molecular beam epitaxy*) – je další podobnou metodou využívající pomalého toku částic, kterou lze zacílit na substrát a nanášet tak po jednoatomových vrstvách. Tímto způsobem jsou nanášeny sloučeniny jako například GaAs. Při nanášení se střídají vrstvy galia a arsenu. Metodu lze označit za kombinaci jak fyzikální, tak chemické depozice, protože materiál může být generován oběma způsoby.
- **Naprašování** (*sputtering*) – je typické používáním plasmu při nanášení vrstev (u většiny případů jde o vzácné plyny, obvykle argon). Proud plasmu míří na tzv. terč (*target*), kde se nachází nanášený materiál. Ten je rychlým proudem bombardován a jeho atomy jsou vyráženy z mřížky (za předpokladu, že jejich vazebná energie je menší než kinetická energie ionizovaného plynu, tedy plazmy). Velikost takové energie se udává $\gg 1$ eV. Poté, co atomy opustí mřížku prekurzoru, putují skrze vakuum na substrát, kde tvoří souvislé vrstvy. Směr bombardujících iontů se dá různými způsoby ovlivnit. Typickým příkladem je magnetronové naprašování, kdy je pod terčem aktivní elektromagnet, který přitahuje okolní ionty a zužuje tak oblast působení plasmu.
- **Laserová ablace** – je založená na mechanismu, kdy na prekurzor svítí pulzní fokusovaný laser. V místě osvětlení je prekurzor vypařován do vakuové komory v podobě plazmatu. Už v průběhu své cesty se většinou změní na plyn. Nakonec dopadá na substrát, kde je formována vzniklá vrstva.

Rovnovážné růstové modely: existuje několik rovnovážných růstových modelů, které dostaly svá jména po vědcích, kteří je jako první popsali. Nejnázornější popis je pomocí obrázku, viz 22.

- **Frank-van-der-Merwe** – neboli vrstva-po-vrstvě (*layer-by-layer*) se vyznačuje rovnovážností interakcí povrchu k adsorbátu a adsorbátu k adsorbátu (nanesená vrstva k další vrstvě). Tento model je považován za ideální.
- **Stranski-Krastanov** – neboli vrstva-a-ostrov (*layer-plus-island*) model je typický silnější interakcí povrchu k adsorbátu než adsorbátu k adsorbátu. To způsobí nanesení několika málo vrstev jako v prvním případě a následné formování náhodných ostrůvků.
- **Volmer-Weber** – neboli izolovaný ostrov (*isolated island*) je opačný případ, než u předchozího modelu. Zde je silnější vazba adsorbátu k adsorbátu a vazba povrchu k adsorbátu je slabší. Na povrchu se tedy začnou tvořit náhodné ostrůvky bez tendence zaplnit na něm mezery [29].



Obrázek 22 | Modely rovnovážného růstu zleva doprava: Frank-van-der-Merwe, Stranski-Krastanov, Volmer-Weber, převzato z [29].

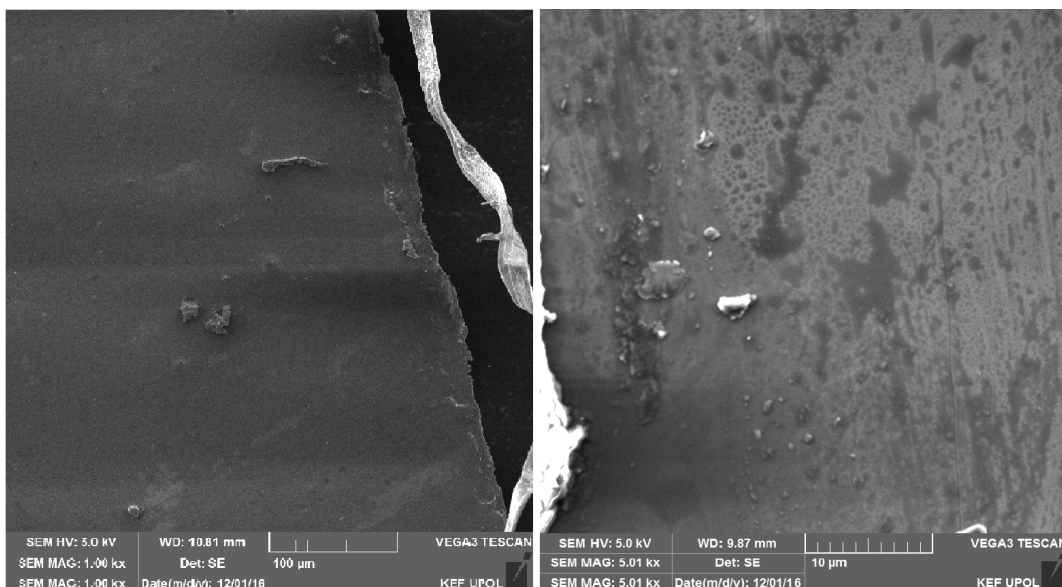
1.4.4. Odrazná fólie

Problematika odrazných fólií už byla několikrát nastíněna v předchozích kapitolách. Jak již tedy bylo řečeno, hlavním důvodem nahrazení klasických objemových zrcadel je snížení celkové hmotnosti zařízení. Tím je také docíleno snazší manipulace se zařízeními a rozšíření míst instalace. Zařízení SkyFlower® tedy není limitováno potřebou velké pevné plochy (na kterou by muselo být instalováno), ale naprosto postačí natažená lana. S mnohonásobně nižší hmotností však musí tyto reflexní fólie splňovat stejné podmínky jako objemová zrcadla. Musí tedy spolehlivě fokusovat dopadající světlo do ohniska s co nejvyšší přesností a odrazností (problematika optických vlastností je řešena v kapitolách 2.1, 3.1, 4.1 a 4.2). Původní inspirace k nahrazení objemových zrcadel fóliemi přišla z družic, kde takové řešení není úplně novinkou, ovšem na zemském povrchu musí fólie, na rozdíl od družic, vydržet v atmosférických podmínkách. Musí tedy odolat povětrnostním podmínkám, prachu, zvýšené teplotě, poletujícím částicám, které je mohou poškodit (mechanické vlastnosti jsou řešeny v kapitolách 2.2, 3.2, 4.3, 4.4 a 4.5) aj. Podle teoretických poznatků by se z pokročilých materiálů daly vyrobit tenké vrstvy, které by měly výborné optické nebo mechanické vlastnosti. Ovšem účel není vyrobit jeden extrémně drahý prototyp s téměř ideálními vlastnostmi (jak tomu je například u družic). Cíl je najít ideální poměr mezi cenou a výkonem tak, aby celé zařízení fungovalo co nejefektivněji za přijatelnou cenu při sériové výrobě. Za tímto účelem mi od zadavatele byly poskytnuty dva typy vzorků odrazných fólií k otestování. Ty jsou detailněji popsány v následujících odstavcích.

Složení: zkoumané odrazné fólie, které mají potenciál zastat úlohu zrcadel pro zařízení SkyFlower® se skládají z tenkých vrstev a sice:

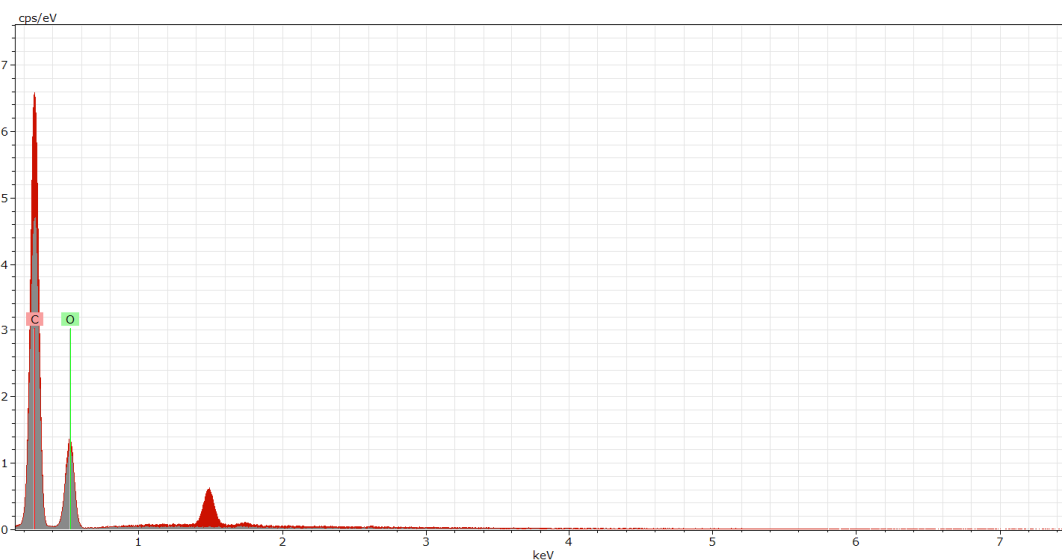
- Základová vrstva je mylarovou plastovou vrstvou tlustou $12\ \mu\text{m}$ s odchylkou $\pm 1\ \mu\text{m}$ obsahující 5 % barevných příměsí, které dávají zlatavou barvu a nemají negativní vliv na pevnost fólie.
- Na základovou vrstvu je metodou napařování nanášena $3\ \mu\text{m}$ vrstva hliníku (Al) s odchylkou $\pm 0,3\ \mu\text{m}$.
- Třetí vrstva má primárně ochrannou vlastnost. Jedná se o lak s příměsí nanočástic neznámého složení a velikosti (poskytovatel vrstvy si složení ponechává jako výrobní tajemství, avšak ochrannou vrstvu odhadujeme na vrstvu na bázi oxidu křemíku – SiO_2 nebo oxidu hafnia – HfO_2).

Pro měření byly dodány dva typy vzorků lišících se v ochranné vrstvě. Vzorky jsou označeny jako fólie A a fólie B. První z nich je tedy **fólie A**, u které byla tloušťka ochranné vrstvy experimentálně odhadnuta na 100-150 nm a to pomocí Reflektometru a Digitálního optického mikroskopu Keyence VHX-5000. Snímky vzorků fólie A z elektronového mikroskopu Tescan VEGA3 LMU (více o jeho specifikacích lze dohledat v [30]) jsou na obrázku 23.

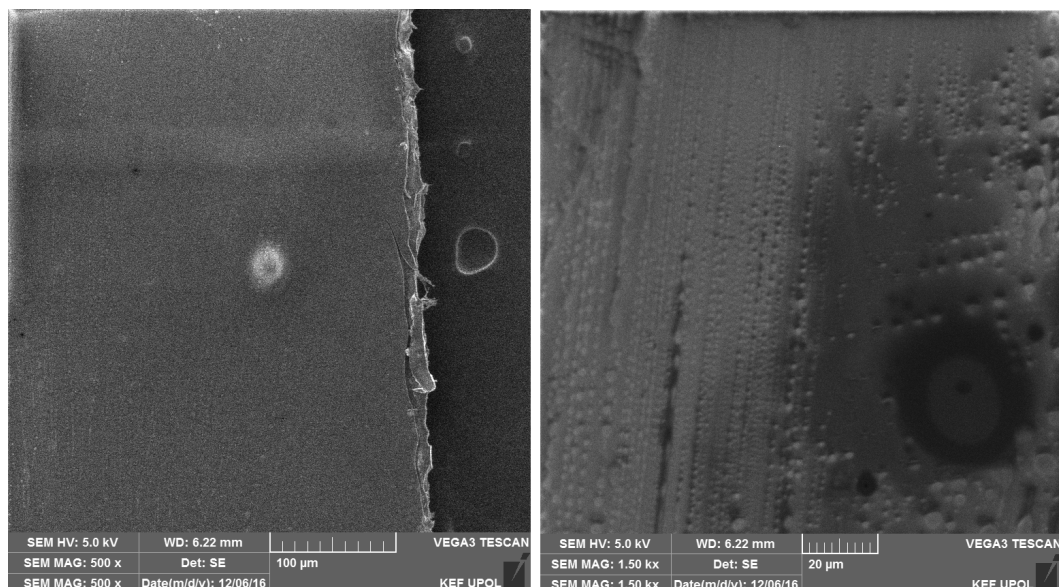


Obrázek 23 | Snímky fólie A z elektronového mikroskopu při různých zvětšeních.

Fólie-B se v prvních dvou vrstvách neliší od fólie A, avšak ochranná vrstva má jiné složení a tloušťku. Podle prvkové analýzy provedené na elektronovém mikroskopu (viz. obrázek 24) je ochranná vrstva pravděpodobně složena z prvků C, O a H. Tloušťka ochranné vrstvy se odhaduje na několik μm (přesněji hodnota blíží se $3 \mu\text{m}$). Odhad byl určen pomocí reflektometru a prvkové analýzy z elektronového mikroskopu – proběhlo několik měření s různou intenzitou excitačního napětí. Při nižších intenzitách byly detekovány prvky C, O, H (program také detekoval prvky Sc a Br, ale jejich přítomnost není příliš pravděpodobná a vyskytují se zde díky podobnosti spektrálních čar), kdežto při intenzitách vyšších se objevil i hliník, což značí, že proud elektronů prorazil ochrannou vrstvu a dostal se na vrstvu hliníkovou. Z tabulkových hodnot se zjistilo, že paprsek procházející materiálem složeným z C, O a H o dané intenzitě projde do hloubky několika μm (u dané intenzity svazku se tloušťka vrstvy odhadovala na $\pm 5 \mu\text{m}$ – měření, kdy se při dané intenzitě objevil hliník). Snímky fólie B pořízené z elektronového mikroskopu jsou na obrázku 25.



Obrázek 24 | Ochranná vrstva fólie B z prvkové analýzy elektronového mikroskopu, třetí peak odpovídá hliníku.



Obrázek 25 | Snímky fólie B z elektronového mikroskopu při různých zvětšeních.

1.4.5. Výroba BOPET fólií

Výroba BOPET (*biaxial orientated PET*) fólií je složitý proces, který se skládá ze tří stěžejních částí. První z nich je tzv. **vytlačování** v extruderu, kdy je daný materiál ve formě granulátu (často s dalšími aditivy) tepelně zpracován a vytlačen do výrobní linky v podobě fólie. Druhá část je dvojsměrná **orientace** vzniklých fólií. Jde o proces, kdy jsou fólie na páse postupně natahovány ve dvou směrech (podélně a následně šířkově) a to pod teplotou tavení. Orientace řízeně ovlivní míru krystalizace a fyzikální vlastnosti (zvýšení pevnosti, zmenšení průtažnosti aj.). Poslední částí je **navíjení** na roli, při čemž je do částečné míry kontrolován tloušťkový profil. Jde o precizní práci, která klade důraz na dokonale hladký návin v celé délce i šířce fólie. Finální výrobek je někdy třeba dále upravit. Může se jednat o druhé řezání, kdy je samotná fólie převinuta na jinou roli a zároveň ořezána na menší šířku, nebo o povrchové úpravy. Pro speciální účely je žádoucí, aby byly vyrobené fólie povrchově upraveny formou pokovení nebo nanesením vodných disperzí. Typickým příkladem pokovení je nanesení TV hliníku metodou vakuového napařování. Krom efektivního vzhladu se projeví změna fyzikálních vlastností (propustnost pro kyslík a plyny, ochrana proti UV záření, odrazné vlastnosti, tepelné izolace aj.).

Aditiva: je souhrnný název pro cizorodé látky přimíchané k výrobnímu materiálu za účelem doplnění nebo změny vlastností základního polymeru. Aditiva se často označují pod pojmem *MasterBatche* – MB. Jako příklad uvádím několik užívaných aditiv a jejich účel.

- **SiO₂** – je základním aditivem. Jemně mleté SiO₂ s velikostí částic od 3 do 5 μm se zastoupením přibližně 0,5 hmotnostních % je důležitou komponentou pro uskladňování fólií. Vytvoří totiž na povrchu výstupky, díky nimž se mezi navinuté fólie dostane vzduch zabraňující slepování. Mimo to SiO₂ také zastupuje ochrannou funkci. Negativními vlivy SiO₂ jsou zákal fólií a opotřebení řezacích nožů při druhotných úpravách.
- **Barevné MB** – jsou organické nebo anorganické pigmenty o maximální 20 % koncentraci. U anorganických pigmentů jde primárně o běloby, z nichž je nejpoužívanější TiO₂ (rutilový i anatasový typ). Ostatních barev je docíleno barvivy organickými. V zásadě jediný pozitivní efekt je barevné obohacení fólií. Naproti tomu stojí negativní efekt rychlejší degradace způsobené narušováním makromolekulárních vazeb.
- **UV stabilizátory a absorbery** – pohlcují UV záření, jehož energie způsobuje štěpení polymerních řetězců, díky čemuž fólie křehne až může nakonec dojít k jejímu rozpadu (ve střeoevropských podmínkách cca 6 měsíců). S přidáním látek pohlcujících UV záření se předejde výše uvedenému křehnutí a životnost fólie se prodlouží až na hranici 2 let.

2. Teorie měření

V této kapitole bude popsána teorie týkající se měření vlastností různých vzorků odrazných fólií (podrobněji popsanych v kapitole 1.4.4). Účelem je objasnit principy měřicích přístrojů, fyzikální zákony, kterými se řídí a možné problémy, které by při měření mohly nastat. Díky dobré znalosti teorie se dá mnoha těmto problémům předejít. Testované vzorky budou podrobeny měřením, pomocí kterých budou co nejpřesněji určeny jejich **optické vlastnosti** (2.1) a **mechanické vlastnosti** (2.2).

2.1. Optické vlastnosti

Měření optických vlastností bude rozděleno do dvou podkapitol, ve kterých budou zkoumány různé optické vlastnosti. Klíčovou požadovanou vlastností bude **spektrální odraznost viditelné složky záření** (2.1.1) testována pomocí spektrometru a **integrační koule** s ideálním výsledkem co nejvyšší odraznosti v celém viditelném spektru. Druhým měřením bude zjištěn **rozptyl/difúze** odražených paprsků na měřicím přístroji **CASI**, popsaným v kapitole 2.1.2. Z důvodu primární funkce fólií jako optický koncentrátor s úkolem efektivně odrážet světelné paprsky do ohniska, je požadován ideálně co nejmenší rozptyl.

2.1.1. Měření spektrální odraznosti

Spektrální odraznost se měří pomocí tzv. **Integrační koule** (v jiných literaturách také kulový integrátor či fotometrický integrátor) a spektrometru, což je optický komponent s bílou sférickou dutinou, kde dochází ke sběru a prostorové integraci světelného toku. Dutina je vevnitř pokryta uniformní difúzní barevně neselektivní vrstvou s velkou odrazností (ideálně blížíci se 100%). Dále zpravidla obsahuje malé otvory pro vstupní a výstupní porty. Porty mívají funkci kolektorů dopadajícího světla a neměly by zabírat více než 5 % povrchu sféry. Integrační koule se užívá v kombinaci se zdrojem a detektorem za účelem zjištění účinnosti světelných toků zdrojů a svítidel. Mnohonásobné odrazy paprsků (měřeného zdroje / svítidla) nezachovávají směr, ale jsou rovnoměrně rozptýleny. Při měření tedy ztrácíme prostorovou informaci, ale energie toku světla ze zdroje a jeho spektrální rozložení zůstávají zachovány. Díky tomu je všechno přichodící světlo sesbíráno a integrační hodnota toku světla a její spektrální rozložení může být ve výstupním portu integrační sféry změřeno, což nám umožňuje studovat optické **odraznosti** a **propustnosti** různých vzorků nebo celkovou svítivost lamp. Obvykle se měří fotoproud pomocí fotodetektorů (většinou v jednotkách pA) [31].

Výměna záření uvnitř sférické dutiny: teorie pro integrační kouli je odvozena z teorie pro výměnu záření mezi dvěma deskami s difúzním povrchem (viz. obrázek 26a), kde první deska dA_1 vyzařuje energii, která dopadá na desku dA_2 . Takový podíl dF_{d1-d2} je dán vztahem:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \Theta_1 \cos \Theta_2}{\pi S^2} dA_2, \quad (12)$$

kde Θ_1 a Θ_2 jsou měřeny od normál povrchů. Nyní uvažujme dvě diferenciální plošky dA_1 a dA_2 uvnitř sféry podle obrázku 26b, kde vzdálenost S je dána vztahem:

$$S = 2R \cos \Theta_1 = 2R \cos \Theta_2,$$

kde R je poloměr sféry. Po dosazení do rovnice 12 dostáváme podíl dF_{d1-d2} v následující podobě:

$$dF_{d1-d2} = \frac{dA_2}{4\pi R^2},$$

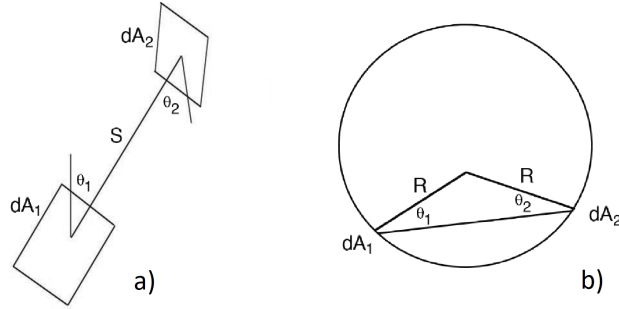
přičemž je zřejmé, že výsledek nezávisí na úhlu ani na vzdálenosti mezi zvolenými místy dA_1 a dA_2 . Z toho vyplývá, že hodnota bude stejná pro jakékoli vyzařující místo z vnitřního povrchu sféry. Pokud si infinitezimální ploška dA_1 vyměňuje záření s konečnou plochou A_2 , bude mít rovnice tvar:

$$dF_{d1-d2} = \frac{1}{4\pi R^2} \int_{A_2} dA_2 = \frac{A_2}{4\pi R^2},$$

kde výsledek je také nezávislý na A_1 a tedy dostáváme finální vztah:

$$dF_{1-2} = \frac{A_2}{4\pi R^2} = \frac{A_2}{A_S}, \quad (13)$$

kde A_S je plocha povrchu celé sféry.

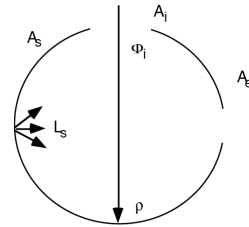


Obrázek 26 | Dvě desky vyměňující si záření (a) a výměna záření dvou ploch v kulové dutině (b), upraveno z [32].

Rovnice pro záři integrační koule: světlo dopadající na difúzní povrch integrační koule vytváří pomyslný zdroj světla (díky odraznosti povrchu). Tohle světlo vycházející z povrchu je nejlépe popsáno pomocí své *záře*, hustotou toku na jednotku prostorového úhlu. Při odvozování této záře pro zevnitř osvětlenou integrační kouli se začne obdobně jako v minulé podkapitole. A sice s vyjádřením záře L na difúzním povrchu se vstupním světelným tokem Φ_i .

$$L = \frac{\Phi_i \rho}{\pi A}, \quad (14)$$

kde ρ je odraznost povrchu, A je osvětlená plocha a π je celkový projektovaný prostorový úhel z povrchu. Jednotka $L = [W/M^2/sr]$. U integrační koule musí být zahrnuty vícenásobné odrazy na povrchu a také ztráty na portech nutných k propuštění vstupního světelného toku a k určení výsledné záře. Uvažujeme sféru se vstupním portem plochy A_i a výstupním portem A_e podle obrázku 27.



Obrázek 27 | Schéma integrační koule se vstupujícím světelným tokem Φ_i , odrazností ρ , plochou vstupního portu A_i , plochou výstupního portu A_e , plochou celé dutiny A_S a září L_S , upraveno z [32].

Vstupní světelný tok je rovnoměrně rozptýlen na prvním odraze a hodnota dopadajícího toku na celou sféru je:

$$\Phi_1 = \Phi_i \rho \left(\frac{A_S - A_i - A_e}{A_S} \right),$$

přičemž hodnota v závorce je část světelného toku dopadajícího na plochu sféry, která není odvedena příslušnými porty. Pohodlnějšího zápisu je dosaženo zavedením výrazu $(1 - f)$, kde f je právě ta doplňková část světelného toku, která je odvedena skrze porty. A sice $f = \frac{A_i + A_e}{A_S}$. Můžeme tedy psát:

$$\Phi_1 = \Phi_i \rho (1 - f)$$

a pokud integrační koule obsahuje více než jeden port, vypočítáme f jako sumu všech takových ploch. Podobně hodnota světelného toku dopadající na dutinu po druhém odraze je rovna:

$$\Phi_2 = \Phi_i \rho^2 (1 - f)^2,$$

obdobně po třetím odraze dostáváme ve výrazu třetí mocninu:

$$\Phi_3 = \Phi_i \rho^3 (1 - f)^3$$

a podobně by se dalo pokračovat až k n odrazům, kde celkový světelný tok pro celý povrch dutiny integrační koule je roven:

$$\Phi_n = \Phi_i \rho (1 - f) [1 + \rho(1 - f) + \dots + \rho^{n-1} (1 - f)^{n-1}].$$

Rozšířením do nekonečné mocninné řady za předpokladu, že $\rho(1 - f) < 1$ můžeme výraz upravit do formy:

$$\Phi = \frac{\Phi_i \rho (1 - f)}{1 - \rho(1 - f)},$$

což ukazuje, že celkový světelný tok dopadající na povrch dutiny je větší než vstupní. To je způsobeno právě mnohonásobnými odrazy uvnitř integrační koule. Z toho vyplývá, že záře povrchu sféry je dána výrazem:

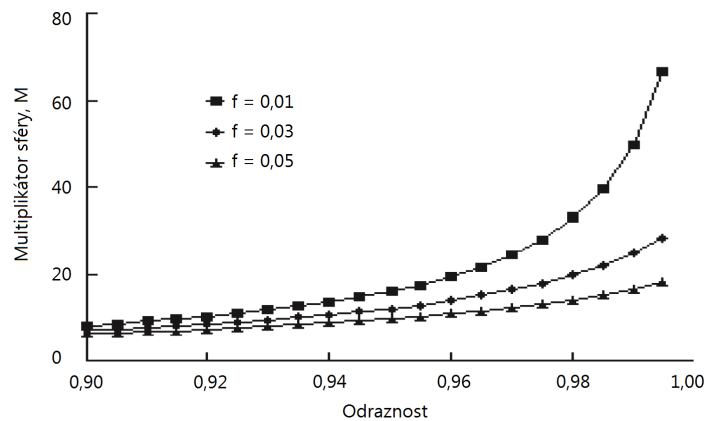
$$L_S = \frac{\Phi_i}{\pi A_S (1 - f)} \cdot \frac{\rho (1 - f)}{1 - \rho(1 - f)} = \frac{\Phi_i}{\pi A_S} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)}. \quad (15)$$

Rovnice 15 se užívá k určení záře integrační koule pro daný vstupní světelný tok. Je to funkce průměru sféry, odraznosti a podílu zastoupení plochy portů. Za povšimnutí stojí fakt, že se snižujícím se průměrem sféry se snižuje její záře.

Multiplikátor sféry: rovnice 15 je záměrně rozdělena na dvě části. První část lze přirovnat rovnici 14 (tedy záři difúzního materiálu), kdežto část druhá (osamostatněná v rovnici 16) nám dává bezrozměrnou veličinu nazývanou *multiplikátor sféry*:

$$M = \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)}. \quad (16)$$

Ten vyjadřuje průměrný počet, kolikrát je foton ve sféře odražen před tím, než je pohlcen nebo unikne portem. Tento počet se zvyšuje se zvyšováním reflektivity povrchu (a tedy četnějšími odrazy) a snižuje se zvyšováním počtu portů a absorbujících objektů v dutině. Na následujícím grafu 28 je velikost multiplikátoru M demonstrována silnou závislostí jak na podílu plochy portů, tak na odraznosti povrchu.



Obrázek 28 | Graf závislosti multiplikátoru sféry na odraznosti povrchu ρ a podílu plochy portů f , upraveno z [32].

Zjednodušeně lze intuitivním přístupem určit hustotu světelného toku uvnitř integrační koule podělením vstupního světelného toku celkovou plochou povrchu sféry. Ovšem opravdová hodnota multiplikátoru sféry bývá nejméně o řád větší, než se na tento první pohled zdá. Lze ale říci, že pro většinu používaných integračních koulí platí, že multiplikátor sféry se pohybuje v rozmezí od 10-30 a hodnoty pro odraznost a podíl plochy portů jsou $0,94 < \rho < 0,99$ a $0,02 < f < 0,05$.

Průměrná odraznost: multiplikátor sféry v rovnici 16 je specifický pro případ, kde vstupní světelný tok dopadá na dutinu sféry, jejíž odraznost je jednotná a zároveň odraznost všech portů je nulová. Obecné vyjádření se zapíše ve tvaru:

$$M = \frac{\rho_0}{1 - \rho_w \left(1 - \sum_{i=0}^n f_i\right) - \sum_{i=0}^n \rho_i f_i},$$

kde ρ_0 je odraznost pro počáteční dopadající světelný tok, ρ_w je odraznost dutiny sféry, ρ_i je odraznost otvoru i -tého portu a f_i je část plochy otvoru i -tého portu.

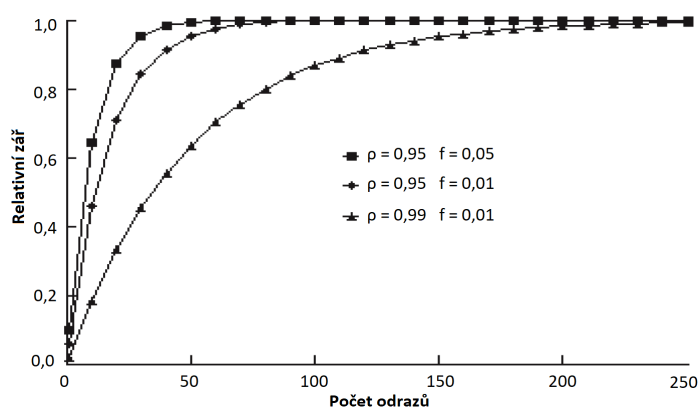
Hodnota multiplikátoru může být také popsána pomocí **průměrné odraznosti** $\bar{\rho}$ pro celou integrační kouli. Multiplikátor sféry může být tudíž přepsán pomocí počáteční a průměrné odraznosti na tvar:

$$M = \frac{\rho_0}{1 - \bar{\rho}} \quad (17)$$

Prostorová integrace: přesná analýza distribuce záření uvnitř dutiny konkrétní integrační koule závisí na distribuci vstupního světelného toku, geometrickém zpracování dané integrační koule a na distribuci světelného toku po odrazech na povrchu dutiny a površích všech portů. Designové podmínky pro optimální prostorový výkon jsou založeny na maximalizaci jak odraznosti vrstvy, tak průměru sféry s ohledem na otvory portů a příslušenství. Účinek odraznosti a podílu portů na prostorové integraci lze demonstrovat na příkladu, kdy je dosaženo celkového světelného toku dopadajícího na povrch sféry právě po n odrazech. Celkový světelný tok na povrchu sféry po n odrazech může být zapsán ve tvaru:

$$\Phi = \Phi_i \sum_{n=1}^n \rho^n (1 - f)^n \quad (18)$$

a příslušný graf pro produkovanou záři po n odrazech za podmínky stacionárního stavu integrační koule je na obrázku 29. Jelikož integrační koule je používána primárně za stacionárního stavu, odraznost ρ se zvyšuje a podíl plochy portů f se snižuje s nárůstem počtu odrazů.



Obrázek 29 | Graf závislosti relativní odraznosti na počtu odrazů ve sféře, odraznosti ρ a podílu plochy portů f , upraveno z [32].

Časová odezva integrační koule: s drtivou většinou integračních koulí se měří ve stacionárním stavu. Předchozí analýza výkonu a aplikací předpokládá, že světlo uvnitř sféry je konstantní po dostatečně dlouhou dobu a všechny přechodné odezvy vymizely. Pokud se měří vysoce proměnlivé světelné signály (krátké pulzy nebo vysokofrekvenční signály, například radiové), výsledný signál může být značně zkrácen z důvodu několikanásobných difúzních odrazů. Tvar výsledného signálu je určen konvolucí vstupního signálu a **impulzové odezvy** integrační koule. Tato impulzová odezva je ve tvaru:

$$T_{ik} = e^{-\frac{t}{\tau}},$$

kde t je čas a časová konstanta τ se dopočítá jako:

$$\tau = -\frac{2}{3} \cdot \frac{D_S}{c} \cdot \frac{1}{\ln \bar{\rho}},$$

kde $\bar{\rho}$ je průměrná odraznost stěny dutiny, c je rychlost světla a D_S je průměr integrační koule. Po dosazení lze výsledný vzorec pro impulzovou odezvu zapsat ve tvaru:

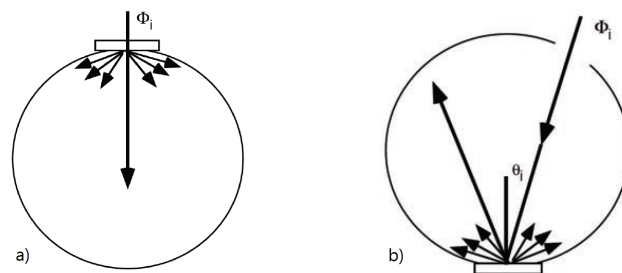
$$T_{ik} = e^{\frac{3tc \ln \bar{\rho}}{2D_S}} \quad (19)$$

přičemž typické časové konstanty integračních koulí se pohybují v rozmezí několika nanosekund až několika desítek nanosekund.

Obecně je známo, že parametry integračních koulí se dají ovlivnit jejich technickým zpracováním. To zahrnuje zvolení optimálního **průměru sféry** ($L_S \propto M/D_S^2$) založeného na počtu a velikosti otvorů portů. Dále zvolení vhodné **odrazné vrstvy** při ohledu na zkoumanou šířku spektra. V neposlední řadě použití **clonek** (*baffle*) stínících přímý odraz dopadajícího paprsku do portů a **radiometrické rovnice**. Více o technických parametrech integračních koulí je možno dohledat v [32].

Aplikace integračních koulí: jak již bylo vysvětleno výše, integrační koule sbírají a prostorově integrují světelný tok. Tento světelný tok lze měřit buď přímo, nebo po interakci s měřeným materiálem (vzorkem). Integrační koule může být použita jako **radiometr** nebo **fotometr** za účelem přímého změření světelného toku vystupujícího z lamp nebo laserů a jiných zdrojů světla. Ovšem největší uplatnění najdeme v měření **odraznosti** nebo **propustnosti** difúzních nebo odrazných materiálů. Více o příslušných metodách lze dohledat opět v [32], pro účely této diplomové práce je zde zahrnuto pouze měření odraznosti / propustnosti, které je klíčovou specifikací pro měřené vzorky.

Měření odraznosti a propustnosti materiálů: zde je zastoupeno největší uplatnění integračních koulí. Měření bývá zpravidla prováděno spektrálně jako funkce vlnové délky λ . Při měření **ultrafialové** oblasti se difúzní propustnosti užívá k určení odolnosti na UV záření pro různé aplikace jako jsou například farmaceutické kontejnery, ochrana proti Slunci, barvy v automobilovém průmyslu a jiné. Ve **viditelném** spektru se zkoumá a upravuje barva v průmyslu například pro barvy, textil a grafiky. V **infračervené** oblasti se pomocí hemisférické odraznosti určuje emisivita povrchu používaná na analýzu zářivého přenosu tepla pro funkční vrstvy a fólie používané v kosmických lodích. Při měření propustnosti se vzorek umísťuje do vstupního portu integrační koule podle obrázku 30a). Při měření odraznosti umístíme vzorek do portu naproti portu vstupnímu. Dopadající svazek je odražen vzorkem a celková hemisférická odraznost (difúzní i spekulární část) jsou zachyceny integrační koulí. Úhel dopadajícího svazku u měření odraznosti je většinou lehce odkloněn od normály (až 10°) podle obrázku 30b). Spekulární část může být vynechána při použití normálového svazku nebo použitím dalšího portu v jeho cestě a použitím absorbéru k potlačení spekulárního svazku. Pokud by mělo být provedeno měření pod většími nebo proměnnými úhly, umísťuje se vzorek do středu sféry a otáčí se s ním. Vstupní svazek přitom nemění svůj směr. Aby se předešlo případnému odrazu svazku ze vzorku přímo do portu s detektorem se používá tzv. *baffle* neboli clonka, která tento nechtěný svazek odstíní.



Obrázek 30 | Schéma experimentu pro měření propustnosti (a) a pro měření odraznosti (b), upraveno z [32].

2.1.2. Měření rozptylových vlastností

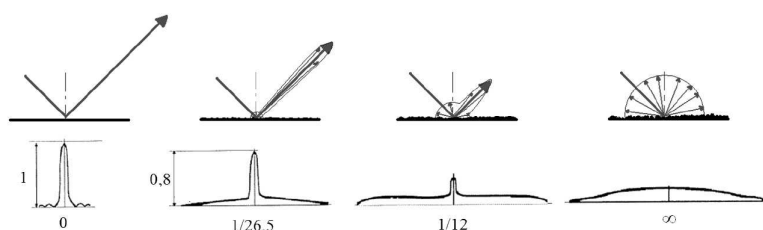
Systematika měření je popsána až v kapitole 3, ale ty vzorky, které budou zkoumány detailněji, nebudou proměřeny pouze na integrační kouli. Druhou metodou pro zjištění jejich vlastností bude měření rozptylových vlastností světla na zařízení **CASI** (*Complete Angle Scatter Instrument*). CASI se skládá ze zdroje laserového záření, které dopadá na zkoumaný vzorek. To je na vzorku rozptýleno do prostoru, kde je následně detekováno pomocí otočného detektoru. Naměřená data budou spolu s údaji z integrační koule dále použita v simulaci pro zařízení SkyFlower® za účelem zjištění celkové účinnosti zařízení.

Rozptyl světla: vnímání rozptylu světla je neodmyslitelnou součástí našich životů, neboť tvoří většinu toho, co vnímáme. Příkladem je schopnost rozeznávat barvy a tvary předmětů. Tyto vlastnosti rozptylu doprovázené efektními jevy jako například západ a východ Slunce, červánky, fakt, že obloha je modrá a další lze považovat za jevy žádoucí. Naproti nim stojí rozptyl na optických plochách a přístrojích, které žádoucí rozhodně nejsou, zejména pokud se snažíme dosáhnout maximální přesnosti zařízení. Rozptyl, jenž může nastat při odrazu světelného svazku na **odrazné ploše** nebo při **průchodu rozhraním** mezi dvěma optickými plochami způsobí pokles energie. Ta je částečně rozprostřena do okolí, místo aby se uchovala v ideálně odraženém nebo prošlém svazku. K rozptylu ale nedochází pouze ve dvou výše zmíněných případech, nýbrž i při šíření světla prostředím. Touto možností se ovšem následující části nebudou zabývat a budou věnovány pouze prvním dvěma případům popisující rozptyl na povrchu optických elementů vlivem drsnosti.

Velikost nerovností na površích spolu s vlnovou délkou záření je určeno poměrem intenzit odraženého a rozptýleného záření. Pokud bychom uvažovali ideální plochu (hladkou a bez jakýchkoli defektů), byl by výsledek odraz, u kterého by se zachovala intenzita dopadajícího svazku a přenesla by se ve stejné míře na svazek odražený. Došlo by tedy k nulovému rozptylu. V ostatních případech (nedokonale hladký povrch) dojde k rozptylu na rozhraní a část intenzity přejde do jiného směru. Čím více se budou nerovnosti zvyšovat, tím menší intenzita bude v požadovaném směru. Mohou tedy nastat dva extrémy.

1. **Zrcadlový odraz**, při kterém se veškerá intenzita dopadajícího svazku přenesla do spekulárního odraženého svazku tak, jak je znázorněno na obrázku 31 vlevo.
2. **Difúzní odraz**, kde je veškeré záření, a tedy i intenzita dopadajícího svazku rovnoměrně rozptýlena do všech směrů podle obrázku 31 vpravo.

Ostatní případy, které nejsou limitní, jsou určeny nerovnostmi, a tedy mírou difúze na daném optickém povrchu (druhé a třetí schéma na obrázku 31).



Obrázek 31 | Rozptylové charakteristiky odrazných ploch s různou mírou nerovností povrchu, upraveno z [34].

Kvalita zobrazovacího optického prvku se popisuje tzv. **rozptylovou funkcí bodu** (PSF – *point scatter function*). Ta je v ideálním případě charakteristická u bezaberační soustavy Airyho diskem. Reálně ovšem dochází k difúzi (ať už v jakékoli míře) a na obrazové rovině se tedy nezobrazí bod, nýbrž kroužek obklopený halem způsobeným rozptýleným zářením. Velikost a jas takového kroužku závisí na velikosti a četnosti nerovností. Když roste drsnost, roste také intenzita rozptýleného záření, což způsobuje snížení poměru signálu k šumu (SNR – *signal to noise ratio*). Při dokonale difúzním odraze by pak centrální bod/kroužek zcela vymizel.

Právě průběhy PSF funkcí jsou na obrázku 31 a každé funkci je přiřazena hodnota směrodatné odchylky výšky povrchu σ k vlnové délce záření λ . Čím menší bude poměr σ/λ , tím vyšší bude rozptyl a zobrazovací vlastnosti soustavy budou horší. Kvalita optického povrchu se dá matematicky zapsat pomocí Strehlova kritéria:

$$SR = 1 - \left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda} \right). \quad (20)$$

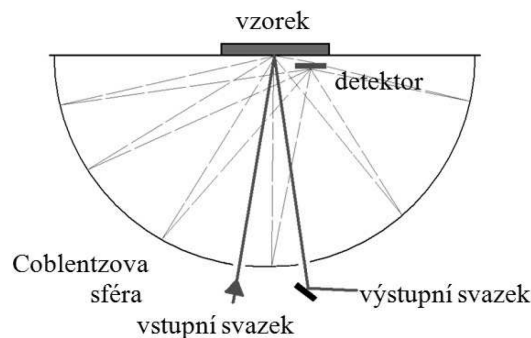
Strehlovo kritérium poskytuje rychlé informace o kvalitě daného povrchu. Je to vyjádření poměru energie obsažené v zobrazovacím bodě pro daný vzorek ku maximální energii v případě ideálního povrchu. Škála kvality pro zobrazovací povrchy se obecně bere v rozmezích uvedených níže.

- $SR = 1 \rightarrow$ jde o teoretické maximum.
- $SR \in (1; 0,95) \rightarrow$ jedná se o extrémně dobrý povrch.
- $SR \in (0,95; 0,8) \rightarrow$ značí dobrý povrch.
- $SR < 0,8 \rightarrow$ povrch kvalitativně nedostatečný pro zobrazovací účely.

Pro měření rozptylu se používají nejčastěji dvě metody, které jsou schopny určit míru rozptylu světla na mikrodrsnostech povrchu.

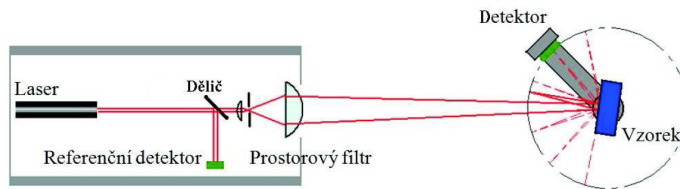
Metoda TIS (Total Integrated Scattering): u této metody je zkoumaný vzorek osvětlován úzkým svazkem záření, který prochází úzkou vstupní štěrbinou a ideálně odražený svazek opouští systém podobnou štěrbinou vyhotovenou na místě, kudy prochází svazek za předpokladu zrcadlového odrazu. Zrcadlově odražený svazek tudíž není v systému detekován, ale je detekován zvlášť. Zbytek rozptýleného záření je odražen do poloprostoru uvnitř tzv. Coblentzovy sféry (podle obrázku 32) a následně detekován. Tím získáme poměr výkonů rozptýleného ku odraženému svazku. Je nutno podotknout, že použití metody TIS nedá prostorovou vizualizaci rozptýleného záření, ale pouze jeho celkovou hodnotu výkonu. Vztah pro TIS při dopadovém úhlu Θ_i je

$$TIS = \left(\frac{4\pi\sigma \cos \Theta_i}{\lambda} \right)^2. \quad (21)$$



Obrázek 32 | Schéma měření rozptylu záření pomocí metody TIS, upraveno z [34].

Metoda ARS (Angular Resolved Scattering): oproti TIS je metoda ARS schopna zjistit prostorové rozložení intenzit rozptýleného záření. To je umožněno díky otočnému rameni s detektorem, který skenuje příslušný poloprostor kolem vzorku. celkový výkon lze podobně jako u TIS následně získat integrací příslušné funkce z ARS. Obecně se tato funkce nazývá **BSDF** (*Bidirectional Scatter Distribution Function*) – prostorové rozložení intenzity rozptýleného záření. Podle aplikace tuto funkci lze dále rozdělit na dvě části podle toho, zda se měří prošlá nebo odražená část záření. První z nich je **BRDF** (*Bidirectional Reflective Distribution Function*), zde se jedná o odraženou část záření. Naopak funkce **BTDF** (*Bidirectional Transmittance Distribution Function*) se zabývá průchozím zářením. Právě funkce BRDF, nebo BTDF by byla použita k integraci ke získání TIS. Na obrázku 33 je vyobrazeno schéma metody ARS.



Obrázek 33 | Schéma měření rozptylu záření pomocí metody ARS, upraveno z [34].

Nyní bude popsáno matematické vyjádření výše zmíněných funkcí pomocí fotometrických veličin. Jde o poměr intenzity rozptýleného záření

$$L_S = \frac{P_S}{A\Omega_S \cos \Theta_S}$$

a intenzity ozáření

$$E = \frac{P_i}{A},$$

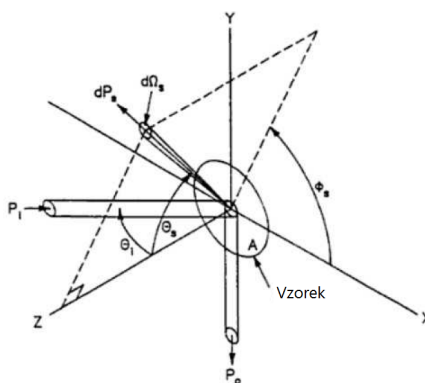
přičemž v první rovnici je P_S světelný tok rozptýlený z plochy A do prostorového úhlu Ω_S ve směru Θ_S . Co se týče druhé rovnice, tak P_i je světelný tok dopadající na plochu A . Podíl těchto intenzit dává výsledný vztah pro funkci $BPDF = \frac{L_S}{E}$:

$$BPDF(\Theta_S) = \frac{P_S}{P_i\Omega_S \cos \Theta_S}, \quad (22)$$

$$BPDF_{kor}(\Theta_S) = \frac{P_S}{P_i\Omega_S}. \quad (23)$$

Veličiny v rovnici 22 jsou graficky znázorněny na obrázku 34. Korigující koeficient pro případ plošného rozptylu je právě $\cos \Theta_S$ a má funkci upravit hodnotu BPDF o efektivní plochu, kterou vidí pozorovatel z úhlu Θ_S . Jedná se o funkci 23, u které mohou dále nastat dvě krajní možnosti podle míry rozptylu. Reálné povrchy těchto krajních možností nedosahují a nacházejí se někde mezi nimi. Krajní případy jsou:

- Hodnota funkce je konstantní pro všechny úhly $\frac{1}{\pi} [sr^{-1}]$ – případ ideálního Lambertovského rozptylu.
- Tvar dopadajícího svazku zůstává zachován a rozptyl je nulový.



Obrázek 34 | Schéma metody BPDF a vysvětlení pojmů z rovnice 22, upraveno z [34].

Odrážnost: zobecněnou odraznost lze definovat jako charakteristiku povrchu (obecně v reálných případech rozptylujícího) pomocí závislosti rozptýleného výkonu záření na prostorovém úhlu se středem v ose přímého odrazu a vrcholovým úhlem $2\Theta_S$. **Klasická odraznost** je ovšem chápána jako poměr výkonů odraženého svazku ku dopadajícímu. Problém nastává u určení hranice, kde se ještě jedná o přímý odraz. Proto se tento poměr zobecňuje jako poměr stejných výkonů, ovšem s tím rozdílem, že odražený svazek se bere jako částečně rozptýlený do daného prostorového úhlu s osou ve směru ideálního zrcadlového odrazu. To se dá zapsat následujícím vztahem:

$$R(\Theta, \Theta_i) = \int_0^{2\pi} \int_{-\Theta}^{\Theta} BRDF(\Theta_S) \cos \Theta_S \sin \Theta_S d\Theta_S d\Phi, \quad (24)$$

kde úhly Θ , Θ_S a Φ jsou vztaženy k ose ideálního zrcadlového odrazu. Pokud uvažujeme izotropní povrch a úhel dopadajícího svazku Θ_i se blíží nule, je možné vztah 24 zjednodušit na tvar:

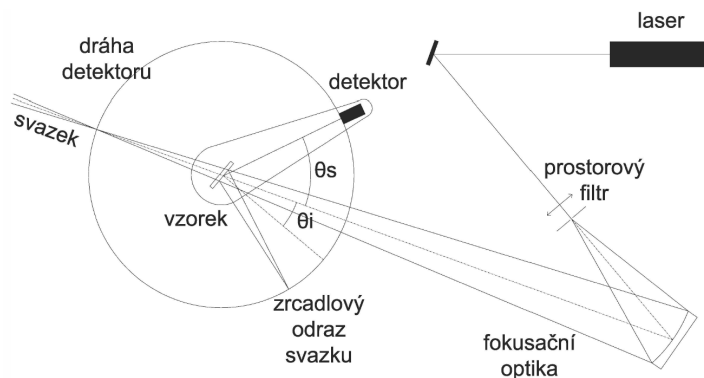
$$R(\Theta) = 2\pi \int_0^{\Theta} BRDF(\Theta_S) \cos \Theta_S \sin \Theta_S d\Theta_S, \quad (25)$$

kde již lze jednoznačně určit, jaký výkon záření se odrazí (a také rozptýlí) do zvoleného prostorového úhlu. Také tímto způsobem lze určit množství záření, které dopadne na danou plochu (např. detektoru) a předpovědět tím efektivitu různých aplikací.

Měřicí systém CASI: zařízení CASI (*Complete Angle Scatter Instrument*) slouží k proměření a vyhodnocení pole rozptýleného světla. Typ přístroje je ARS a rozptýlené záření je měřeno na vlnových délkách 325 nm nebo 632.8 nm . Laserové záření o jedné z výše zmíněných vlnových délek je snímáno detektorem, který zaznamenává průběh jeho výkonu. Záření je tedy rozptýleno od měřeného vzorku v závislosti na úhlu Θ_S . Měřit lze jak BRDF (odražené záření), tak BTDF (prošlé záření). Tyto hodnoty se dají dále využít k výpočtu drsnosti povrchu (není předmětem této diplomové práce), nebo k určení míry rozptylu zkoumaného vzorku a díky tomu s použitím dalších programů (například Zemax určený ke tvorbě simulací) určit efektivitu různých optických zařízení.

- Systém CASI je tedy bezkontaktní metodou a měřeny mohou být následující veličiny: kompletní od materiálů rozptýlené pole záření, znečištění materiálů, kvalita optických ploch, drsnost optických ploch, defekty a pravidelné struktury.
- Materiály, na kterých lze provádět měření jsou: jakékoli difúzní materiály, precizně opracované optické povrchy, polovodičové destičky.

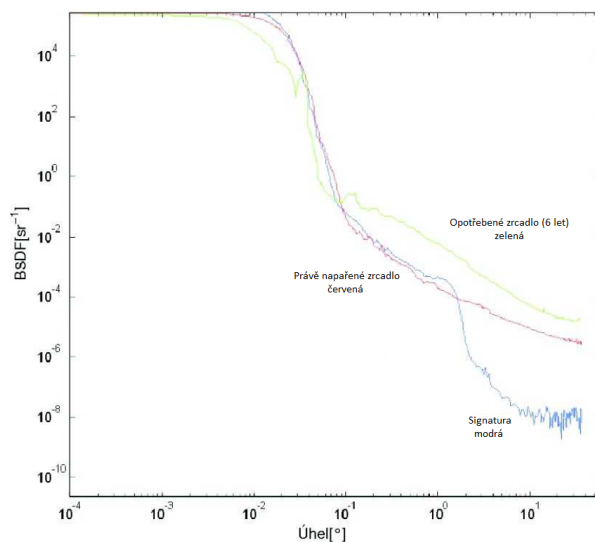
Principiálně lze systém CASI považovat za goniofotometr. Schéma celého systému je na obrázku 35. Zkoumaný vzorek je umístěn do středu kružnice, po které se pohybuje detektor. Se vzorkem se během měření nehýbe. Laserový svazek dopadající na vzorek je fokusovaný právě ve vzdálenosti detektoru. Ten je složen **apertury, pásmového filtru, čočky, clony zorného pole a detekčního prvku**. Prostorový úhel přijímače Ω_S je definován průměrem otvoru apertury přijímače a jeho vzdáleností od samotného vzorku. Změnou průměru apertury přijímače se dá změnit velikost tohoto prostorového úhlu Ω_S , což má za následek změnu úhlového rozlišení daného měření. $0,007^\circ$ je minimální dosažitelné úhlové rozlišení. Největší požadavek na nejmenší úhlové rozlišení je v okolí přímého (zrcadlového) odrazu, kde je potřeba dosáhnout co nejvyšší citlivosti. V této oblasti je totiž obsažena informace o nízkých prostorových frekvencích na povrchu vzorku. Výše zmíněný otočný detektor měří výkon rozptýleného světla v daném poloprostoru. Detektor je od vzorku umístěn ve **vzdálenosti 575 mm**. Objektiv zobrazuje osvětlené místo vzorku na omezovač zorného pole, který, jak již název napovídá, omezí zorné pole přijímače.



Obrázek 35 | Schéma měřicího systému CASI, upraveno z [34].

Aby nedošlo k rušení světlem na pozadí, je v detektoru také umístěn pásmový spektrální filtr. Dále je obsažen **analogově – digitální převodník**, který přivádí signál ze signálového a referenčního detektoru do počítače. Ten následně vyhodnocuje poměr signálů, dále je numericky integruje a nakonec ukládá data, která mohou být dále vyhodnocována (ať již pro měření drsnosti, účely simulací aj.). Měřitelné hodnoty funkce BSDF se mohou pohybovat až přes **14 řádů**. To je umožněno díky volitelné délce integrace, volitelnému zesílení zesilovače a volitelné velikosti prostorového úhlu detektoru (neboli proměnnému průměru vstupní apertury detektoru). Takový vysoký dynamický rozsah je potřebný kvůli povaze rozptýleného světla na velmi hladkých površích.

Vliv rozptýleného světla od vlastního přístroje by v ideálním případě neměl být vůbec měřen. Měřit by se měla pouze intenzita světla rozptýleného od vzorku. Ovšem v reálných případech dochází k tomu, že se do detektoru mimo zkoumané rozptýlené světlo dostává také světlo rozptýlené od optických elementů samotného přístroje. Tyto nežádoucí světelné svazky nazýváme *signatura* přístroje, která definuje nejmenší úhel od osy svazku (největší prostorovou frekvenci), u které je možné měřit intenzitu rozptýleného světla. Jeho hodnota je závislá jak na signatuře, tak na povaze měřeného vzorku. Tento nejmenší úhel se nazývá **separační** a prakticky jde o nejmenší úhel, kdy naměřená křivka BSDF přeroste funkci signatury (viz. obrázek 36). U hodně rozptylujících vzorků se hodnota separačního úhlu blíží úhlu příslušejícímu patě zrcadlově odraženého svazku. Kdežto u málo rozptylujícího materiálu je separační úhel udáván úhlem, kdy místo rozptylu světla z vnitřku přístroje vystoupí ze zorného pole detektoru. Pro hodnoty BSDF v místech, kde je rozptylový úhel větší než separační, že musí být korigovány o hodnotu signatury v daném místě.



Obrázek 36 | Příklad funkce signatury a měřených vzorků, upraveno z [34].

Metoda využívající separační úhel se dá jednoduše použít u **plochých vzorků**, neboť geometrie odraženého svazku jím není nijak ovlivněna. Ovšem může nastat ještě jiný případ, kdy vzorkem je **zakřivená odrazná plocha** nebo **čočka**, která mění polohu pasu laserového svazku. Tu je nutno eliminovat, a sice změnou vnitřní fokusační optické soustavy způsobem, aby byl svazek fokusován do roviny detektoru. To způsobí změnu velikosti pasu laserového svazku a tím se také změní funkce signatury. V takovém případě již separační úhel nelze zjistit pouhým srovnáním dvou křivek, nýbrž je nutno jej spočítat podle následujícího vztahu:

$$\Theta_N = FOVS \left(\frac{1}{L_S} + \frac{1}{R} - \frac{1}{f_S} \right), \quad (26)$$

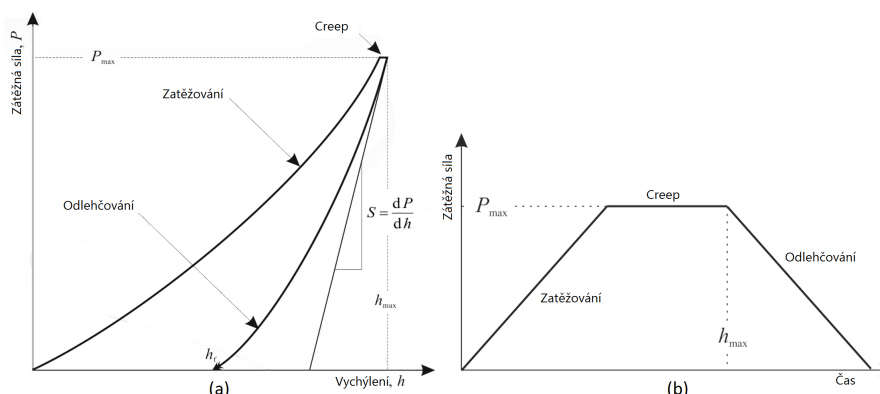
kde $FOVS$ je průměr zorného pole detektoru na vzorku, L_S je vzdálenost hlavního fokusujícího prvku na vzorku, R je poloměr kružnice, po které je posunován detektor a f_S je ohnisková vzdálenost vzorku. Dále platí, že vzorky s kladnou ohniskovou vzdáleností se separační úhel nachází blíže k zrcadlovému odrazu, kdežto u vzorků s ohniskovou vzdáleností zápornou je tomu naopak. Oba případy jsou vztaženy k rovinnému vzorku stejné kvality [33], [34].

2.2. Mechanické vlastnosti

Měření mechanických vlastností bude opět rozděleno do dvou podkapitol. První z nich je **indentace** (2.2.1), z jejichž výsledků budou zjištěny dvě zásadní mechanické vlastnosti. Tvrdost a modul pružnosti. Na stejných vzorcích bude provedeno i druhé měření. Jde o **vrypovou zkoušku** (2.2.2) z jejíhož vyhodnocení lze získat informace o kritických zátěžných silách, při kterých dochází k deformaci fólie nebo ochranné vrstvy (v obou případech dojde k následnému zničení vzorku). Je tedy žádoucí, aby tato kritická zátěžná síla byla co nejvyšší a vzorky tedy vydržely co nejvíce.

2.2.1. Indentace

Instrumentovaná vtisková zkouška neboli indentace (dále také mikroindentace a nanoindentace) je jednoduchá vtisková metoda. Její princip je založen na vzájemném mechanickém kontaktu dvou materiálů. Jde o **indenter** a **zkoumaný materiál**. Indenter musí splňovat několik vlastností. Musí být schopen do zkoumaného materiálu vniknout, jinými slovy se musí jednat o tvrdší materiál (většinou se používá diamant). Také musí být známy jeho rozměry, neboť k výpočtu **modulu pružnosti** a **tvrdosti** (což jsou dva nejdůležitější výstupy indentační zkoušky) se užívá nepřímého měření plochy A (viz. 27 a 28). Výsledky jsou tedy vypočítány z naměřených parametrů a známých rozměrů indenteru. Toto je dnes nejrozšířenější indentační metoda, říká se jí *Depth Sensing Indentation* (DSI) a řídí se normou ČSN EN ISO 14577-1 Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů - Část 1: zkušební metoda, in: P.Č.n. institut (Ed.), 2003, pp. 32. Samozřejmě modul pružnosti a tvrdost nejsou jediné vlastnosti, které se dají pomocí indenteru zjistit. Lze také vyhodnotit tzv. creep, deformační zpevnění, fázové transformace, lámavou houževnatost a jiné. Na obrázku 37 jsou znázorněny průběhy indentačního měření, přičemž danou křivku (a) lze považovat za tzv. *fingerprint*. To znamená, že je charakteristická pro daný materiál.



Obrázek 37

Indentační křivku tvoří tři části. První část křivky se nazývá zatěžovací, kdy se zvyšuje síla působící na hrot indenteru pronikající do zkoumaného materiálu, po ní následuje tzv. creep (tečení materiálu) a nakonec odlehčovací část, kde se zatěžovací síla postupně zmenšuje. Závislost hloubky vtisku na zátěžné síle (a) a závislost času na zátěžné síle (b), upraveno z [35], [36].

U průběhu zkoušky, jako je vyobrazena na obrázku 37, uvažujeme indenter s kulovým hrotem (další typy indenterů viz. níže) s konstantně narůstající zátěží na zkoumaný materiál. Zátěž i hloubka vtisku musejí být měřeny v průběhu celého experimentu. S takovými údaji se dá dopočítat modul pružnosti a tvrdost. Měření může být ovlivněno několika faktory. Například tvarovou funkcí hrotu, vlivem substrátu, praskáním zkoumaného materiálu, tvarem vtisku a dalšími.

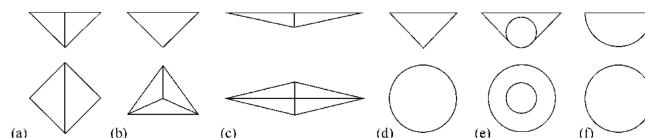
Nanoindentace: v poslední době roste zájem o tenké vrstvy a materiály malých rozměrů. U takových materiálů již nelze použít klasický indenter (a dokonce ani mikroindenter) na testování jejich mechanických vlastností. Používá se tzv. nanoindenter. Takové zařízení již má dostatečně malý hrot a přesnost k tomu, aby bylo schopno změřit mechanické vlastnosti např. tenkých vrstev. U mikroindenterů, i kdyby byly něčeho podobného schopny, by byla obrovská nejistota měření. U penetrace $5 \mu\text{m}$ by byla odchylka přibližně 20 % a u průniku jen $1 \mu\text{m}$ by dosahovala až 100 %.

U klasické indentace se plocha vtisku (potřebná k výpočtu tvrdosti) zjistí přímo z měření na povrchu vzorku (jedná se o makroskopické měření). U nanoindentace je tahle metoda vyloučena. Postupuje se tedy nepřímo a plocha vtisku se dopočítá pomocí **hloubky vtisku** (ta se měří v průběhu celého procesu) a **známých parametrů indentoru**. Tyto dva parametry stačí k výpočtu plochy při maximálním zatížení (tedy i maximální hloubce a ploše vtisku). U nanoindentoru se maximální hloubka pohybuje v jednotkách μm a maximální zatěžovací síle v řádu mN . Při takovém procesu dochází postupně k elastické a většinou i k následné plastické deformaci vzorku.

Samozřejmě opět nejde o bezchybné měření a musí se počítat s jistými komplikacemi. První z nich je nastavení hrotu do polohy, kdy se přímo dotýká zkoumaného vzorku. V tento moment dojde nevyhnutelně k tzv. počáteční penetraci, která, byť nepatrně, ovlivní měření. Dále se musí počítat s jevy jako jsou tvar indentoru (ten může být v nano měřítku nepřesný), nečistoty na hrotu, nahrnování materiálu vzorku okolo hrotu (*pile-up* efekt). Navíc, deformace způsobená měřením může být velikostně porovnatelná s defekty vzorku (dislokace, velikosti zrn a podobně). Všechny zmíněné jevy mohou způsobit nesprávnost výpočtu tvrdosti, a způsobí tedy, že je metoda nanoindentace méně spolehlivá než indentace v makro měřítku.

Na druhou stranu nanoindentace nese i řadu výhod. S velmi malou pracovní plochou použitou k měření lze za určitých okolností říci, že se jedná o nedestruktivní metodu. Další výhodou je počítačem řízené ovládání a fakt, že k měření není potřeba vakua ani jiného drahého laboratorního zařízení.

Typy indentorů: k indentační zkoušce mohou být použity různé typy indentorů. Indentorem nazýváme těleso s dostatečnou tvrdostí na to, aby se nepoškodil při vtlačování do zkoumaného materiálu (měl by být tvrdší alespoň o 20 %). Navíc, jak již bylo naznačeno výše, musí mít přesně definovaný rozměr a geometrii. V opačném případě by nebylo možné spočítat tvrdost a modul pružnosti. Typy hrotů a jejich názvy jsou uvedeny na obrázku 38. Za zmínku stojí srovnání trojboké pyramidy s pyramidou čtyřbokou (čtvercová základna, kde se upřednostňuje pyramida trojboká. Tři plochy se obecně vždy protínají v jednom bodě. V tomto případě ve vrcholu indentoru. Pokud jsou plochy čtyři, potom je velké nebezpečí, že se neprotínou v jednom bodě. Potom má hrot částečně dlátovitý charakter.. Dále se populárními hroty stávají sférické nebo sféricko-kónické, protože při použití právě sférického hrotu dochází ke hladkému přechodu od elastického k elasticko-plastickému kontaktu. Je proto využíván k měření jemných povrchů.



Obrázek 38 Typy hrotů: čtyřboká pyramida se čtvercovou základnou – Vickersův (a), Trojboká pyramida se základnou rovnostranného trojúhelníka – Berkovich (b), čtyřboká pyramida s kosočtverečnou základnou – Knoopův (c), Kónický (d), kuželový – Rockwellův (e), sférický – Brinellův (f).

Indentory se dají také rozdělit na **tupé** a **ostré**. Obecně platí, že sférické hroty jsou tupé a pyramidální ostré. Někteří autoři ale uvádějí, že ostré hroty jsou takové, které zanechají permanentní deformaci. Jiní zase říkají, že u kónických a pyramidálních záleží na úhlu, pod kterým je hrot seříznut a pokud je tedy úhel dostatečně velký, tak se jedná o tupý hrot.

Tvrdost: je definována jako odpor, který klade určitý materiál proti vnikání cizího tělesa. Jiná definice říká, že tvrdost je vlastnost, která se projevuje odporem proti pružné, nebo elastické deformaci tělesa, nebo oddělení části povrchu nebo nějaká kombinace. Vtisková tvrdost H_{IT} je vypočítána nepřímo z údajů získaných při nanoindentační zkoušce. Maximální hloubka vtisku a maximální zatížení je změřena nanoindentačním zařízením. Dále plocha A se dopočítá ze známých parametrů a geometrie indentoru. Rovnice 27 udává obecný vztah pro tvrdost.

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A}, \quad (27)$$

kde P_{max} je maximální hodnota použité zátěžné síly na zkoumaný materiál. Obecně platí pravidlo, že u tvrdších materiálů v rovnici vystupuje menší plocha A . Vztah 27 je ovšem pouze základní a pro různé typy indentorů jsou zavedeny přesnější a složitější vztahy. Tyto vztahy se dají dohledat v literatuře [35].

Modul pružnosti: nejvíce používaný vztah pro redukovaný modul pružnosti E_r je uveden v rovnici 28 a dává do poměru tuhost S s plochou vtisku A .

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}}. \quad (28)$$

Modul pružnosti zkoumaného vzorku E_E může být vypočítán ze vzorce 29 a znalosti redukovaného modulu pružnosti.

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E_E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}, \quad (29)$$

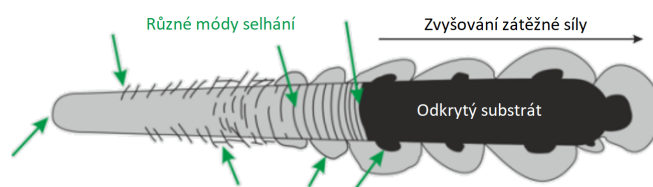
kde E_i je modul pružnosti indentoru, dále ν_i je Poissonovo číslo indentoru a ν je Poissonovo číslo vzorku. U často používaného diamantového hrotu jsou hodnoty pro $E_i = 1141 \text{ GPa}$ a $\nu_i = 0,07$. Více se dá dohledat v [35, 36].

Nanoindentace TV: momentálně jednou z nejpoužívanějších aplikací nanoindentorů je testování mechanických vlastností TV. Z takových testů se dostane jak kvalitativní, tak kvantitativní informace o vzorku. Porovnáním indentačních křivek lze odhalit elastickou nebo plastickou odezvu, která se projeví díky rozdílným povrchovým úpravám vzorků. Nespojitosti indentačních křivek dávají informaci o praskání (plastické deformaci). Výhodou u nanoindentoru je, že TV nemusí být při testování oddělena od substrátu. Na druhou stranu fakt, že TV se testuje zároveň se substrátem, přináší několik komplikací. Jednou z nich je nebezpečí, že indentor pronikne TV až na substrát. Proto se doporučuje měřit s maximální hloubkou vtisku do 10 % tloušťky vrstvy (pokud je známá). S tím souvisí adheze TV.

Adheze: neboli adhezní síla je schopnost vrstvy držet se na substrátu. Adhezi se rozumí síla vazby vrstvy na substrát. I adheze se dá pomocí nanoindentační zkoušky testovat. U takového experimentu se zvyšuje zátěžná síla až do doby, kdy dojde k selhání vrstvy. To se projeví na grafu indentačního měření, ze kterého se dá určit, při jaké síle k selhání došlo. Avšak může se stát, že adhezní síla je příliš vysoká a při klasickém testu k selhání dojít nemusí. Poté se volí alternativní přístup, kdy je ke zkoumané vrstvě (při pokojové teplotě) přiložena jiná vrstva (zahřátá na 180 °C). Pomocné vrstvě se říká **epoxyvrstva**. Po tepelné expanzi, a následném zchlazení epoxyvrstvy, dojde k delaminaci vrstvy.

2.2.2. Vrypová zkouška

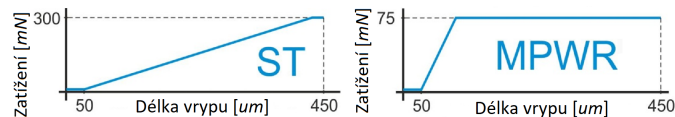
Je komplexní metoda sloužící k ohodnocení adhezních a kohezních vlastností TV. Na rozdíl od vtiskové zkoušky je diamantový (nebo jiný dostatečně tvrdý materiál) indentor tažen po povrchu zkoumané TV při konstantní nebo zvyšující se normálové síle. Ve vzorku tedy nezůstane stopa po indentoru jako je tomu na obrázku 38, ale rýha (obrázek 39). V takovém případě se poté dá určit tzv. **kritická zátěž**, kterou vrstva vydrží, než selže. Tato kritická zátěž (síla) může být určena několika způsoby: optickým mikroskopem (konfokální mikroskop), akustickou emisí, analýzou koeficientu tření. Já ve své práci tyto výsledky vyhodnocuji pomocí naměřených dat z **NanoTestu™ NTX600** v kombinaci s **konfokálním mikroskopem Olympus LEXT OLS 3100**, více v [37].



Obrázek 39 | Schéma vrypové zkoušky.

K vrypové zkoušce se většinou užívá sféro-kónický indentor s poloměrem okolo $200\ \mu\text{m}$. Zkouška může probíhat ve dvou režimech (obrázek 40).

- První metodou je metoda ST (*Scratch Test*). Jedná se o jedno-přejezdový vryp se zvyšující se zátěžnou silou. Nebo jiná varianta MPW, která je rozdělena na tři části. Jejich schéma je topografie – vryp – topografie. Jinými slovy nám tato varianta změří topografii zkoumaného vzorku před a po vrypové zkoušce.
- Druhá metoda se nazývá MPWR (*Multipass Wear Test*). Jde o tzv. zátěžový test, kdy indentor přejíždí stejnou trasu několikrát po sobě. Maximální zátěžné síly je dosaženo na počátku a po zbytek měření je udržována konstantní. I tato metoda se dá kombinovat s průběžnými měřeními topografie vzorku.

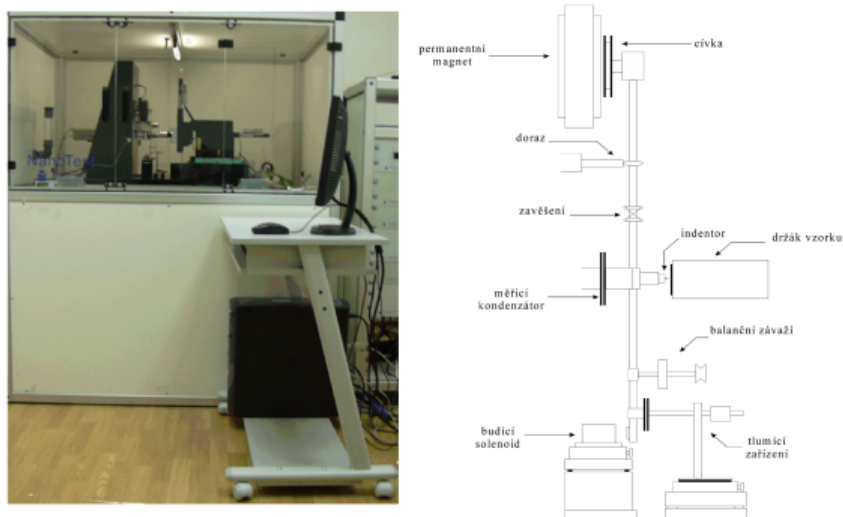


Obrázek 40 | Závislosti délky vrypu na zátěžné síle pro metodu ST a MPWR.

Vrypové zkoušky mohou být ovlivněny mnoha faktory. Jejich příklady jsou: rychlost posunu indentoru, rychlost zvyšování síly, tvar indentoru, poloměr hrotu, tvrdost substrátu TV, tloušťka vrstvy, koeficient tření, třecí síla a jiné [35].

2.2.3. NanoTest™ NTX600:

(Obrázek 41) je modulární zařízení navržené k měření mechanických vlastností TV a povlaků. Mezi hlavní přednosti zařízení patří schopnost vyhodnotit tvrdost, modul pružnosti, adhezi, selhávání a únavu vrstev. Stěžejní součástí systému je keramické kyvadlo, které je schopno rotovat kolem speciálně připraveného zavěšení bez tření. Na kyvadle je nainstalována cívka. Ta je díky průchozímu proudu přitahována k permanentnímu magnetu, který je umístěn naproti ní. Takhle se ovládá zátěžná síla diamantového hrotu na vzorek. Poloha hrotu je měřena pomocí kapacitního snímače složeného ze dvou desek kondenzátoru (jedna z nich je pevně připojena k zařízení a druhá je připojena ke kyvadlu). Celé zařízení je umístěno na antivibračním stole ve speciální komoře, kde je přesně regulována teplota a vlhkost, ale také snižovány vzduchové turbulence a akustické vibrace. Tyto faktory zajišťují co nejpřesnější měření za požadovaných podmínek.



Obrázek 41 | Fotografie a schéma NanoTestu™ NTX600 [36].

V základu systém čítá čtyři nezávislé funkce. Jedná se o indentaci, skenování, dynamický dopad a impulzový test. NanoTest™ NTX600 je možno rozšířit přídatnými zařízeními, jako jsou například frikční sonda, AFM, modul pro akustickou emisi a další [36].

3. Experimentální část

V experimentální části diplomové práce bude řešeno samotné proměrování vybraných vzorků popsanych v kapitole 1.4.4. Hlavním předmětem experimentální části bude popsat přípravu vzorků, systematicku a provedení experimentů, laboratorní sestavu a zvolené parametry. Nejprve je ale nutné popsat značení vzorků.

Typy zkoumaných fólií: všechny typy fólií, u kterých proběhlo alespoň jedno měření za účelem zjištění jejich efektivitu z hlediska optických vlastností a odolnosti proti mechanickým vlivům. Fólie jsou rozděleny do dvou typů. **Základní fólie** a **zatížené fólie**. Základní byly proměřeny vždy alespoň jednou a podle výsledku bylo rozhodnuto, zdali má smysl pokračovat v testování a zkoumat degradaci při různých atmosférických vlivech. Záchranářská fólie byla přidána mezi vzorky poskytnuté dodavatelem na základě její zdánlivé podobnosti. Bylo řečeno, že vzorky byly proměřeny alespoň jednou, ale zatím nebylo řečeno jak. Stěžejním parametrem fólií je jejich spektrální odraznost. Všechny základní vzorky byly proto nejprve změřeny pomocí integrační koule a spektrometru. Hranice odraznosti, která byla stanovena, činila **80 %** pro celé spektrum. Pokud tedy pro nějaký interval vlnových délek (byť jakkoli malý) byla odraznost menší než 80 %, nebyly již vzorky dále proměřovány a byly vyhodnoceny jako nepostačující pro účely zařízení SkyFlower®. Z následujících výčetů si lze povšimnout, že podmínku splnily pouze 2 vzorky. Ty byly následně proměřeny na zbylých měřicích systémech. Takto byly zjištěny jejich další vlastnosti. Následuje výčet zkoumaných základních vzorků:

Základní fólie: vzorky, které prošly základním měřením a bylo rozhodnuto, zdali budou podrobeny zátěžovým testům a dalším měřením.

- **Fólie A** – mylarová fólie s hliníkovou odraznou vrstvou a s malou ochrannou vrstvou.
- **Fólie B** – mylarová fólie s hliníkovou odraznou vrstvou a s větší ochrannou vrstvou.
- **Fólie Z** – zlatá mylarová strana fólie A/B (stejně u obou).
- **Fólie ZF** – záchranářská fólie.
- **Fólie ZFZ** – záchranářská fólie, zlatá strana.

Po proměření následovaly tzv. zátěžové testy. Zde byly vždy čisté nezátížené vzorky podrobeny jednomu ze zátěžových testů. Ty byly vždy zpracovány nezávisle na sobě. Aby nedošlo k nejasnostem uvádím, že pro celou sadu měření byl vždy spotřebován vzorek o velikosti A4. Na začátku byl takový čistý vzorek připraven a následně umístěn do klimatické komory, nebo byl zatížen jiným způsobem (viz např. poničená fólie). Vždy se vycházelo z předpokladu, že čisté vzorky jsou shodné a mají tudíž stejné vlastnosti. Z principu měření nebylo ani možné použít jeden vzorek 2x. Proto se optické a mechanické vlastnosti každého zvlášť vyhodnoceného vzorku porovnávaly se změřenými čistými vzorky A a B. Následuje výčet zkoumaných zatížených fólií.

Zatížené fólie: X značí vzorky vybrané ze základních fólií. Značení před X představuje vždy jeden ze zátěžových testů. DA tedy značí poničenou fólii A a DB značí poničenou fólii B.

- **Fólie DX** – mechanicky poničená fólie.
- **Fólie HTX** – fólie zahřátá na zvýšenou teplotu (+70 °C).
- **Fólie LTX** – fólie zchlazena na nízkou teplotu (-18 °C).
- **Fólie UVX** – fólie vystavena UV záření.
- **Fólie HX** – fólie vystavena vlhkému prostředí.
- **Fólie SX** – fólie vystavena slanámu prostředí.

Nejprve bude popsáno sestavení experimentu a zvolené parametry měření postupně pro optické a následně pro mechanické vlastnosti. Poté budou popsány zátěžové testy s tím, že na zatížených vzorcích byla provedena měření se stejnými zvolenými parametry. Jediným rozdílem byly tedy degradované vzorky.

3.1. Optické vlastnosti

Nejprve bude popsána příprava vzorků a průběh optických experimentů. Těm (a hlavně spektrální odraznosti) byla přiřazena v určování vlastností fólií nejvyšší priorita.

3.1.1. Příprava vzorků pro optická měření

Příprava vzorků pro optická měření byla po vymyšlení uchycení vcelku nenáročná. Byly k tomu zapotřebí 2 tuby (osvědčily se ACC long a tuba z jeleního loje), které do sebe zapadaly a zároveň mezi sebou měly minimum prostoru. Vhodně velký vzorek fólie byl položen na plnou tubu s menším průměrem a opatrně, aby nedošlo k poškození vzorku, na něj byla nasazena druhá tuba (s větším průměrem). Ta nebyla uzavřená. Pokud byl postup vykonán správně, bylo docíleno napnuté fólie, která byla na malé kruhové ploše odkrytá. Jinými slovy v místě, kde byla měřena. S takto připraveným vzorkem byla velmi jednoduchá a dobrá manipulace a nebyl tudíž žádný problém provést potřebná měření. Příprava viz obrázek 42.



Obrázek 42 | Fotografie postupné přípravy vzorku. Vlevo připravené tuby se vzorkem. Uprostřed začátek nasouvání na tubu a vpravo připravený vzorek.

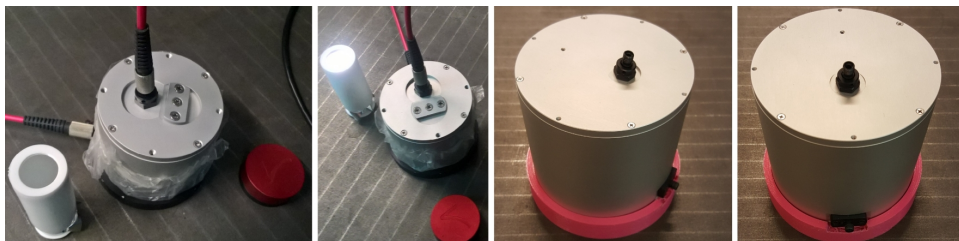
3.1.2. Spektrální odraznost

Spektrální odraznost byla měřena pomocí **integrační koule** a spektrometru. Teorie k ní byla popsána v kapitole 2.1.1. Jelikož se měří odraznost vzorku, byla použita sestava pro odrazné povrchy podle obrázku 30b. Fotografie referenčního vzorku od firmy Avantes je na obrázku 43. Na obrázku 44 lze vidět fotografie používaných integračních koulí spolu s měřeným vzorkem a v krabičce schovaným referenčním vzorkem. Na integračních koulích jsou vidět 2 porty. Jeden vstupní a druhý výstupní. V obou portech jsou napojená optická vlákna (červená). V případě druhé integrační koule jsou vlákna na fotce odpojena. Horním vstupním portem je do integrační koule přiváděno světlo z xenonové lampy **Lamp Bulb, 200W Mercury-Xenon (HgXe)** s výkonem 151-500 W a se spektrální šířkou od UV do IR oblasti, která je uschována v komoře **LSH302** (více lze dohledat v [38, 39]). Takto je osvětlován měřený / referenční vzorek pod integrační koulí, kde se nachází jeden z výstupních portů. Druhý výstupní port se nachází na spodu integračních koulí. Všechno odražené záření je v integrační koulí sesbíráno a optickým vláknem dopraveno do spektrometru **AvaSpec-2048-2** od firmy Avantes. Specifikace spektrometru lze dohledat v [40].



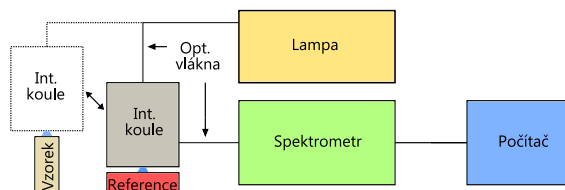
Obrázek 43 | Fotografie referenčního vzorku používaného při všech měřeních.

Samotné měření probíhalo v několika krocích. Nejdříve byly připraveny 3 vzorky stejné fólie. Tím bylo docíleno objektivnějšího určení odraznosti a ověření si její správnosti. Každý z těchto vzorků byl proměřen 10x a výsledky z těchto 10 měření byly zprůměrovány. Celkově tedy byla každá fólie **změřena 30x**. **Integrační doba** byla 5 ms (tak, aby byl pokryt plný rozsah spektrometru a co nejlepší poměr signálu k šumu) a průměrně bylo uděláno **50 scanů**. Spektrum vlnových délek bylo stanoveno na oblast viditelného a infračerveného záření s malým zásahem do ultrafialového. Konkrétně šlo o hodnoty **od 300 nm do 1000 nm**. Měření samozřejmě předcházelo naměření pozadí, které bylo od měření vzorků odečteno, aby nebylo počítáno s nesprávnými hodnotami. Pro objektivnější měření byly použity dvě různé integrační koule. Průběh odraznosti by neměl být závislý na použitých integračních koulích ani na zdroji světla.



Obrázek 44 | Fotografie Integrační koule spolu s měřeným vzorkem a referenčním vzorkem v krabičce.

Laboratorní schéma měření na integrační kouli je schematicky znázorněno na obrázku 45. Tečkovaná a plná integrační koule značí střídání pozic nad referenčním a měřeným vzorkem.



Obrázek 45 | Laboratorní schéma pro měření spektrální odraznosti.

3.1.3. Rozptylové Vlastnosti

Rozptylové vlastnosti byly měřeny na **rozptyloměru CASI** teoreticky popsaném v kapitole 2.1.2. Pro účely této diplomové práce, kde jsou proměřovány vlastnosti pro odraznost, byla zvolena geometrie pro odrazné vzorky. Detektor tedy neopisoval celou kružnici, ale pouze její polovinu (předpoklad nulové propustnosti, který byl mimo jiné splněn způsobem uchycení vzorku). Pro měření byl použit laserový svazek s **vlnovou délkou 632,8 nm**, který dopadal na vzorek pod **úhlem 8°**. V první řadě bylo zapotřebí naměřit tzv. **signaturu**, neboli pozadí samotného přístroje. Ta je následně zohledněna při vyhodnocování výsledků z měření. Po změření signatury je nutné správně upevnit vzorek a umístit ho do středu kružnice, kterou opisuje detektor (viz obrázek 46). To se dá zkontrolovat otáčením uchyceného vzorku. Stopa laseru by se měla držet ve středu rotace. Když je vzorek ve správné pozici, je nutné jeho pootočením naměřit odražený svazek co nejpřesněji do středu detektoru. Ten je nastaven v pozici spekulárního odraženého svazku 16° od zdroje (2x 8°). K tomu se používá funkce v softwaru, díky které je zjištěna energie dopadající do detektoru. Nejprve se však použije clonka k prvotnímu ručnímu vycentrování rozptýleného svazku. Pod clonkou se nachází samotné apertury. Clonka je na pravé fotce ponechána z důvodu viditelnosti rozptylu. Pod clonkou v samotném detektoru je několik apertur. K vycentrování spekulárního svazku se používá ta nejmenší a ke snímání energie paprsků rozptýlených pod největším úhlem a naměření tzv. **total signal** ta největší. Čím více se potom detektor blíží ke spekulárnímu paprsku, tím menší apertury se používají. K tomu je napsaný program, který využívá software, který v průběhu měření mění apertury podle množství energie, které do detektoru dopadá. Tím je zajištěno co nejpřesnější měření.



Obrázek 46 | Fotografie připraveného měření rozptylu. Vlevo pohled na celý systém, uprostřed detail na vzorek, vpravo pohled na celý systém z druhé strany včetně zdrojového laseru.

3.2. Mechanické vlastnosti

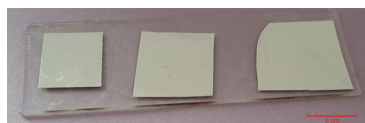
Obdobně jako u optických vlastností, i zde je nejprve popsána příprava vzorků, která se od prvního případu drasticky liší. Poté bude popsáno měření na nanoindentoru, kde proběhly všechny testy mechanických vlastností.

3.2.1. Příprava vzorků pro mechanická měření

Oproti přípravě vzorků pro optická měření byl zde naprosto opačný trend. Předtím bylo nejtěžší vymyslet princip a provedení již bylo jednoduché, avšak tady je tomu právě naopak. Bylo jisté, že se vzorek musí nalepit na laboratorní sklíčko. Ovšem postup byl značně problematický. Ideálním případem totiž bylo, aby nalepený vzorek splňoval následující vlastnosti. Aby byl nalepen na co nejtenčí vrstvě lepidla, aby vrstva lepidla bylo co nejvíce homogenní, aby vzorek na vrstvě lepidla držel co nejpevněji. Vyzkoušelo se několik druhů lepidel, ale nejlepší výsledky dávalo lepidlo sekundové. Posledním krokem ke kvalitně nalepenému vzorku bylo vypilovat techniku nanášení lepidla a samotného vzorku. Tady se nejvíce osvědčil následující postup.

1. Příprava náčiní. Ostré nůžky, pinzeta, sekundové lepidlo, podložní papír a proužek papíru navíc, laboratorní sklíčko a samotný vzorek.
2. Obkreslení sklíčka na papír, kde si lze dělat poznámky o vzorcích, než se popíšou na laboratorním sklíčku.
3. Pomocí pinzety (aby nedošlo k ušpinění vzorku) a nůžek ustříhnout vhodně velký vzorek. Ten je třeba mít po ruce.
4. Nyní je třeba nanést vrstvu lepidla na papír a co nejvíce rovnoměrně ji rozetřít proužkem předem připraveného papíru.
5. Nyní je klíčové jednat rychle. Pomocí pinzety nabrat připravený vzorek a otřít jej o rozetřenou vrstvu lepidla.
6. Poté, co je na spodní straně vzorku nanášeno lepidlo, je posledním krokem připevnit vzorek na sklíčko. Pinzetou tedy přiložíme na sklíčko jednu hranu vzorku a zbytek na sklíčko postupně položíme tak, aby vzniklo co nejméně vzduchových bublin (je dobré si pomoci foukáním na vzorek).
7. Nyní počkáme, než vzorek zaschne a pinzetou otestujeme pevnost nalepení.

Pokud se nalepení vzorku povedlo, je žádoucí na stejné sklíčko nalepit ještě 2 vzorky. Měření na nanoindentoru zabere nějaký čas a není proto žádoucí, aby se měření nastavovalo po každém vzorku znovu, ale aby se nastavilo pro co nejvíce vzorků najednou. Na obrázku 47 jsou připravené tři vzorky k testům.



Obrázek 47 | Fotografie tří nalepených fólií na laboratorním sklíčku.

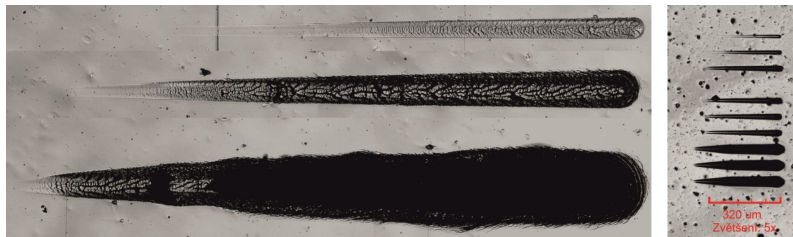
I správně připravené vzorky, které na oko vypadají v pořádku, nemusí být v konečném důsledku měřitelné. Před měřením ještě přichází kontrola na mikroskopu, kde se vyhraní místo, kde mohou být vrypy provedeny. Ukázka takové "mapy" je na obrázku 48. Lze si povšimnout, že některá místa jsou značně nerovná, a dokonce se párkrát objevily i vzduchové bublinky. Na takových místech by měření nedalo správné výsledky.



Obrázek 48 | Ukázka kontroly před měřením. Vhodná jsou pouze místa s plynulou vrstvou lepidla a bez vzduchových bublin.

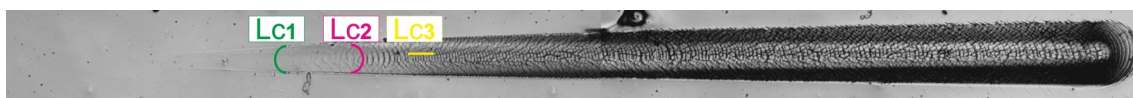
3.2.2. Nanoindentace a vrypové zkoušky

Poté, co byly vzorky připraveny k měření, následovalo nastavení NanoTestu (popsaném v 2.2.3). I zde je několik parametrů, při kterých může měření probíhat. Nejdůležitějším z nich je **zátěžná síla** (v jednotkách mN). Je důležité zvolit zátěžnou sílu vhodně, aby měření dalo smysluplné výsledky. Pro nanoindentaci byla zvolena **zátěžná síla 0,20 mN** . S takovou hodnotou bude poskytnuta informace převážně o ochranné vrstvě (což je žádoucí). Co se týče vrypové zkoušky, byly vyzkoušeny 3 hodnoty zátěžné síly. Na obrázku 49 je jejich srovnání.



Obrázek 49 | Vlevo: porovnání vrypů ST při zátěžných silách 30 mN 100 mN a 400 mN (postupně shora dolů). Vpravo: přehledový obrázek vrypů.

Jak je zde vidět, při 400 mN by šlo z měření jen těžko něco vyčíst, protože vrstva je zničena velice rychle na to, aby se dalo mluvit o nějakém kvalitativním vyhodnocování. Proto byly zvoleny **zátěžné síly** pouze 30 a 100 mN . Touto zátěžnou silou se myslí maximální dosažená síla při ST. Pro zkoušky MPWR se typicky volí maximální síly nižší, než jsou kritické zátěže. V tomto případě byla zvolena **maximální síla 10 mN** , které je při MPWR testu dosaženo velice rychle a následnými opakováními se testuje abrazivní opotřebení vrstev. Dalším parametrem je **vzdálenost vrypů**. Ta musí být brána v potaz kvůli ovlivňování jednoho vrypu druhým vlivem deformace vrstvy. Pro tyto účely postačilo 75 μm . Nakonec bylo nastaveno snímání topografie povrchu v místech vrypů vždy před a po samotném vrypu. Díky tomu je zjištěna informace o hloubce vrypu. Snímky byly pořízeny na konfokálním mikroskopu Olympus LEXT OLS 3100. Na nich byla provedena analýza vrypů, kde byly stanoveny 3 kritické zátěžné síly (LC – load critical), které byly díky znalosti délky vrypu a experimentálních hodnot následně převedeny na konkrétní hodnoty síly. Ukázka takového grafického vyhodnocení je na obrázku 50.



Obrázek 50 | Ukázka vyhodnocení kritických zátěžných sil. Barevné značení bude vždy stejné: LC1 – zelená, LC2 – růžová, LC3 – žlutá.

LC1 značí praskliny, které mají polokruhový tvar a míří proti směru vrypu. Jsou to **tahové praskliny** (*tensile cracks*) způsobené v důsledku tření. Ty se vždy objevovaly jako první a vyskytovaly se u všech typů fólií, což byl důvod, proč se hledal právě tento trend. Nejdůležitější druhá prasklina, označena jako LC2, má stejný tvar jako LC1, avšak s opačnou orientací a vždy se objeví až jako druhá (opět u všech vzorků). Jde o **konformální praskliny** (*conformal cracks*), které vznikají v důsledku ohybového namáhání. Vrstva sleduje deformaci substrátu, který se pod zátěžnou silou prohýbá. Poslední typ prasklin je prasklina podélná, kde dochází k plastické deformaci. Ta je označena jako LC3.

3.3. Zátěžové testy

Po naměření nezátížených vzorků přišly na řadu zátěžové testy. Ty byly vždy realizovány za jiných podmínek, ale po stejnou dobu (výjimku tvoří mechanické poničení). Vždy v každém testu byl připraven čistý vzorek fólie A a fólie B, které byly společně (aby bylo docíleno stejných podmínek) vloženy do klimatické komory nebo jinam podle potřeby. Následně, po dobu třiceti dnů, byly vzorky vystaveny jednomu z atmosférických vlivů. Třicetidenní interval byl zvolen z toho důvodu, aby se všechna měření stihla v čase vymezeném na vypracování diplomové práce. Navíc, třicet dní se zvýšenými zátěžnými podmínkami už poskytne informaci, ze které se dají usoudit závěry o tom, jak se v daném prostředí budou vzorky chovat. Vždy po ukončení každého testu byly

vzorky proměřeny stejným způsobem jako vzorky čisté. Všechny provedené testy jsou popsány níže.

Klimatická komora: většina testů proběhla klimatické komoře (viz. obrázek 51), která vznikla jako produkt diplomové práce na katedře experimentální fyziky za účelem testování stárnutí plastů. Komora je sestavena z plexiskla a několika dalších přídatných zařízení na regulaci teploty, vlhkosti a UV záření. Pro regulaci teploty jsou v komoře IR žárovka a topné těleso (**polovodičové relé QLT POWER SSR-1028RD3**). Teplota je snímána pomocí **sondy SENSIT TR141B-40**, s **teplotním čidlem Pt100**. Pro účely této diplomové práce stačila teplota $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, čehož s parametry žárovky a tělesa nebyl problém dosáhnout. Co se týče UV světla, je v komoře nainstalována **fluorescenční zářivka typu T8** s výkonem 18 W a délkou 58 cm . Ta svým zářením dobře simuluje záření ze Slunce. A nakonec, vlhkost je řízena **piezoelektrickým ultrazvukovým rezonátorem RESUN – Mist maker MM-01**, který pod hladinou vody generuje mlhu. Ta se následně trubící dopravuje do komory, kde je poté snímána **snímačem relativní vlhkosti LinPicco™ A05 Basic** s nejistotou měření menší než 3% . Více se dá o zkonstruované klimatické komoře dočíst v diplomové práci Mgr. Antonína Opíchala [41].



Obrázek 51 | Fotografie klimatické komory, ve které probíhaly zátěžové testy.

3.3.1. Poničení

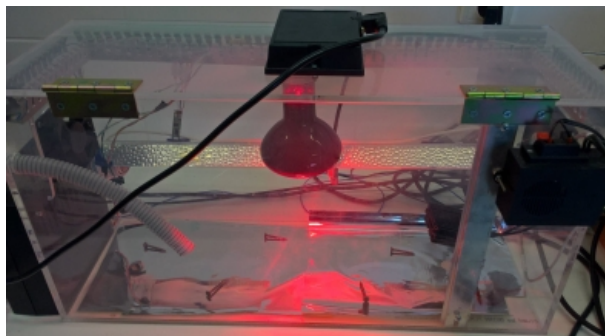
Poničení je jediný ze zátěžových testů, který byl vyhodnocen ihned a nebylo k němu třeba čekat třicet dní. Šlo o mechanické zmačkání vzorků (a s tím související částečné ušpinění). Po zmačkání se na fólii objevily rýhy, které by následně vedly k další degradaci (vlivem oxidace hliníkové vrstvy pod poškozenou ochrannou vrstvou). Je zřejmé, že v rýhách již nebude vzorek světlo odrážet, minimálně ne s maximální efektivitou. U tohoto typu vzorků byla měřena pouze spektrální odraznost. Rozptýl by byl závislý čistě na místě, kde by byl zaměřený laserový svazek a nedal by objektivní informaci o celé ploše. Obdobně je tomu u mechanických testů, které ze stejného důvodu u poničených vzorků neproběhly. Fotografie je na obrázku 52.



Obrázek 52 | Fotografie poničené fólie pro měření spektrální odraznosti. Vlevo celý vzorek, vpravo detail.

3.3.2. Zvýšená teplota

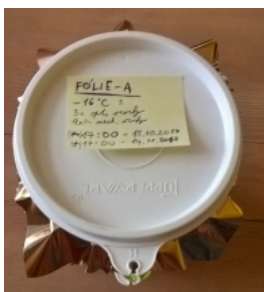
U zátěžového testu se zvýšenou teplotou byly vzorky vystaveny po dobu třiceti dnů teplotě $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Celý test probíhal v klimatické komoře za použití kombinace IR žárovky a topného tělesa. Vzorky byly položeny na spodu klimatické komory (jak ukazuje obrázek 53), aby bylo dosaženo co nejrovnoměrnějšího rozložení teploty. Specifické vzorky pro optická a mechanická měření byly připraveny až po ukončení zátěžového testu.



Obrázek 53 | Fotografie průběhu zátěžového testu zvýšené teploty.

3.3.3. Nízká teplota

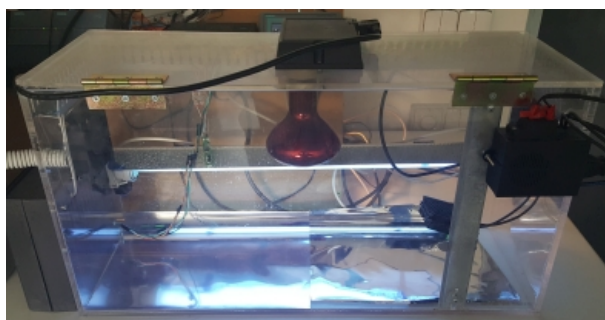
Vzorky byly ponechány po dobu třiceti dnů v mrazáku s teplotou přibližně $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Aby nedošlo k poškození vzorků, byly umístěny odděleně v krabičkách. Větší vzorky pro optická měření byly nataženy a uchyceny víčkem krabiček. Menší připravené vzorky pro mechanická měření byly poskládány na sobě, vždy odděleny čistým kusem papíru, aby nedošlo k poškození. Vyfocená krabička se vzorky uvnitř je na obrázku 54.



Obrázek 54 | Fotografie průběhu zátěžového testu snížené teploty (menší vzorky pro mechanická měření jsou uvnitř).

3.3.4. UV záření

U zátěže UV zářením byly vzorky ponechány v klimatické komoře obdobně jako při testu zvýšené teploty. Vzorky byly obdobně jako u předchozího případu rovnoměrně rozprostřeny na spodu klimatické komory (viz obrázek 55). Cílem bylo dosáhnout ideálně homogenního osvětlení, opět po dobu třiceti dnů. Regulace lampy je prováděna v % maximálního výkonu. Jelikož jde o zátěžové testy, bylo žádoucí zvolit co nejvyšší výkon, tedy rovných 100 %. Zátěžový test by tedy měl odpovídat třiceti solárním dnům. Příprava vzorků na následné měření proběhla opět až po skončení zátěžového testu, kde byly vzorky ještě v jednom kuse.



Obrázek 55 | Fotografie průběhu zátěžového testu UV zářením.

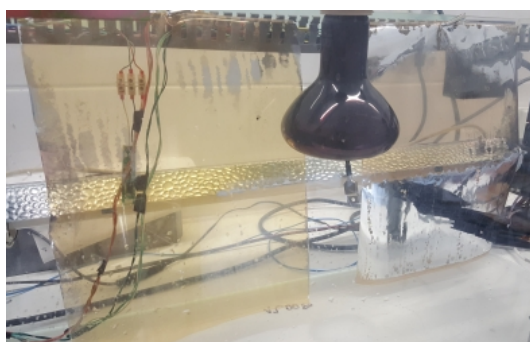
3.3.5. Vlhkost

Test vlhkosti proběhl opět v klimatické komoře, ovšem s jedním menším rozdílem. Fólie nebyly položeny na dně jako u předchozích měření, aby se předešlo hromadění vody na vzorcích. Místo toho byly pověšeny svisle u zadní strany klimatické komory tak, jak je to ukázáno na obrázku 56. Na obrázku vpravo je také ukázáno uchycení pomocí kolíčku, kterým se sice obětoval kousek vzorku, avšak použitelný zbytek byl dostatečně velký na to, aby byl následně řádně proměřen. Míra vlhkosti byla nastavena na maximální možnou hodnotu relativní vlhkosti 100 %. Je dobré podotknout, že pro měření byla použita destilovaná voda. A to z důvodu, aby nedošlo k poškození samotné klimatické komory a jejích komponentů.



Obrázek 56 | Fotografie průběhu zátěžového testu zvýšené vlhkosti vlevo. Vpravo ukázka uchycení.

Konec zátěžového testu zvýšené vlhkosti: je na vyfocen na obrázku 57, kde je okem viditelná degradace ochranné a odrazné vrstvy. Odrazná vrstva má stříbrnou barvu. Ta už je vidět pouze na některých místech fólií. Ve zbytku plochy, kde je vidět pouze průhledná zlatá vrstva, se již odrazná vrstva nevyskytuje (zbyl tady pouze mylar). Tyto vzorky nemá smysl dále měřit, neboť měření jsou závislá na odrazné ploše a pro aplikace je odrazná plocha nutností. Závěrem z tohoto zátěžového testu se tedy dá říci, že fólie nejsou vhodné pro dlouhodobé působení ve vlhkých oblastech.



Obrázek 57 | Fotografie konce zátěžového testu zvýšené vlhkosti. Zlatá průhledná plocha vzorku značí chybějící hliníkovou vrstvu. Vlevo fólie B a vpravo fólie A.

3.3.6. Salinita

Test salinity (neboli slanosti) měl proběhnout také v klimatické komoře obdobně jako test vlhkosti. S tím rozdílem, že by se použila slaná voda, která by byla opět měněna na mlhu a hnána do komory, kde by se nacházel vzorek. Z pohledu uživatelů fólie to měl být velmi důležitý test (kvůli plánovanému užití SkyFlower® v přímořských oblastech se slaným prostředím), avšak nakonec k němu nedošlo, neboť již test vlhkostí dal takové výsledky, že salinitu nemělo smysl měřit, a výsledek se dal odhadnout. Viz. obrázek 57.

4. Výsledky a diskuse

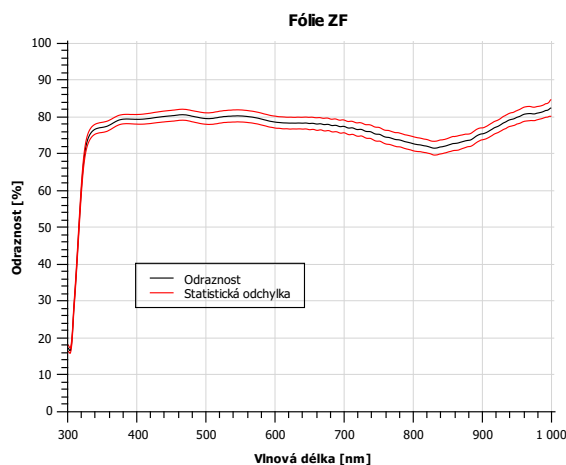
V této kapitole budou komentovány výsledky všech měření. Systematicky k sobě budou řazeny vzorky, které prošly stejnými zátěžovými testy, aby bylo možné takto zatížené vzorky porovnávat. Opět postupně od optických vlastností po vlastnosti mechanické. Nakonec budou srovnány všechny zátěžové testy spolu se vzorky čistými, aby byla vidět případná degradace. Sekce 4.1 bude věnována **odraznosti** měřených vzorků. Budou představeny zpracované a okomentované grafy z měření. V další sekci (4.2) budou řešeny **rozptylové** vlastnosti měřené na stejných vzorcích (tentokrát jich ovšem bude méně, protože ne všechny splňovaly požadavky na odraznost) a opět budou srovnány jak fólie A s fólií B, tak vzorky degradované. Nakonec, v sekci 4.3, 4.4 a 4.5, budou komentovány mechanické vlastnosti vzorků. Zde se bude jednat o nanoindentaci, ze které budou zjištěny **modul pružnosti** a **tvrdost**. Následně budou popsány výsledky z vrypové zkoušky, kde budou stanoveny **kritické zátěžné síly** a na samém konci okomentované testy MPWR.

4.1. Spektrální odraznost

Jak již bylo prohlášeno v kapitole 3, ty vzorky, které nebudou splňovat postačující podmínky odraznosti (mnou stanovené), nebudou dále měřeny. Nejprve budou proto okomentovány právě tyto vzorky a až poté ty ostatní, které budou řešeny i v dalších sekcích. V celé sekci 4.1 budou graficky znázorněny průběhy závislosti spektrální odraznosti na vlnové délce. Pro přehlednost budou vedle sebe vždy vykresleny vzorky fólie A a fólie B podrobené stejnému zátěžovému testu. Na konci kapitoly bude srovnání všech zátěžových testů. U jednotlivých grafů, znázorňujících průběh jednoho vzorku, budou vždy změřené a ze všech měření zprůměrované hodnoty odraznosti vyobrazeny černě. Červeně budou vykresleny chybové křivky. Procentuální rozsah odraznosti je u všech grafů 50-100 % (s výjimkou vzorků záchranářských fólií a zlaté strany fólie A/B, kde je rozsah zvolen v rozmezí 0-100 %, aby byl vidět celý průběh). Je zřejmé, že každý materiál má rozdílnou odraznost pro různé vlnové délky. Proto je klíčové zvolit vhodný interval spektra. Pro účely zařízení SkyFlower® je ideální počítat s viditelným, popřípadě blízkým UV zářením (křemíkové fotovoltaické články mají při těchto energiích nejvyšší účinnost). Ovšem druhá věc, na kterou se musí brát zřetel, jsou dostupné zdroje (světelný zdroj). S použitou laboratorní sestavou byl rozsah spektra stanoven na 300-1000 nm, kde je pokrytá cílená oblast. Zpracování v této kapitole bude grafické s průměrnými hodnotami v tabulkách. Data budou dále zpracována v kapitole 5, kde bude kvantifikována celková účinnost.

4.1.1. Fólie ZF

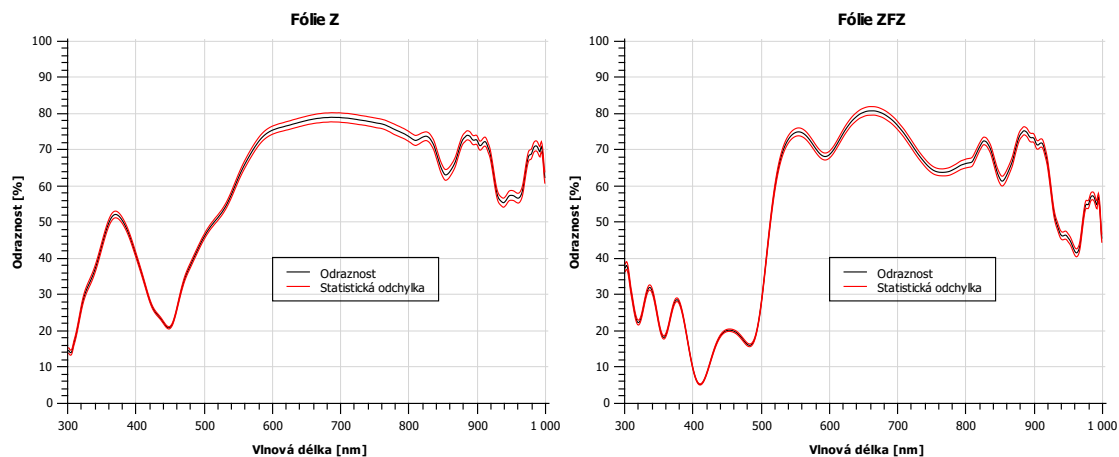
Jako první vzorek bude popsána **záchranářská fólie**. Graf s vynesenými hodnotami je na obrázku 58. Tam je vidět, že postupem z viditelného spektra do UV oblasti rapidně klesá odraznost. Také maximální dosažená odraznost je i s ohledem na chybové křivky přibližně 80 %. V ostatních částech spektra je nižší. Se stanovenými podmínkami pro celý průběh spektra s odrazností vyšší než 80 % je jasné, že záchranářská fólie nepostačuje potřebám. Proto byla z dalších měření vyřazena a u srovnání degradace se také nebude vyskytovat.



Obrázek 58 | Závislost spektrální odraznosti na vlnové délce fólie ZF.

4.1.2. Fólie Z a fólie ZFZ

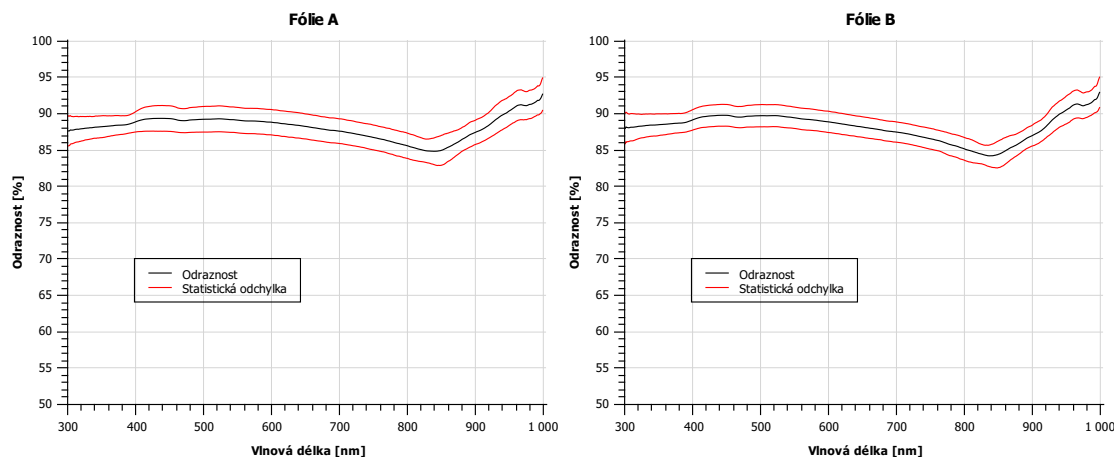
Dalšími vzorky, které neprošly přes stanovená kritéria jsou **zlaté strany fólií** (obrázek 59). Jedná se jak o zlatou stranu fólií A, B (označené písmenem Z), ty mají stejné složení a tedy i stejný průběh odraznosti obsažený pouze v jednom grafu, a o zlatou stranu záchranářské fólie označenou písmenem ZFZ. U těchto vzorků je vidět značně nesymetrický průběh, kdy maximálních hodnot dosahují v oblasti viditelného, případně na hranici infračerveného světla. U obou vzorků je maximální hodnota odraznosti cca 80 %, ale to je jen pro velmi malou část spektra. Ve zbytku, který tvoří většinu, je odraznost nižší a v některých oblastech je dokonce nižší než 50 % (zejména u fólie ZFZ). S takovými výsledky nemělo smysl tyto vzorky podrobovat dalším testům.



Obrázek 59 | Závislost spektrální odraznosti na vlnové délce fólie Z a ZFZ.

4.1.3. Fólie A a fólie B

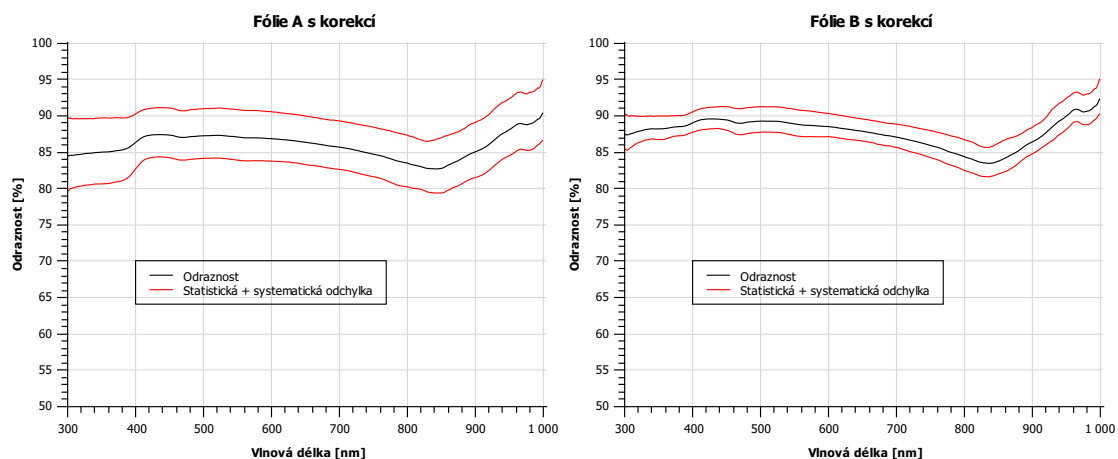
Nyní ke vzorkům, které dávají výsledky hodné dalších měření. Tedy **fólie A** a **fólie B** na obrázku 60. Jejich složení je popsáno v kapitole 1.4.4. Základní kritérium bylo neklesnout pod hranici odraznosti 80 %, což se u obou vzorků podařilo v celém spektru s rezervou přibližně 5 %. Nejnižší hodnoty jsou v bezprostřední blízkosti 840 nm, kde se odraznost dostala pod hranici 85 %. Zde nastává zlom, kdy průběh s klesající tendencí přechází na rostoucí. Největší pozornost je věnována spektru pro viditelné světlo, (nejvyšší intenzita vyzařování Slunce). V této oblasti se průběh odraznosti dostává do lokálního maxima, což je žádoucí pro reálná využití.



Obrázek 60 | Závislost spektrální odraznosti na vlnové délce fólie A a B.

Na obrázku 60 jsou změřené klasické průběhy vzorků. Pro ověření správnosti tohoto měření

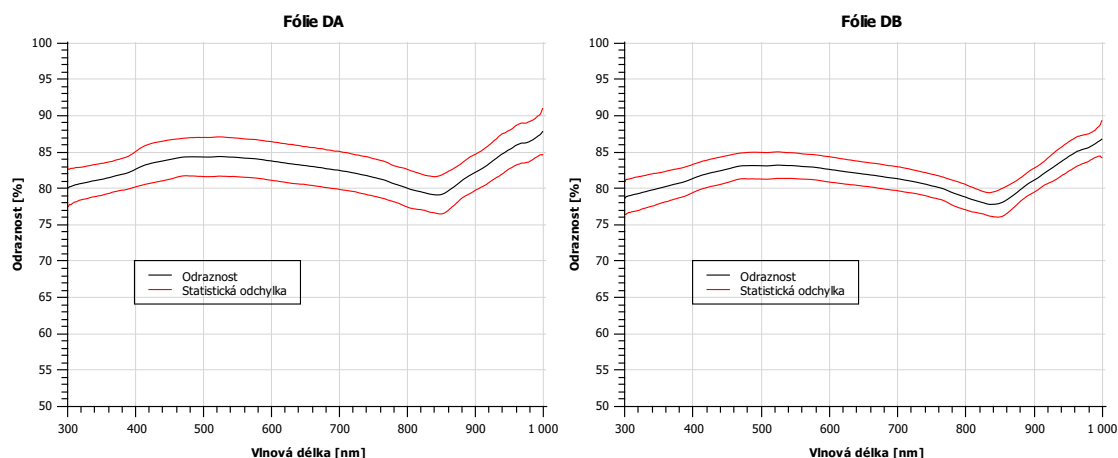
(měření čistých nezatížených vzorků považují za nejdůležitější) byly fólie A a B změřeny ještě jednou pomocí nových měřicích zařízení. Opět byly změřeny čisté vzorky uschované v pokojové teplotě a kryté proti okolním vlivům. Nové výsledky byly opět zprůměrovány a následně i zprůměrovány s výsledky předešlými. To způsobilo posun křivek odraznosti a zavedlo do měření systematickou chybu, která se projevila rozšířením nejistot. Výsledné grafy jsou zobrazeny na obrázku 61. U fólie A je patrné rozšíření chybových křivek a posun odraznosti k nižším hodnotám. U fólie B jsou již tyto změny menší, avšak přesto nezanedbatelné. Takový výsledek naznačuje, že fólie B je stálejší v čase a méně se na ní projevují účinky degradace (měření proběhlo několik měsíců po prvním). Z toho se dá usoudit, že ochranná vrstva na fólii B je kvalitnější.



Obrázek 61 | Závislost spektrální odraznosti na vlnové délce fólie A a B.

4.1.4. Fólie DA a fólie DB

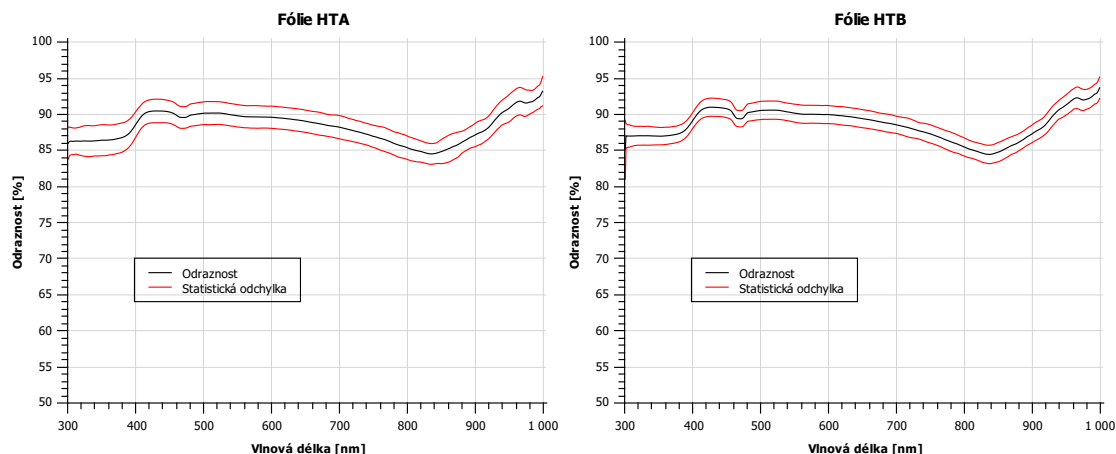
Ze zátěžových testů bude jako první komentováno mechanické poničení čili **fólie DA** a **fólie DB**, jejichž průběh odraznosti je na obrázku 62. Důvod, proč je právě mechanické poničení uvedeno jako první ze zátěžových testů je takový, že takto poničené fólie se již dále neměřily a nebudou tedy dále řešeny. Z grafů je patrné, že průběh odrazností má velice podobný průběh jako nezatížené vzorky A a B, jen je posunut o přibližných 5 % směrem k nižším hodnotám. Vzorky byly měřeny ihned po deformaci, takže lze očekávat, že poničení ochranných vrstev by způsobilo následnou oxidaci hliníku a odraznost by se neustále snižovala. V tomto případě za snížení odraznosti můžou rýhy v přehybech fólií. Měření po delším časovém úseku by dávalo jen stále nižší hodnoty odraznosti a není momentálně podstatné je detailněji zkoumat, protože mechanickému poškození takového rozsahu, jaký byl zvolen zde, by v praxi nemělo vůbec dojít.



Obrázek 62 | Závislost spektrální odraznosti na vlnové délce fólie DA a DB.

4.1.5. Fólie HTA a fólie HTB

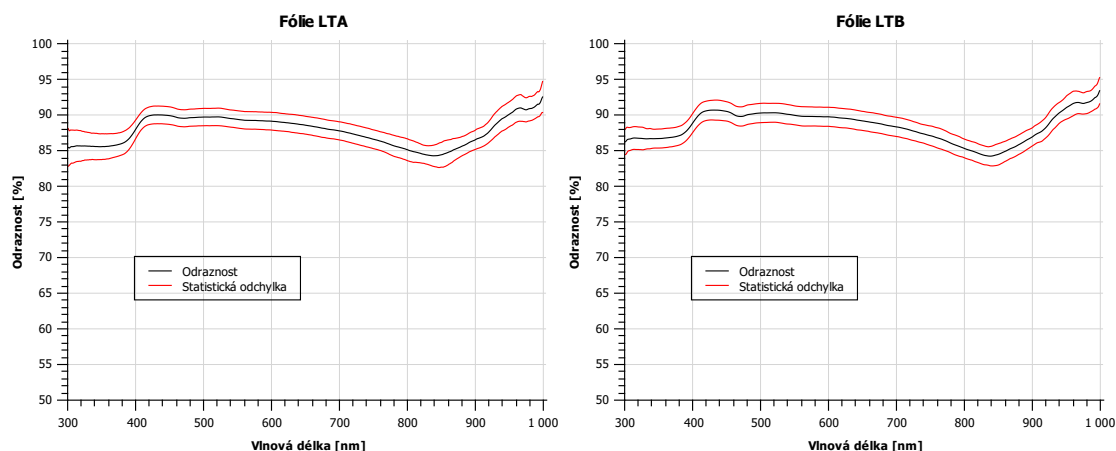
Dalším z provedených zátěžových testů byla zvýšená teplota. Pracovní názvy vzorků jsou **fólie HTA** a **fólie HTB**. Průběh odraznosti těchto vzorků je vyneseno na obrázku 63 a je podobný nezátěženým vzorkům. Rozdíl tvoří výstupek u nižších vlnových délek v intervalu 400-470 nm. Tento netypický jev nemá žádné fyzikální vysvětlení. Je pravděpodobné, že je způsoben nepřesným měřením integrační koule v UV oblasti. To je usouzeno z důvodu, že u čistých fólií se tento jev neobjevuje, a právě vzorky zatížené zvýšenou teplotou se poprvé měřily novou integrační koulí. Druhou možností je deformace způsobená zátěžovými testy. Ať již dlouhodobé vystavení vzorků vzduchu nebo konkrétní zatížení. Lze si ale povšimnout náznaku podobné změny v průběhu na obrázku 61, kde se u čistých vzorků s poměrně hladkým průběhem také objevil tento výstupek (díky korekčnímu měření novou integrační koulí). Jelikož je tento trend patrný u obou fólií (HTA i HTB), ale i u všech následujících vzorků, dá se říci, že je opravdu způsoben integrační koulí. Zbýlý průběh odraznosti se ve své podstatě shoduje s čistými vzorky, jen s malým % rozdílem.



Obrázek 63 | Závislost spektrální odraznosti na vlnové délce fólie HTA a HTB.

4.1.6. Fólie LTA a fólie LTB

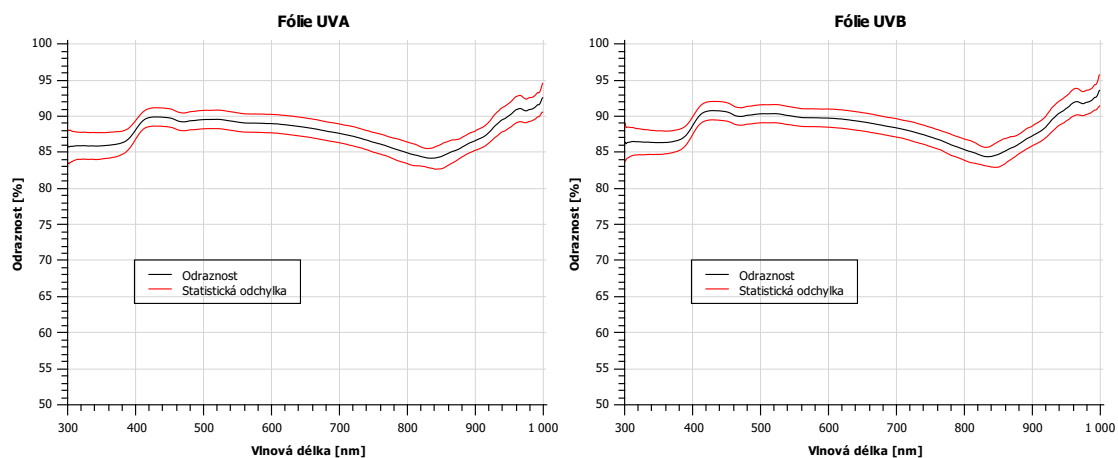
Fólie LTA a fólie LTB jsou dalšími zatíženými vzorky, jejichž odraznost je vyobrazena na obrázku 64. Obdobně jako u předchozích vzorků, i zde se objevila nesrovnalost oproti očekávání na nízkých vlnových délkách. Vysvětlením je opět pravděpodobně nepřesnost v oblasti UV záření způsobená integrační koulí. Zbýlá část průběhu odpovídá očekávání a je kromě opětovného % posunu shodná s průběhem čistých fólií.



Obrázek 64 | Závislost spektrální odraznosti na vlnové délce fólie LTA a LTB.

4.1.7. Fólie UVA a fólie UVB

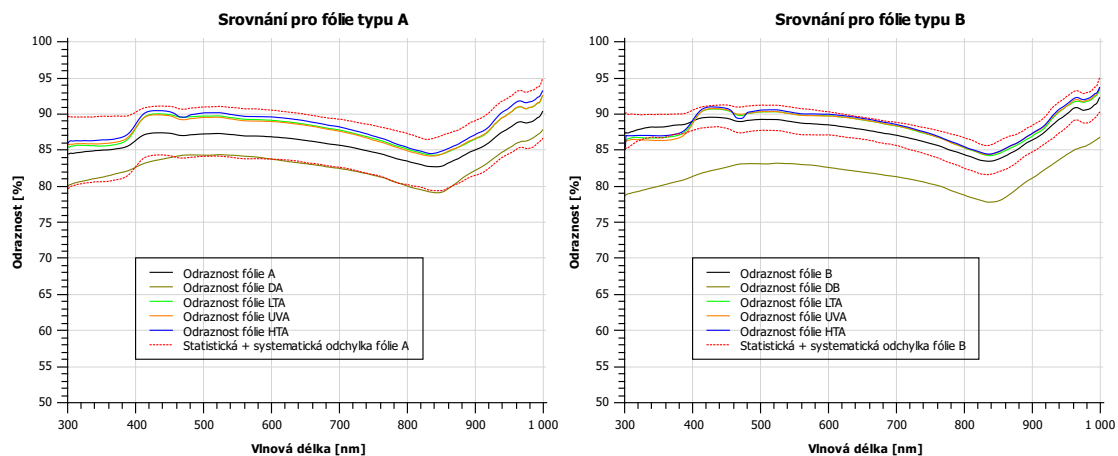
Posledním ze zátěžových testů byl test UV záření. Na obrázku 65 jsou změřené vzorky a vykreslen průběh jejich odrazností. Ten je stejně jako u předchozích případů velice podobný. V podstatě nedošlo k žádným radikálním změnám v porovnání s ostatními zátěžovými testy (nepočítaje test poničení), a proto není potřeba průběh více komentovat.



Obrázek 65 | Závislost spektrální odraznosti na vlnové délce fólie UVA a UVB.

4.1.8. Souhrnné srovnání spektrálních odrazností

V poslední sekci kapitoly shrnující výsledky spektrální odraznosti je uvedeno srovnání podstatných vzorků vložených do jednoho grafu (obrázek 66). Jednotlivé průběhy popsány samostatně výše v této kapitole jsou vyznačeny souvislými čarami. Pro průběh odraznosti čistých vzorků jsou použity hodnoty z obrázku 61, kde je zahrnuto i korekční měření. Odchylka je pro lepší přehlednost vyznačena přerušovaně a odpovídá odchylce čistých vzorků (včetně korekčního měření). V grafech si lze povšimnout téměř shodného průběhu fólií HT, LT, UV, které se vyznačují svou vyšší odrazností oproti čistým vzorkům. Jedná se o navýšení maximálně o 3 %, což z drtivé většiny spadá do rozsahu nejistoty měření. Jedinou výjimku tvoří poničené vzorky, které mají podle očekávání výrazně nižší odraznost.



Obrázek 66 | Závislost spektrální odraznosti na vlnové délce. Srovnání pro všechny podstatné vzorky.

V tabulce 2 a 3 jsou vypsané průměrné odraznosti a k nim průměrné odchylky pro všechny vzorky z obrázku 66. Hodnoty jsou zaokrouhleny na dvě desetinná místa a jedná se pouze o orientační hodnoty (v kapitole 5 je navíc započítána váha pro různé vlnové délky).

[%]	A	HTA	LTA	UVA	DA
Průměrná odraznost	85,9 ± 3,9	88,3 ± 1,7	87,8 ± 1,4	87,8 ± 1,4	82,7 ± 2,6

Tabulka 2 | Orientační hodnoty průměrných odrazností a k nim průměrných odchylek vzorků A.

[%]	B	HTB	LTB	UVB	DB
Průměrná odraznost	87,7 ± 2,1	88,7 ± 1,3	88,4 ± 1,4	88,4 ± 1,4	81,5 ± 1,8

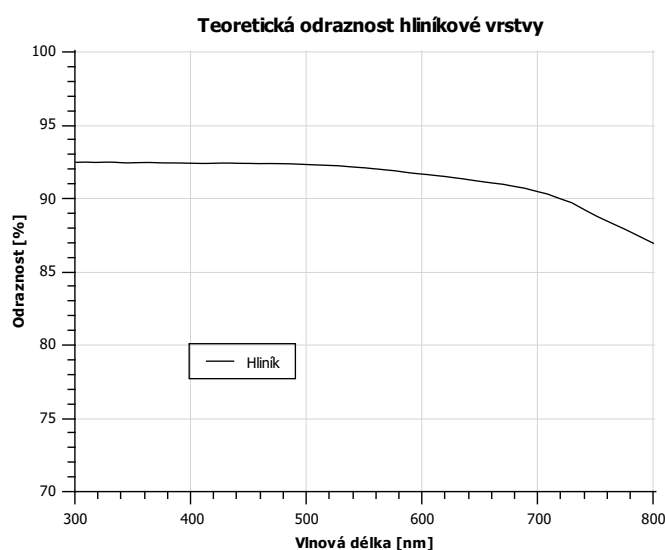
Tabulka 3 | Orientační hodnoty průměrných odrazností a k nim průměrných odchylek vzorků B.

Shrnutí: jednotlivé degradace způsobené třicetidenními zátěžovými testy nemají negativní vliv na spektrální odraznost. Rozdíly v odraznostech jsou z větší části způsobeny nejistotou měření. Ta může být způsobena několika vlivy. První z nich je **natažení vzorku**, které může způsobit odchylku. Další je **vzdálenost vzorku od integrační koule**, dále vliv **dvou lamp a integračních koulí**. Nakonec je zde vliv referenčního vzorku, u kterého závisí na úhlu dopadu paprsků z integrační koule. Celkově je výsledek, kdy nedochází k razantnímu poklesu odraznosti, pro aplikační účely vysoce žádoucí. Co se týče srovnání fólií A a B, tak nejpatrnější jsou 2 rozdíly.

1. Celková vyšší odraznost vzorků B, hlavně v oblasti 400-700 nm. Nejvýraznější je ovšem rozdíl čistých vzorků, kde fólie B dosahuje lepších výsledků v celé šířce spektra.
2. Druhým rozdílem je stálost v čase. To je vidět při porovnání odchylek obou vzorků. To, že je odchylka u fólie A znatelně vyšší, než u fólie B značí, že různá měření dávala rozdílné výsledky. Proto se také dá hodnotám vzorků B více věřit.

Z výše uvedených důvodů dává celkově lepší výsledky fólie B. Ovšem nelze říci, že rozdíly jsou tak podstatné, aby byla fólie A nepoužitelná. Velkou roli hrají vlivy, které zavádí odchylku měření.

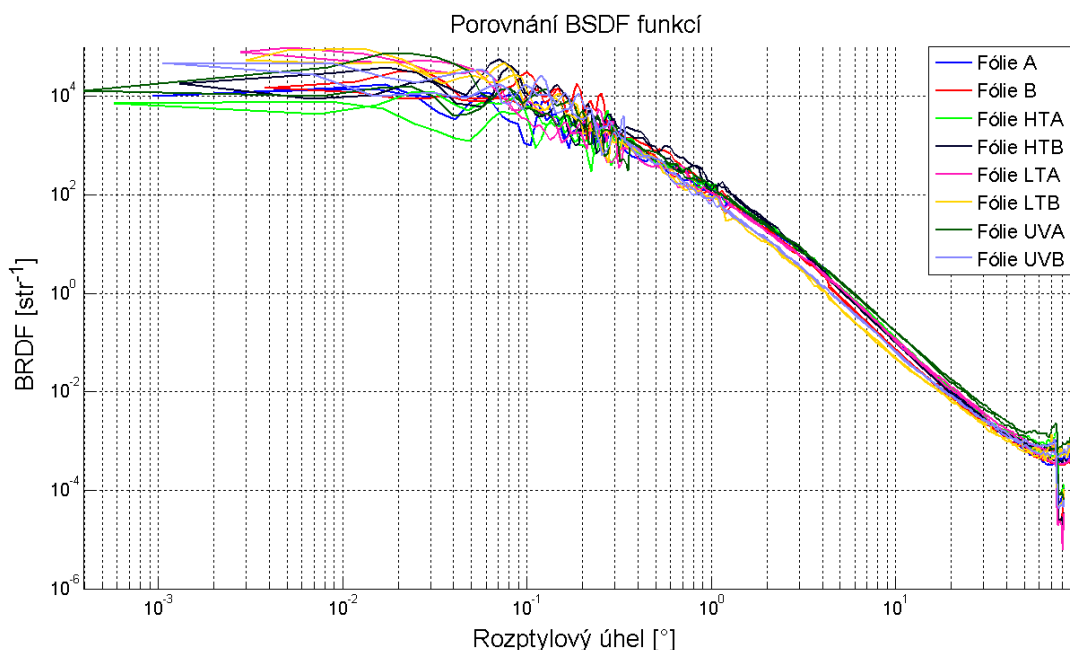
Na úplný závěr je ještě pro názornost ke srovnání uvedena teoretická odraznost hliníkové vrstvy na obrázku 67, která je přibližně 93 % v rozsahu vlnových délek 250-500 nm. Po 500 nm začíná odraznost pomalu klesat.



Obrázek 67 | Teoretická odraznost hliníkové vrstvy.

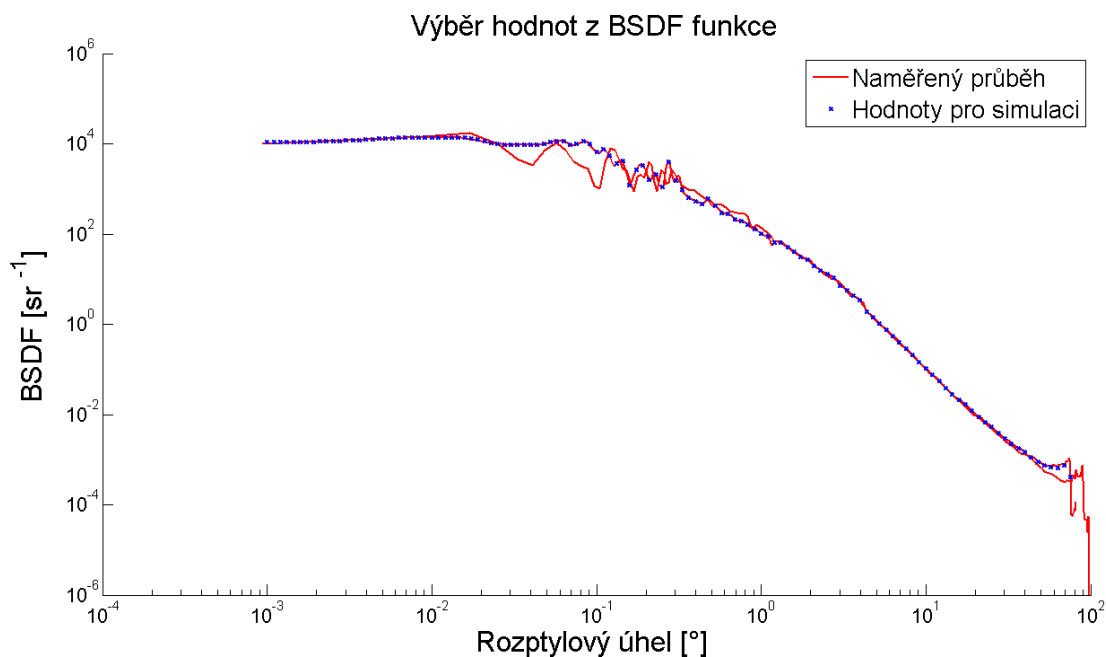
4.2. Rozptylové vlastnosti

V této sekci budou komentovány výsledky získané z měření na rozptyloměru CASI. Z měření rozptylu touto metodou je získána tzv. BRDF funkce komentována již dříve v kapitole 2.1.2. Samotný graf naměřené BRDF funkce říká, jaká je závislost rozptylového úhlu na intenzitě měřeného záření. Srovnání BRDF funkcí všech měřených vzorků je na obrázku 68 a na obrázku 69 pouze pro fólii A.



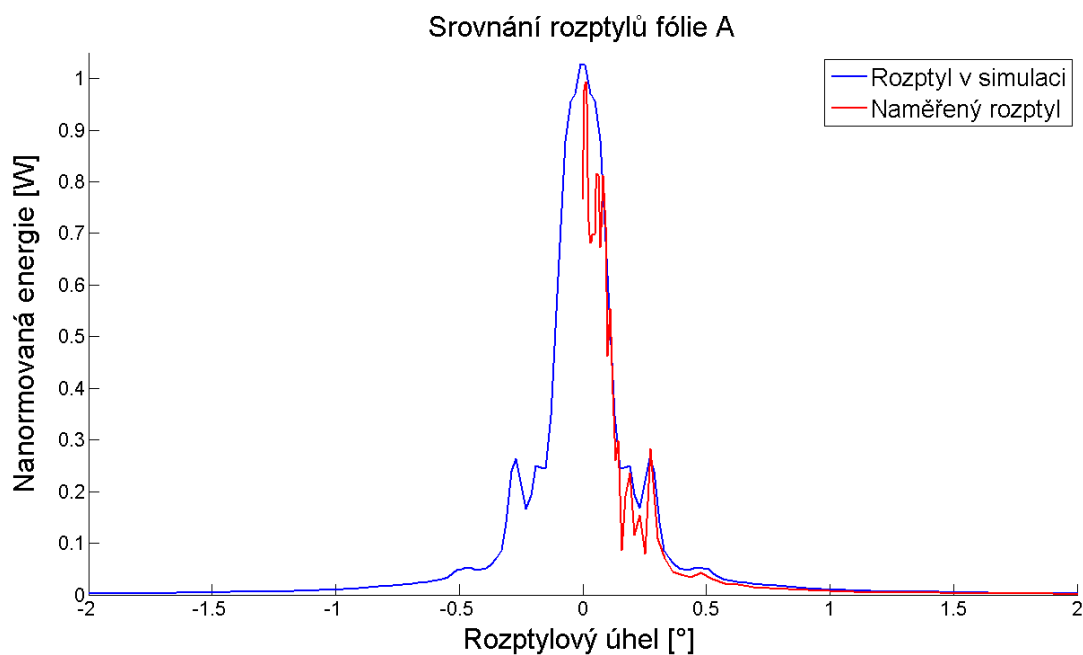
Obrázek 68 | Srovnání BRDF křivek všech vzorků naměřených na CASI.

Celý graf je v logaritmickém měřítku. Lze si povšimnout, že mezi vzorky se neobjevují žádné velké rozdíly a dá se tedy předpokládat, že jejich rozptyl bude velice podobný. Ovšem k praktickému využití rozptylové funkce nestačí pouze graf s jejími hodnotami. Z grafu lze pouze kvalitativně porovnat vzorky a říci, zdali má rozptyl velký nebo malý vliv na výsledný tvar světelné stopy.



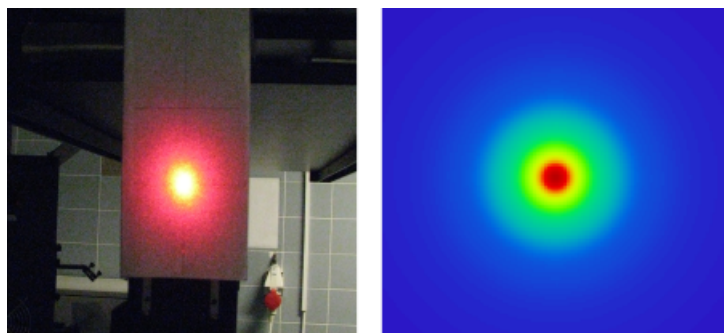
Obrázek 69 | Hodnoty BRDF vybrané pro zpracování do simulace v programu ZEMAX.

Pokud je třeba zjistit, jakým způsobem se bude rozptýlené záření chovat v konkrétních situacích (optické koncentrátoři, teleskopy aj.), je třeba použít dalšího programu k jeho prostorovému zobrazení. K těmto účelům byl použit program ZEMAX popsáný v kapitole 5.1. Zde bude pouze komentováno převedení a srovnání rozptylové funkce (vše pouze pro fólii A). Nejprve byla vybrána data z rozptylové funkce tak, jak je to ukázáno na obrázku 69. Červeně je zobrazena naměřená křivka a modře vybraná data. Ta byla následně vložena do skriptu v ZEMAXu, kde si z nich program vytvořil vlastní průběh rozptylu zobrazeném na 1D detektoru, ze kterého byl poté vytvořen následující graf. Ten bude použit v kapitole 5 k určení celkové účinnosti zařízení SkyFlower®. Srovnání reálného rozptylu naměřeného na CASI (červeně) a rozptylu zobrazeného v programu ZEMAX (modře) je vyneseno v grafu na obrázku 70. Křivky nejsou naprosto shodné, což je způsobeno omezeným počtem vybraných hodnot z reálného měření. Pro účely simulace je však toto přiblížení velice přesné a více než postačující.



Obrázek 70 | Srovnání naměřeného rozptylu a jeho interpretace v programu ZEMAX.

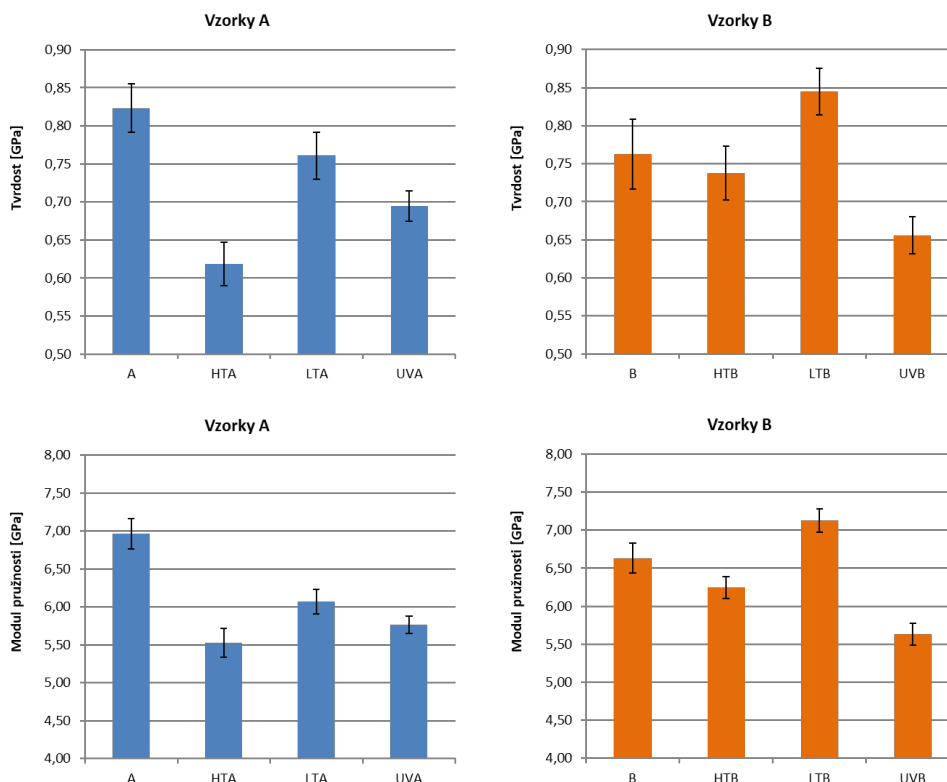
Pro ilustrační grafické srovnání obou rozptylů jsou zde uvedeny fotografie rozptýleného záření a rozptyl vyobrazený v ZEMAXu ve stejných vzdálenostech (viz 71). Je nutné podotknout, že ačkoli je rozptyl v obou případech ve stejné vzdálenosti, měřítka obou snímků nejsou shodná. Proto může dojít k zavádějícímu zkreslení, které by poukazovalo na neshodu obou rozptylů. Dále se musí vzít v potaz kvalita fotografie, protože intenzita ve středu rozptylu je přesaturovaná, a tudíž dochází ke ztrátě informací z dané oblasti fotografie.



Obrázek 71 | Grafické srovnání vyfotografovaného rozptylu a interpretace téhož rozptylu v programu ZEMAX. Měřítka snímků nejsou shodná.

4.3. Nanoindentace

V této sekci budou představeny výsledky z nanoindentace, jejíž měření bylo zopakováno vždy 10x. Nejprve grafy a následně tabulky s konkrétními hodnotami **tvrdostí** a **modulů pružnosti** vypočítaných ze vztahů 27 a 28 a zaokrouhlenými na dvě desetinná místa. Výsledky budou v jednotkách GPa a interval osy y je u grafů znázorňujících tvrdost 0,5-0,9 GPa v grafech pro modul pružnosti 4-8 GPa. V grafech jsou vyneseny hodnoty vzorků A (modře) a hodnoty vzorků B (oranžově). Černě je znázorněna statistická odchylka měření. Vzorky jsou vždy řazeny následovně: čistý vzorek, zvýšená teplota, snížená teplota, UV záření. Všechny grafy jsou zobrazeny na obrázku 72 a jejich hodnoty v tabulkách 4 a 5.



Obrázek 72 | Grafické srovnání tvrdostí a modulů pružnosti vypočítaných se zátěžnou silou 0,20 mN.

[GPa]	čistý vzorek	zatížení HT	zatížení LT	zatížení UV
Vzorky A	0,82 ± 0,03	0,62 ± 0,03	0,76 ± 0,03	0,69 ± 0,02
Vzorky B	0,76 ± 0,05	0,74 ± 0,03	0,84 ± 0,03	0,66 ± 0,02

Tabulka 4 | Tabulka s hodnotami tvrdosti ke srovnání vzorků A a B.

[GPa]	čistý vzorek	zatížení HT	zatížení LT	zatížení UV
Vzorky A	6,97 ± 0,19	5,53 ± 0,19	6,07 ± 0,16	5,76 ± 0,11
Vzorky B	6,63 ± 0,19	6,25 ± 0,14	7,12 ± 0,15	5,63 ± 0,15

Tabulka 5 | Tabulka s hodnotami modulu pružnosti ke srovnání vzorků A a B.

Shrnutí: k výsledkům z nanoindentace se dá říci, že nebyl pozorován žádný zjevný trend, díky kterému by se daly přesněji popsat vlastnosti jednotlivých vzorků. Důvodem je fakt, že samotné zkoumané vlastnosti mají při měření menší vliv než vlivy fixace vzorku a nehomogenity vrstev, která je způsobena tovární výrobou fólií. Jinými slovy, metody jsou příliš přesné a lokální na to, aby jimi byly zkoumány vlastnosti takto nehomogenních vzorků.

4.4. Vrypová zkouška

Zde budou prezentovány a popsány výsledky vrypových zkoušek. Obdobně jako u nanoindentace, kde jsou žádoucí co nejvyšší hodnoty tvrdosti a modulu pružnosti, zde platí, že při čím vyšší zátěžné síle vrstva selže, tím lépe. U všech vzorků proběhly ST při dvou maximálních zátěžných silách (30 mN a 100 mN) a byly **zopakovány vždy 3x**. Nejprve budou prezentovány tabulky a grafy porovnávající tyto kritické zátěže. Následně budou snímky vrypů společně s pozicí **kritických zátěží** (metodika viz. 3.2.2) a měřítko vyobrazeny vždy po dvou pro každý měřený vzorek. Kritické zátěže budou od sebe rozlišeny následujícím způsobem.

- LC1 – zelená.
- LC2 – růžová.
- LC3 – žlutá.

Většina snímků je složená z více částí (klasicky ze čtyř), proto mezi nimi mohou být znatelné ostré přechody. Měřítka je však shodné. Zvětšení snímku je $\times 50$. Dále, pod obrázky s vrypy, budou vykresleny grafy s příslušnými topografiemi a zátěžnou silou. Barevné značení u všech grafů je následující.

- Žlutá – původní topografie.
- Modrá – samotná hloubka vrypu.
- Červená – finální topografie.
- Růžová – zátěžná síla.

Hloubka původní topografie typicky není nulová, ale je od všech hodnot odečtena tak, aby v prezentovaných grafech nulová byla. Zbylé křivky tedy udávají rozdíl od původní topografie, která je po odečtení nulová. Výjimkou je samozřejmě zátěžná síla, která se nijak neupravuje.

4.4.1. Srovnání kritických zátěžných sil

Ze společných údajů zjištěných z obou výsledků (fotografie s následnou analýzou a reálné hodnoty zvyšování zátěžné síly) byly stanoveny konkrétní hodnoty kritických zátěží. Tyto hodnoty jsou vyneseny v tabulkách 6 a 7 a zaokrouhleny na jedno desetinné místo. Graficky jsou poté shrnuty na obrázku 73 na následující straně. Toto řazení bylo zvoleno z důvodu velikosti následujících obrázků, kterým budou pro názornost věnovány samostatné strany.

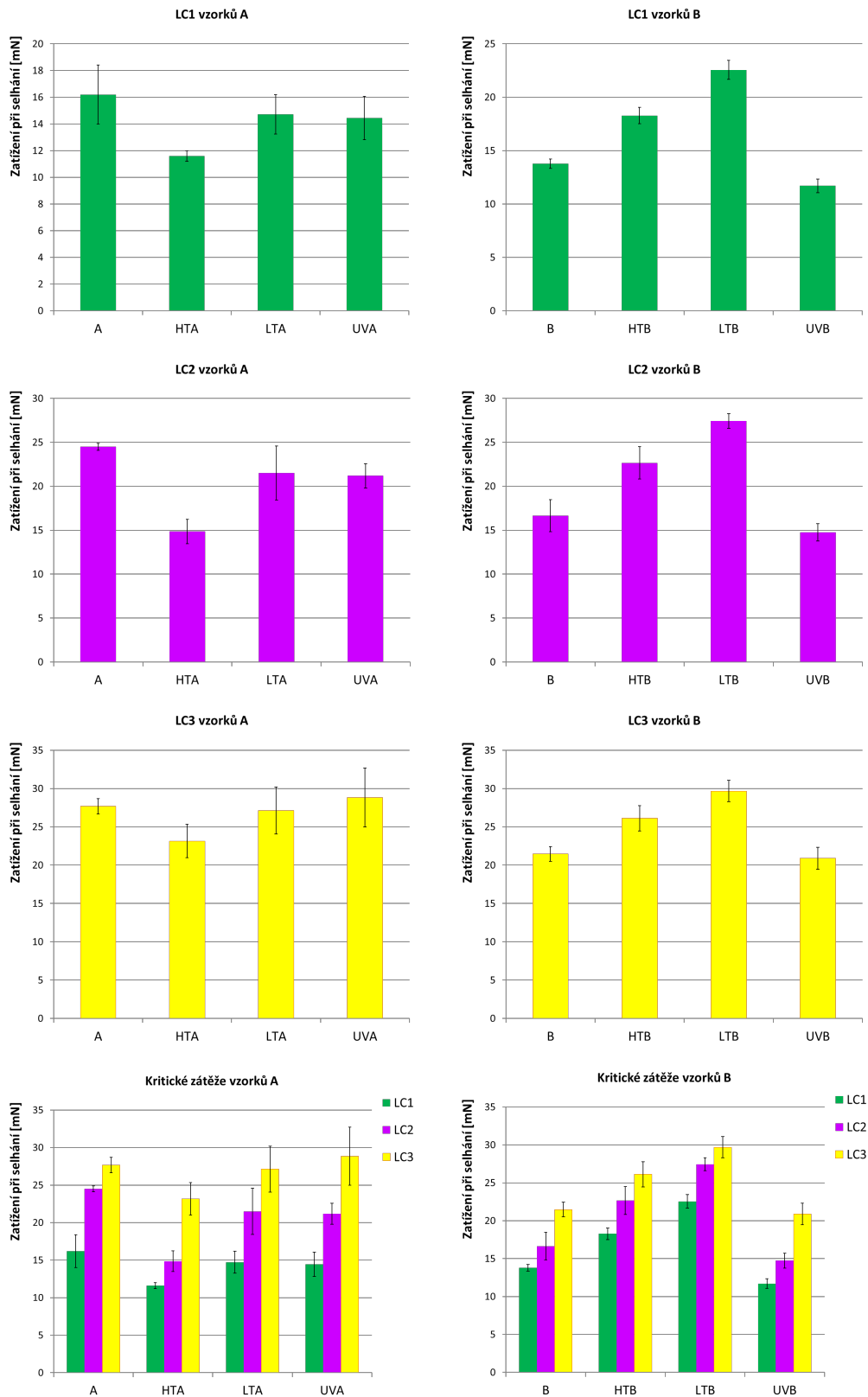
[mN]	A	HTA	LTA	UVA
LC1	16,2 ± 2,2	11,6 ± 0,4	14,7 ± 1,5	14,4 ± 1,6
LC2	24,5 ± 0,4	14,9 ± 1,4	21,5 ± 3,1	21,2 ± 1,4
LC3	27,7 ± 1,1	23,2 ± 2,2	27,1 ± 3,1	28,8 ± 3,9

Tabulka 6 | Tabulka s hodnotami kritických zátěží vzorků A pro všechny zátěžové testy.

[mN]	B	HTB	LTB	UVB
LC1	13,8 ± 0,4	18,3 ± 0,8	22,6 ± 0,9	11,7 ± 0,6
LC2	16,6 ± 1,8	22,7 ± 1,8	27,4 ± 0,8	14,7 ± 1,1
LC3	21,5 ± 0,9	26,1 ± 1,7	29,7 ± 1,4	20,9 ± 1,4

Tabulka 7 | Tabulka s hodnotami kritických zátěží vzorků B pro všechny zátěžové testy.

Na následující straně na obrázku 73 jsou tyto hodnoty (nezaokrouhlené) vyneseny do sloupcových grafů pro lepší grafické srovnání. Nejprve odděleně LC1, poté LC2, LC3 a nakonec všechny zátěžné síly dohromady. Na levé straně jsou řazeny vzorky A a na straně pravé vzorky B.

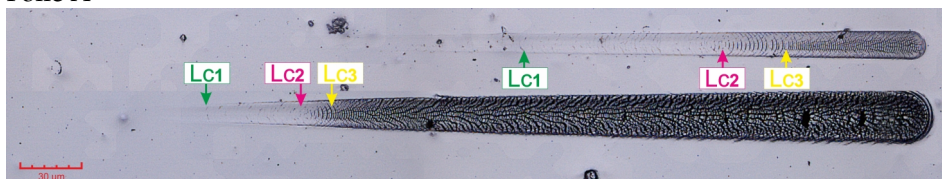


Obrázek 73 | Grafy srovnávající kritické zátěžné síly od nejmenší LC1 po největší LC3. Vzorky A vlevo a vzorky B pravou.

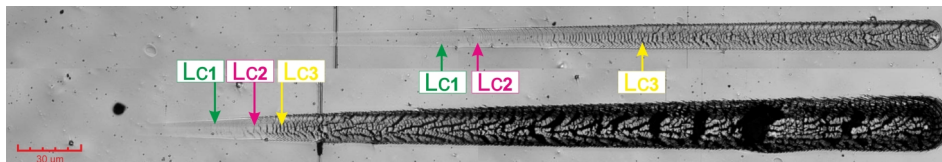
Reálnou pozici kritických zátěžných sil lze vidět na obrázku 74, kde jsou vyznačeny šipkami a barevně rozlišeny. Snímky jsou pro všechny vzorky a obě maximální zátěžné síly 30 a 100 *mN*.

4.4.2. Snímky z konfokálního mikroskopu

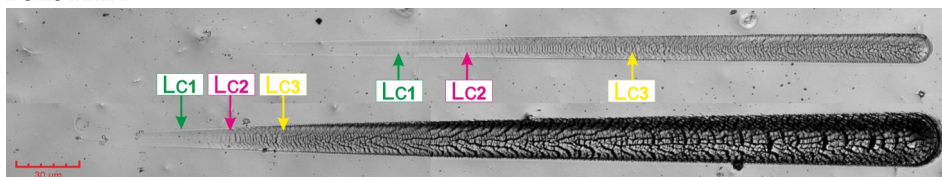
Fólie A



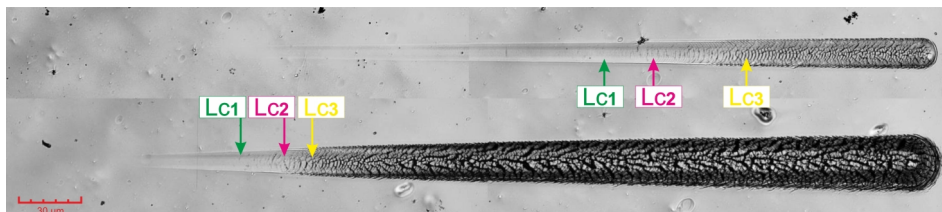
Fólie B



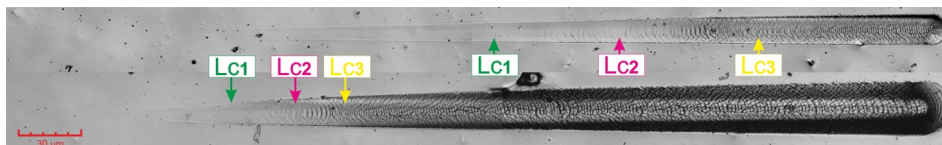
Fólie HTA



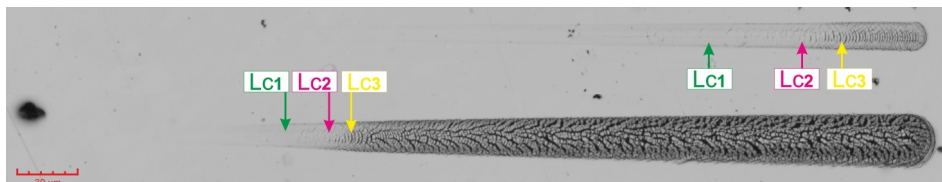
Fólie HTB



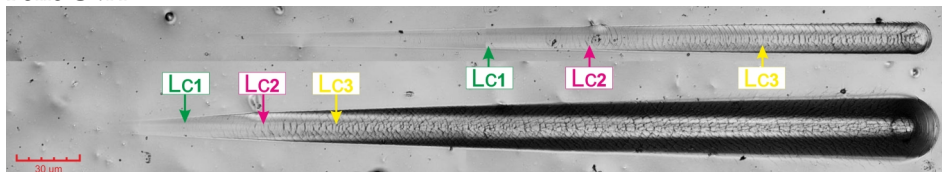
Fólie LTA



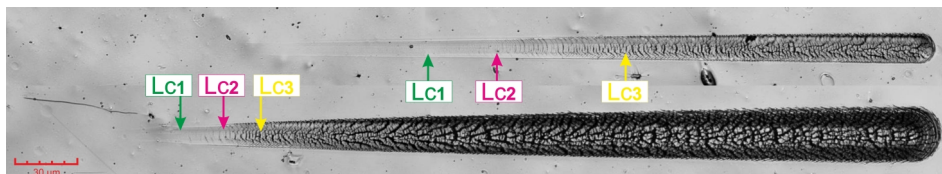
Fólie LTB



Fólie UVA



Fólie UVB



Obrázek 74

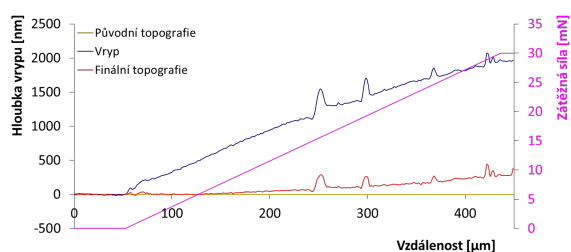
Snímky všech vzorků z konfokálního mikroskopu při zvětšení 50x a s vyznačenými kritickými zatíženími. Zátěžné síly vždy nahoře 30 a dole 100 *mN*.

Na předchozí straně jsou vidět podobnosti některých vzorků, kdežto u jiných, u kterých se to nepředpokládalo, zase rozdíly. Očekávána byla podobnost u vzorků, podrobeným stejným zátěžovým testům, avšak ty se zde nevyskytují, což poukazuje na rozdílnost vrstev. Dále jsou zde rozdíly mezi jednotlivými vzorky po různých zatíženích. To značí změnu / degradaci vrstvy. Podstatný je ovšem fakt, že nedochází k systematické degradaci vzorků, ale objevuje se i částečné zlepšení.

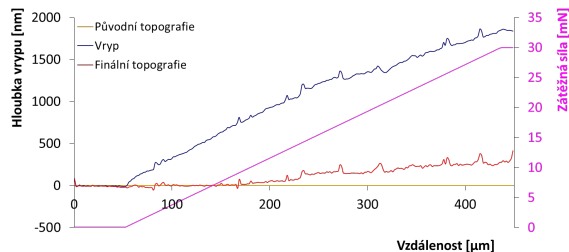
4.4.3. Topografie povrchů při zátěžné síle 30 mN

Na následujících grafech na obrázku 75 jsou vyneseny konkrétní hodnoty z měření topografií povrchů vzorků a hloubek vrypů. Vlevo jsou topografie vzorků A a vpravo topografie vzorků B. Průběhy naměřené při nižších zátěžných silách (30 mN) jsou na obrázku 75 a topografie zátěžné síly 100 mN jsou v grafech na obrázku 76. Lze si povšimnout rozdílu v hloubkách vrypů u různých vzorků, a to u obou zátěžných sil. Za povšimnutí stojí, že tyto rozdíly spolu napříč vzorky ne vždy korespondují. Například fólie LTA má velmi hluboký vryp, kdežto fólie LTB má naopak hloubku vrypu poloviční (u 100 mN). U ostatních vzorků hloubky vrypů v mezích odpovídají (samozřejmě ne bez odchylek). Tento fakt nebyl předpokládán, neboť se očekávala vyšší odolnost u vzorků B, které údajně měly mít lepší ochrannou vrstvu (podle informací od dodavatele fólií). Co se dá ovšem říci o všech vzorcích je to, že deformace byly z velké části elastické povahy.

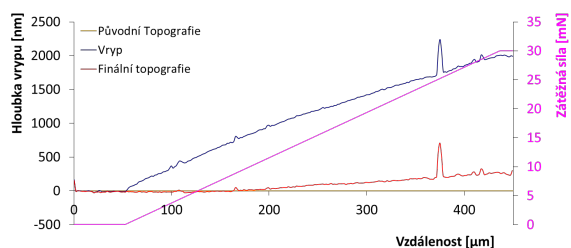
Fólie A



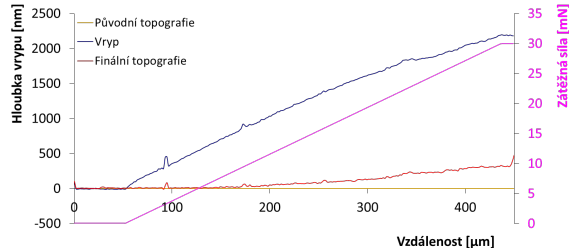
Fólie B



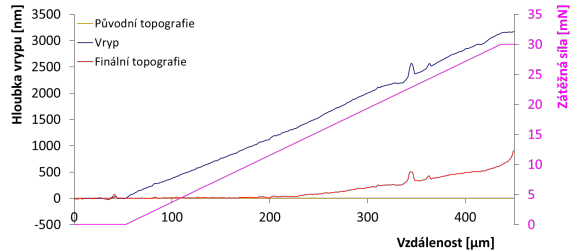
Fólie HTA



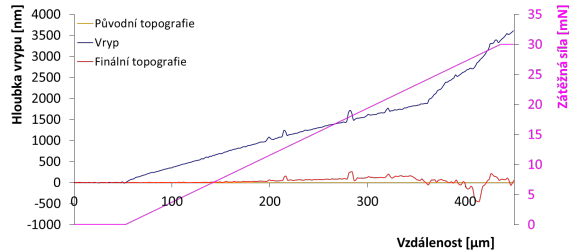
Fólie HTB



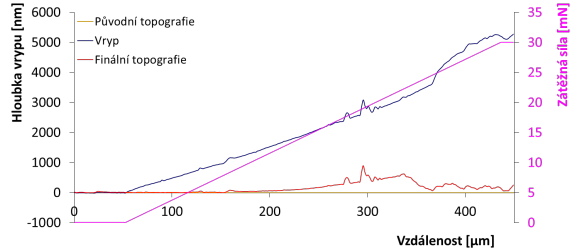
Fólie LTA



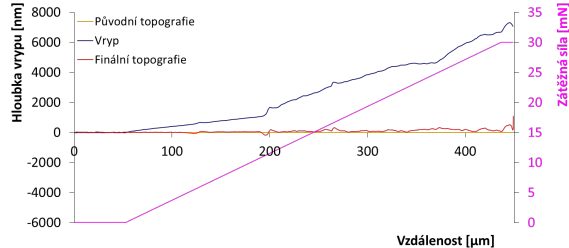
Fólie LTB



Fólie UVA



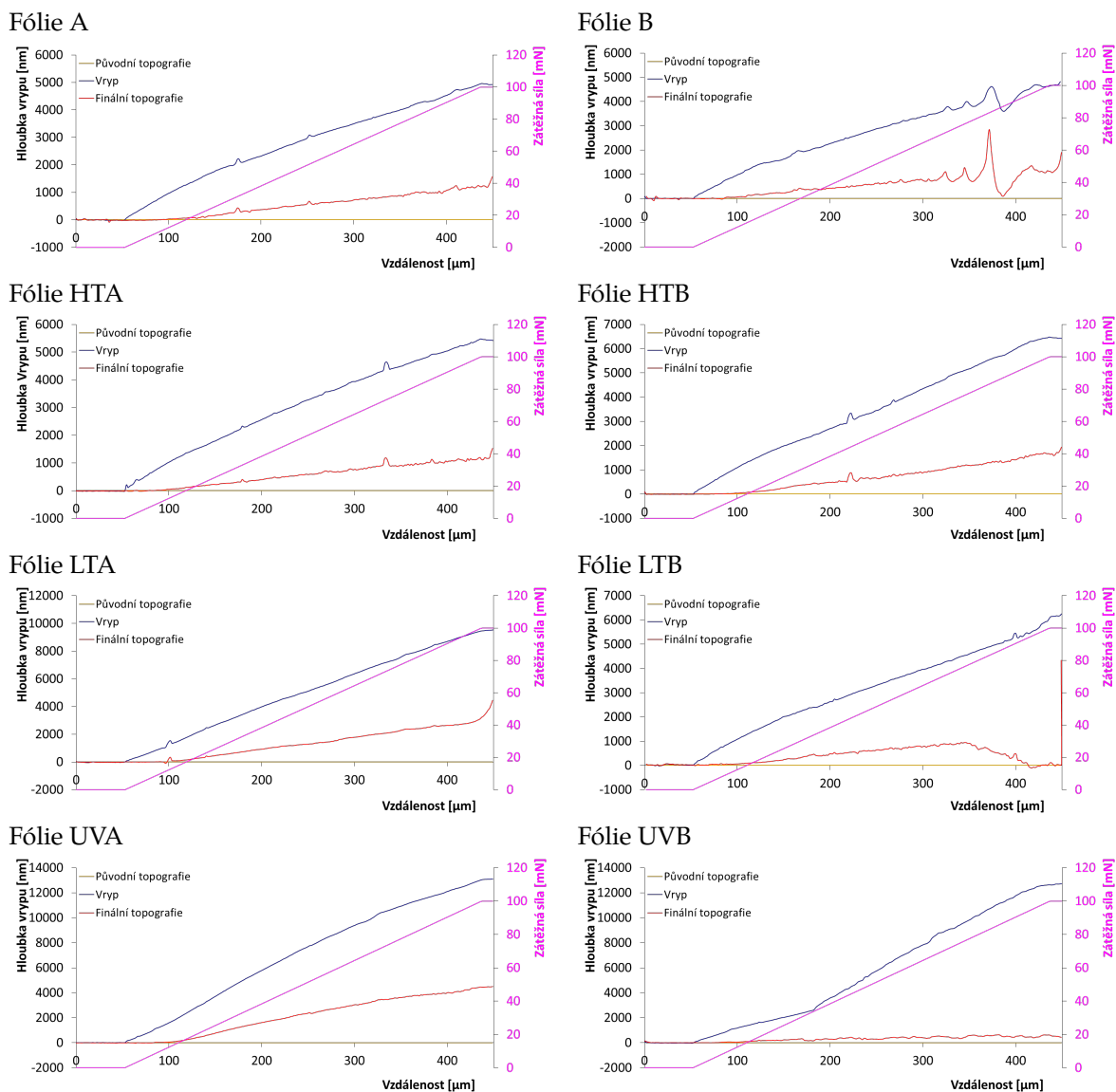
Fólie UVB



Obrázek 75

Grafy závislosti hloubky vrypu na vzdálenosti: původní topografie, hloubka vrypu a finální topografie. Na druhé ose závislost zátěžné síly na vzdálenosti. Vše jsou vzorky s maximálním zatížením 30 mN. Vzorky A vlevo a B vpravo.

4.4.4. Topografie povrchů při zátěžné síle 100 mN



Obrázek 76 Grafy závislosti hloubky vrypu na vzdálenosti: původní topografie, hloubka vrypu a finální topografie. Na druhé ose závislost zátěžné síly na vzdálenosti. Vše jsou vzorky s maximálním zatížením 100 mN. Vzorky A vlevo a B vpravo.

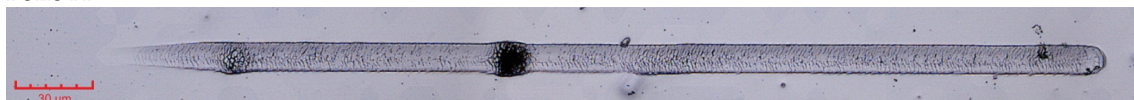
Shrnutí: ze získaných výsledků nebyl pozorován žádný spolehlivě se pozorovatelný trend, ze kterého by se daly jednoznačně určit a popsat vlastnosti měřených vzorků. Mohlo by být provedeno detailní srovnání vzorků porovnávací, který vzorek praská jako první, který jako poslední, kde docházelo k největší deformaci a podobně. Avšak takové srovnání by bylo k ničemu, protože k měření byly použity nejpřesnější a vysoce lokální měřicí metody, které zachytí, byť jen nepatrnou deformaci. Fólie se ovšem vyrábí průmyslově v tolerancích, které mají výrazně větší vliv, než zkoumané efekty. Zde také chybí přesné informace o vzorcích, které si jejich výrobce nechává jako tajemství a dodavatel tedy předal jen neúplné informace (detailnější zkoumání vzorků neproběhlo, protože by měření bylo zadarmo poskytnuto lidem mimo fakultu, a to nebylo dovoleno). Dalším důvodem je problematika měkkého substrátu, na němž je nanesen kov a ještě ochranná vrstva. Je zřejmé, že substrát bude jistým způsobem měření ovlivňovat. S nanášením vrstev souvisí nehomogenita povrchu. Jak již bylo zmíněno, její efekt je větší než zkoumané efekty. Jinými slovy, použité metody jsou příliš citlivé. Pro lepší představu, měření probíhalo na ploše 1 mm², který byl vybrán z formátu fólie cca A4. Ten byl odstřížen z metr široké role dlouhé několik desítek metrů. Navíc, další vliv na měření má způsob přilepení vzorku na laboratorní sklíčko. Vrstva lepidla nebude nikdy rovná, a to zavádí do měření další nejistotu.

Celkově oproti spektrální odraznosti, kde lepší výsledky dávala fólie B, zde lépe obstála fólie A. Čistý vzorek A dosahoval téměř nejlepších výsledků (kromě fólie LTB). U fólie B se objevil nejmarkantnější pokles u vzorku zatíženého UV zářením. To naznačuje negativní efekt v aplikacích, kde se UV záření nevyhne. U měření spektrální odraznosti sice nebyl vidět pokles, ale je možné, že na projevení negativních vlivů mohl být třicetidenní interval krátký a ochranná vrstva by zdegradovala zanedlouho poté.

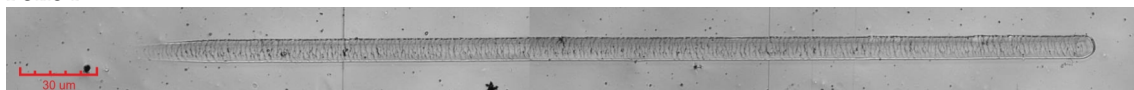
4.5. Test opotřebení

U testů MPWR bylo v rámci práce provedeno vizuální porovnání reziduálních stop zobrazených na snímcích na obrázku 77. Na jejich průběhu byl pozorován rozdílný charakter zkoumaných vrstev. Přejezdů (vrypů na stejném místě) bylo provedeno vždy šestnáct a vždy po dvou přejezdech byla změřena topografie.

Fólie A



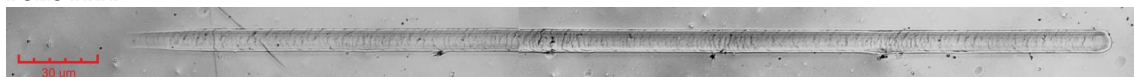
Fólie B



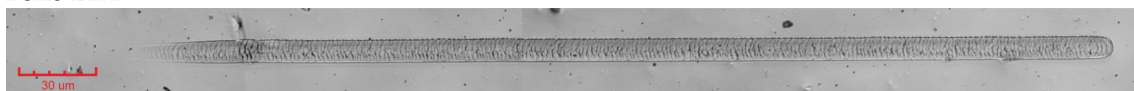
Fólie HTA



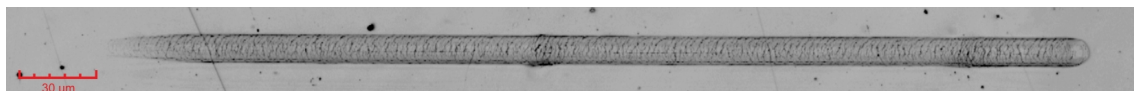
Fólie HTB



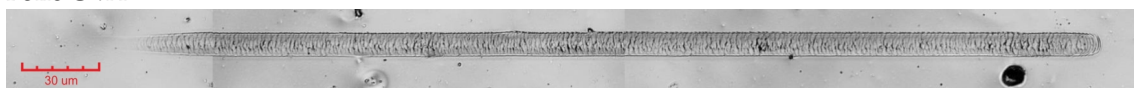
Fólie LTA



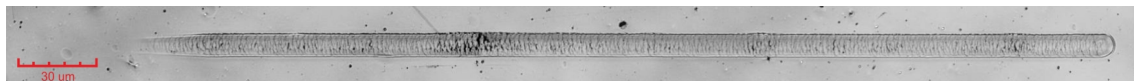
Fólie LTB



Fólie UVA



Fólie UVB



Obrázek 77 | Snímky všech vzorků MPWR testů z konfokálního mikroskopu při zvětšení 50x.

Shrnutí: obdobně jako u vrypové zkoušky a nanoindentace, i zde je metoda značně lokální. Nejistoty měření jsou způsobeny opět vlivem měkkého substrátu, nalepení vzorku, nehomogenity materiálu a podobně. Nedá se říci, že některý vzorek dopadl nejlépe a jiný nejhůře. Na všech vzorcích jsou vidět pouze tahové praskliny směřující proti směru pohybu hrotu. Tyto praskliny jsou způsobeny třením a neznají zničení vrstvy. Je tedy možné konstatovat, že všechny vzorky mají poměrně dobrou odolnost vůči opotřebení.

5. Simulace pro výpočet celkové účinnosti zařízení SkyFlower®

V minulých kapitolách jsou komentovány výsledky z optických a mechanických měření. Byla pozorována jistá změna vlastností odrazných fólií. Co se optických měření týče, byly použity parametry jako jsou optická odraznost a rozptyl záření. Právě tyto parametry jsou potřeba k určení celkové účinnosti optické části zařízení SkyFlower®. Ovšem na papíře by se taková data jen těžko měnila v užitečné informace. Proto byl ke stanovení účinnosti použit program ZEMAX, jehož možnosti a výsledky simulací jsou popsány v následujících odstavcích.

5.1. Program ZEMAX

Prostředí ZEMAX je software určený ke 3D simulacím optických systémů, který disponuje funkcí **sledování paprsků** v uživatelem definovaných prostředích. Dále slouží k **analýze a optimalizaci** optických, laserových, osvětlovacích a jiných systémů. Funguje ve dvou módech. V **sekvenčním** a **nesekvenčním**. Přitom každý z nich se hodí pro jiné aplikační využití. V této práci byl použit nesequenční mód. V prostředí ZEMAX je možné si navolit objekty jako jsou:

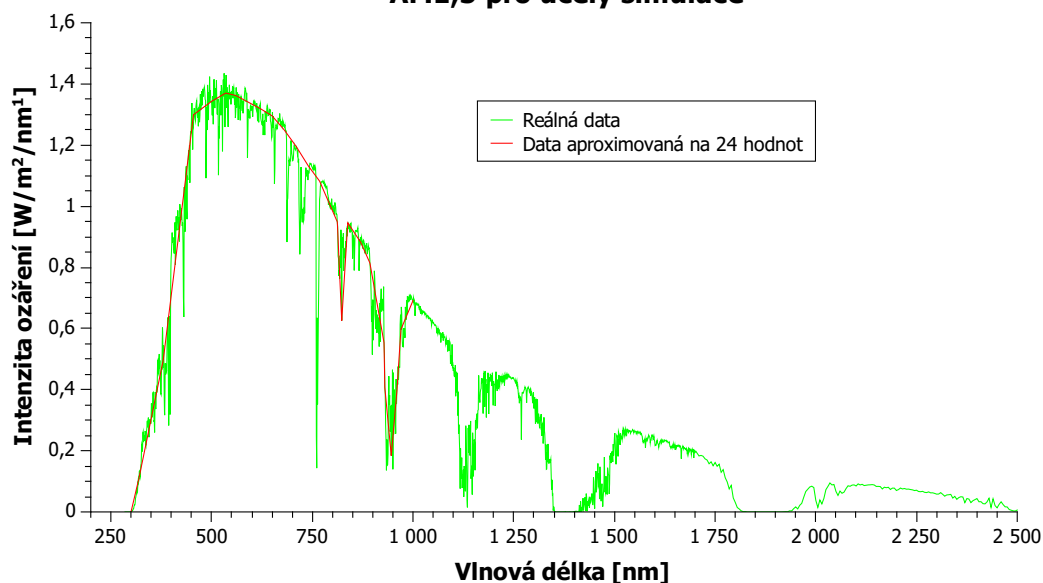
- **zdroje** záření ať už se jedná o plošný, bodový nebo jiný typ zdroje,
- **zrcadla** s nastavitelnou mírou odraznosti,
- **absorbéry** pohlcující dopadající paprsky,
- **detektory**, na kterých si lze zobrazit rozložení intenzit dopadajících paprsků,
- **čočky** různých typů,
- **vrstvy (coatings)** sloužící k zadávání speciálních požadavků na povrchy objektů
- a zmíněné uživatelem definovatelné **objekty** s několika volitelnými parametry, z nichž jako příklad udávám:
 1. závislost na vlnových délkách,
 2. rozptylové funkce,
 3. polarizační schopnost,
 4. dělení paprsků,
 5. index lomu aj.

Program je schopen využít informace z daných objektů a nasimulovat průběh paprsků, který je možno zkontrolovat ve 3D prohlížeči. Uživatel tak získá rychlý přehled o funkčnosti daného optického systému a v kombinaci s informacemi pořízených z vhodně umístěných detektorů je případně schopen zvýšit jeho efektivitu. Na podobném principu lze také určit efektivitu různých optických systémů, při jejímž výpočtu lze vyjít z definované energie zdroje a energie zachycené na detektoru na požadovaném místě. Právě z výše uvedených důvodů bylo zvoleno prostředí ZEMAX k určení účinnosti zařízení SkyFlower®.

5.2. Simulace

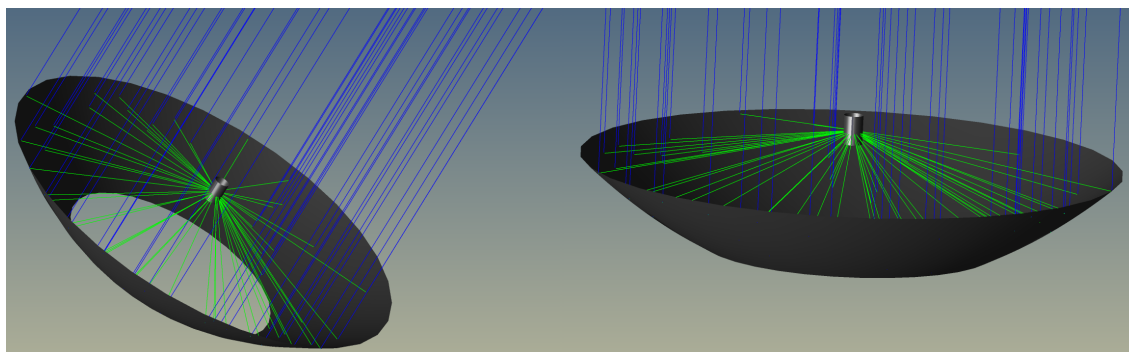
Zdroj: zařízení SkyFlower® funguje jako optický koncentrátor, který má ve svém ohnisku válcový "detektor" (jedná se o speciální geometrii sady PV článků). V praktické realizaci bude koncentrovat záření ze Slunce. To se v jisté míře aproximace dá na zemském povrchu považovat za paprsky dopadající paralelně z nekonečna (i když je úhlový průměr Slunce přibližně $0,5^\circ$). Za takových předpokladů byl vytvořen dostatečně velký světelný zdroj, který má tvar mezikruží (pro zjednodušení výpočtů). Všechny paprsky (a tedy i veškerá energie) ze zdroje míří na odraznou plochu koncentrátoru na SkyFlower®. **Celková energie** všech paprsků byla nastavena **100 W** tak, aby byl výsledek čistě procentuální. **Počet paprsků** v simulaci byl **100 milionů**. Dále byla započítána závislost energie záření na vlnové délce. K tomuto účelu byla použita data z [42]. Avšak program ZEMAX zvládne pojmout maximálně 24 údajů týkajících se vlnové délky zdroje. Z tohoto důvodu byla vytvořena aproximace právě pro těchto 24 hodnot v rozmezí vlnových délek 300-1000 nm (rozsah měření spektrální odraznosti). Graf ukazující jejich podobnost je vynesena na obrázku 78 (lokální propady průběhu byly zanedbány z důvodu omezeného počtu hodnot).

AM1,5 pro účely simulace



Obrázek 78 | Graf AM1,5 pro dané vlnové délky. Zeleně jsou vyznačeny hodnoty převzaté z [42] a červená křivka značí aproximovaná data použitá v simulaci k definování parametrů zdroje.

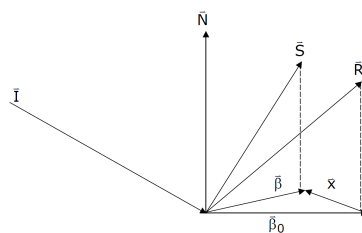
Plocha koncentrátoru a válcový detektor: koncentrátor má téměř parabolický tvar. Tím je dosaženo spolehlivé koncentrace paprsků do "detektoru" v ohnisku, kterým je v tomto případě plášť válce bez podstav. Na obrázku 79 si lze všimnout, že u odrazné plochy chybí oblast v místě vrcholu. To je z důvodu malé PV využitelnosti paprsků dopadajících pod velkým úhlem na plášť válce. Měly by převážně parazitický ohřevný účinek. Na obrázku je zobrazených pouze 50 ilustračních paprsků bez rozptylu. Přesný předpis paraboly (stejně jako ostatní konkrétní údaje o geometrii zařízení) zde na žádost výrobců neuvádím.



Obrázek 79 | Tvar zrcadlové plochy vytvořené v ZEMAXu. Modře jsou vyznačeny paprsky dopadající paralelně z nekonečna a zeleně potom ideálně (zrcadlově) odražené paprsky (bez rozptylu).

Dalším krokem bylo přiřadit objektu zastupující zrcadlovou plochu míru odraznosti. A to v závislosti na vlnových délkách. Tyto informace byly získány z experimentálního měření integrační koulí a spektrometrem na daných vzorcích (viz. 4.1). Následně byla data převedena do formátu programu ZEMAX a nahrána do souboru obsahující údaje o vrstvách (*coatings*). Ty byly pro jednotlivé případy fólií a jejich degradovaných analogů postupně nahrány a nezávisle na sobě vyhodnoceny. Do souboru vrstev se dají zapsat informace o **odraznosti**, **propustnosti** a z nich dopočítaná **absorpce** ($A = 1 - R - T$). Čtyři údaje o změně **fáze** pro odražené a prošlé paprsky. To vše pro polarizace S a P. V simulaci, kde je klíčové zjistit pouze účinnost zařízení (nezáleží na polarizaci) stačí údaje o reflektivitě.

Předpoklady pro popis rozptylové funkce: výstupy z CASI (viz. 4.2) je třeba je nějakým způsobem převést do formy, kterou dokáže program ZEMAX použít. Nejprve bude vysvětleno s jakými předpoklady pracují rozptylové modely. Ty jsou definovány jako funkce pravděpodobnostní distribuce. Pokud má tedy program na rozhraní rozptýlit paprsek, stane se to, že pro něj zvolí nový směr v závislosti na pravděpodobnostní funkci. Je zřejmé, že čím více paprsků bude použito, tím více se distribuce bude blížit reálné distribuci pravděpodobnostní funkce. Hodnota zlomku rozptylu (*scatter fraction*) určuje, jaký bude poměr energie paprsků spekulárních a rozptýlených. Zde byl zvolen **poměr 1**, jinými slovy všechny paprsky budou rozptýleny (největší pravděpodobnost však stále zůstává ve spekulárním směru). Navíc, je možné vybrat funkci rozdělení paprsků (*rays splitting*), která rozdělí paprsek na zvolený počet (*number of rays*) nových paprsků. Součet energie takových paprsků je roven energii dopadajícího paprsku, ze kterého byly rozděleny. Tato funkce je vhodná k lepšímu zobrazení rozptylu při použití méně paprsků. V této simulaci byla hodnota **počtu rozdělených paprsků** stanovena na **10**. Na následujícím obrázku 80 jsou ukázány vektory, podle nichž se popisují rozptylové modely.



Obrázek 80 | Definice geometrie používané v rozptylových modelech.

Normálový vektor \vec{N} (*normal*) definuje orientaci povrchu v bodě, kde se střetává s dopadajícím paprskem vyobrazeným jako vektor \vec{I} (*incident*). Dále vektor \vec{R} (*reflected*) je odražený spekulární paprsek a vektor \vec{S} (*scattered*) představuje paprsek rozptýlený. Všechny vektory \vec{N} , \vec{I} , \vec{R} a \vec{S} jsou jednotkové, ale projekce vektorů spekulárního a rozptýleného paprsku na povrch, označeny jako $\vec{\beta}_0$ a $\vec{\beta}$ už jednotkové nejsou. Vektor $\vec{\beta}_0$ má velikost $\sin \Theta_r$ a vektor $\vec{\beta}$ má velikost $\sin \Theta_s$. Úhly Θ_r a Θ_s určují úhel mezi normálovým vektorem a vektory spekulárního a rozptýleného paprsku. Dále definujeme rozdíl vektorů $\vec{\beta} - \vec{\beta}_0$ jako vektor $\vec{\chi}$. Z toho vyplývá, že pokud $|\vec{\chi}|$ je nulový, pak se vektor pro spekulární a rozptýlený odraz bude rovnat. Jak bude vektor $\vec{\chi}$ definován záleží na zvoleném rozptylovém modelu. Maximální velikost vektorů $\vec{\beta}_0$ a $\vec{\beta}$ je 1, avšak vektory nemusí směřovat stejným směrem, a proto velikost výrazu $\sin \Theta_s - \sin \Theta_r$ nabývá hodnot v intervalu $\langle 0, 2 \rangle$.

Rozptylové modely dostupné v programu ZEMAX: v programu je na výběr celkově šest rozptylových modelů, z nichž každý počítá s rozdílnými předpoklady. Modely vychází z BSDF funkce, která je popsána v kapitole 2.1.2.

- **Bez rozptylu** (*no scattering*) – výběrem modelu bez rozptylu budou všechny paprsky počítat s hodnotou BSDF funkce rovné nule. Velikost vektoru $\vec{\chi}$ bude také nula. Po odraze bude tedy vždy pokračovat pouze spekulární paprsek.
- **Lambertovský rozptyl** (*Lambertian scattering*) – vychází z předpokladu, že projekce pro každý rozptýlený vektor $\vec{\beta}$ má stejnou pravděpodobnost na kružnici jednotkové velikosti. Hodnota funkce BSDF je $1/\pi$. Rozptýlená intenzita je úměrná $\cos \Theta_s$. Lambertovský rozptyl nezáleží na úhlu dopadového paprsku. Většina povrchu se považuje za téměř Lambertovský.
- **Gaussovský rozptyl** (*Gaussian scattering*) – je dán předpisem:

$$BSDF(\vec{\chi}) = A e^{-\frac{|\vec{\chi}|^2}{\sigma^2}},$$

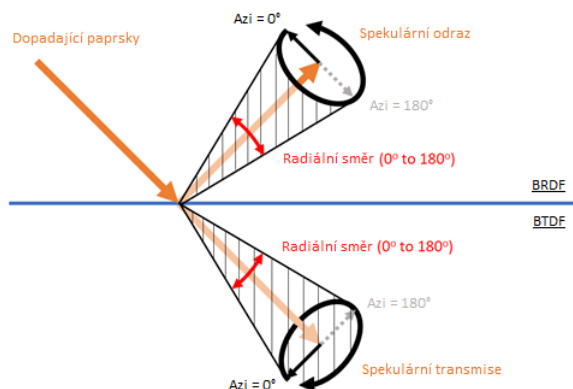
kde A je normalizační konstanta. Výsledná distribuce je rotačně symetrická ve směru kosinového prostoru, bez ohledu na úhel, který svírá spekulární paprsek s normálovým vektorem k povrchu. Bezrozměrná hodnota σ určuje šířku gaussovské distribuce na projekci na ploše. Pokud σ překročí hodnotu 5, pak je průběh téměř lambertovský.

- **ABg model rozptylu** (*ABg model scattering*) – je jeden z nejvíce používaných modelů k definování BSDF funkce. Používá se v případě, když je rozptylová funkce určena převážně náhodnou izotropickou drsností povrchu a rozměr drsnosti je malý v porovnání s vlnovou délkou rozptýleného světla. Tyto předpoklady jsou většinou splněny pro leštěné optické povrchy. ABg model pro BSDF funkci je dán předpisem:

$$BSDF(\vec{\chi}) = \frac{A}{B + |\vec{\chi}|^g}, \quad (30)$$

kde A , B a g jsou parametry funkce, které v programu ZEMAX podléhají jistým omezením (více se dá o specifikacích ABg modelu dohledat v [43], [44]).

- **BSDF model rozptylu** (*the BSDF model*) – je model vytvořený k přímému použití naměřených dat z BSDF funkce. Na obrázku 81 je schematicky zobrazeno, s jakými parametry model pracuje. Oranžově jsou vyznačeny dopadající paprsky a jejich spekulární odraz / průchod. Černě je zaznačen azimutální úhel, díky kterého je možno nastavit různý rozptyl do různých směrů. Toho je využíváno u vzorků s nesymetrickým rozptylem (vzorky zkoumané v rámci této diplomové práce jsou brány jako symetrické). A nakonec červeně je vyznačen radiální úhel neboli úhel, který byl měřen na CASI. BRDF a BTDF jsou rozptylové funkce pro odraz a pro průchod (viz 2.1.2). Více detailů o zadávání a fungování modelu lze dohledat v [45].



Obrázek 81 | Schéma ukazující, s jakými paprsky a úhly pracuje BSDF model, upraveno z [45].

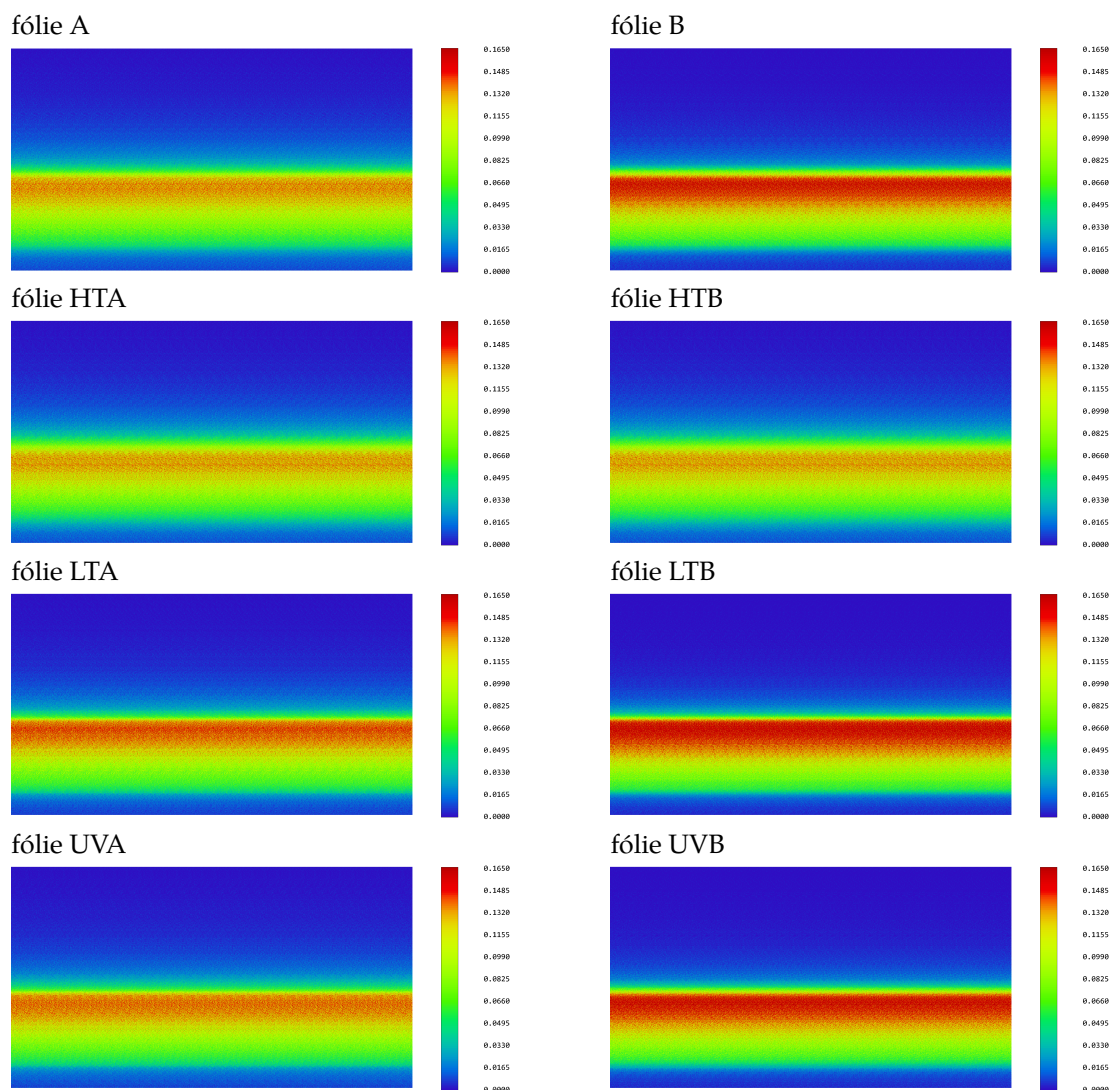
- **Uživatелеm definovaný** (*user defined*) – je možnost, kdy si uživatel sám volí parametry rozptylu pomocí externího programu DLL (*Dynamic Link Library*).

5.3. Výsledná účinnost

Pro účely simulace byl zvolen právě BSDF model, který má tu výhodu, že bylo možné použít data naměřená z CASI bez různých úprav. Nakonec následovala kontrola všech parametrů a objektů v simulaci, jejichž výčet se nachází v tabulce 8. Na následující straně na obrázku 82 jsou zobrazeny výsledky naměřené z válcového detektoru pro všechny zkoumané vzorky a na obrázku 83 je srovnání rozptylů všech vzorků.

Důležité parametry:	Podstatné objekty:
Energie paprsků – 100 W	Zdroj ve tvaru mezikruží
Počet paprsků – 100 000 000	Odrazná plocha (téměř parabolická)
Váhy vlnových délek – viz. 78	Válcový detektor
Coatings – hodnoty z 4.1	Pomocné detektory (nevyužity při výpočtu, pouze k lepší orientaci)
Rozptylový model – BSDF z 4.2	
Scatter fraction – 1	
Number of rays – 10	

Tabulka 8 | Tabulka se všemi důležitými údaji použitými v simulaci.



Obrázek 82 | Rozptyly všech vzorků na roztaženém plášti válcového detektoru. Hodnoty v pravých sloupcích jsou ve wattech.

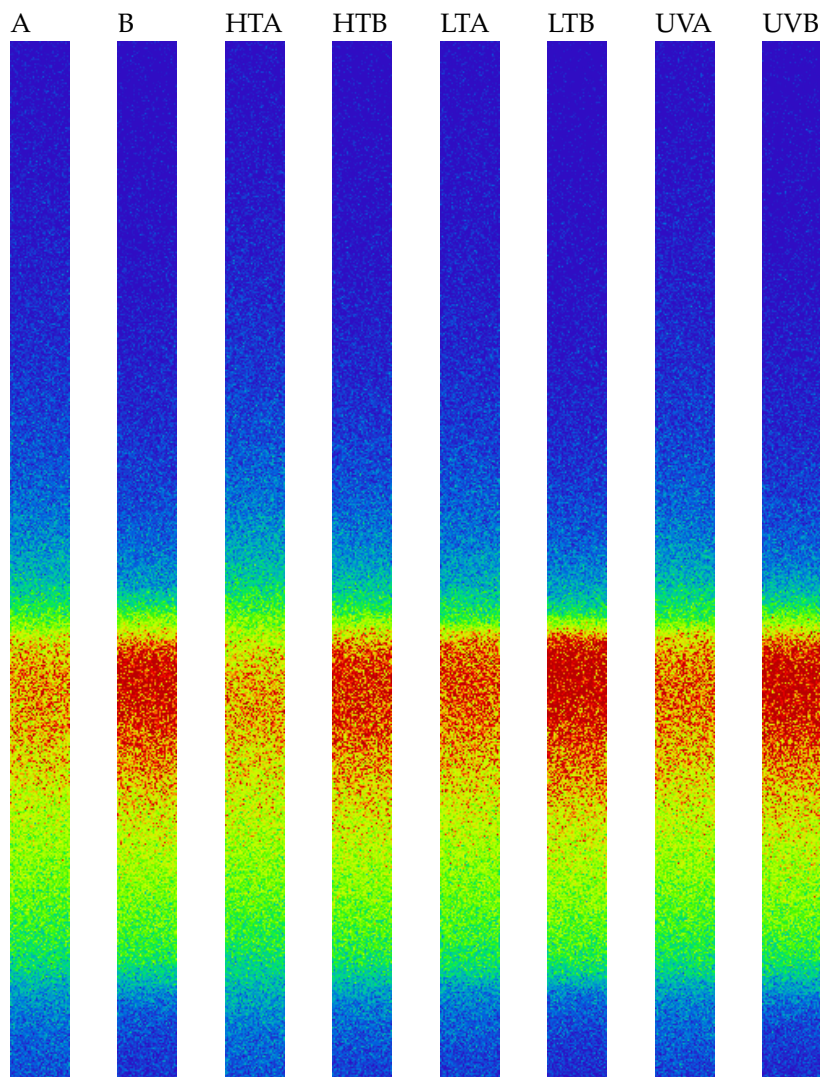
Z obrázků je jasně patrné, že velká většina veškerého záření je koncentrována ve spodní části detektoru. Tento fakt je spojen s neideálním umístěním válcového "detektoru" a může být příčinou ztráty energie v prostoru pod ním v důsledku rozptylu. Předmětem této diplomové práce ovšem není zlepšovat geometrii zařízení, nýbrž stanovit jeho optickou účinnost. Za tímto účelem byly vyčteny hodnoty ze simulace, které odpovídají celkové energii záření dopadající na v ZEMAXu vytvořený válcový detektor. Všechny tyto hodnoty výsledné účinnosti pro všechny zkoumané vzorky jsou vypsány v tabulkách 9 a 10, postupně pro vzorky A a následně pro vzorky B. Odchylka měření je zaokrouhlena na dvě desetinná místa.

[%]	A	HTA	LTA	UVA
Účinnost	$75,9 \pm 3,5$	$77,2 \pm 1,5$	$78,5 \pm 1,3$	$77,6 \pm 1,3$

Tabulka 9 | Tabulka se spočítanými účinnostmi pro vzorky A.

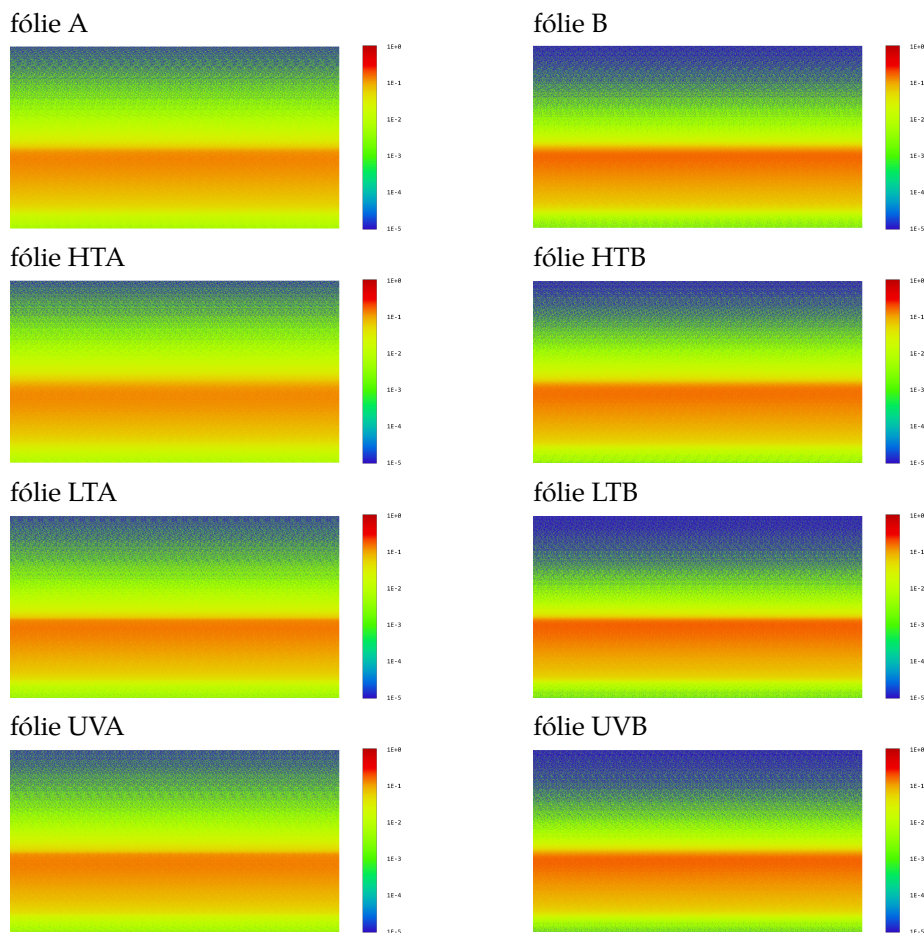
[%]	B	HTB	LTB	UVB
Účinnost	$82,3 \pm 1,9$	$82,6 \pm 1,2$	$84,2 \pm 1,3$	$83,5 \pm 1,3$

Tabulka 10 | Tabulka se spočítanými účinnostmi pro vzorky B.

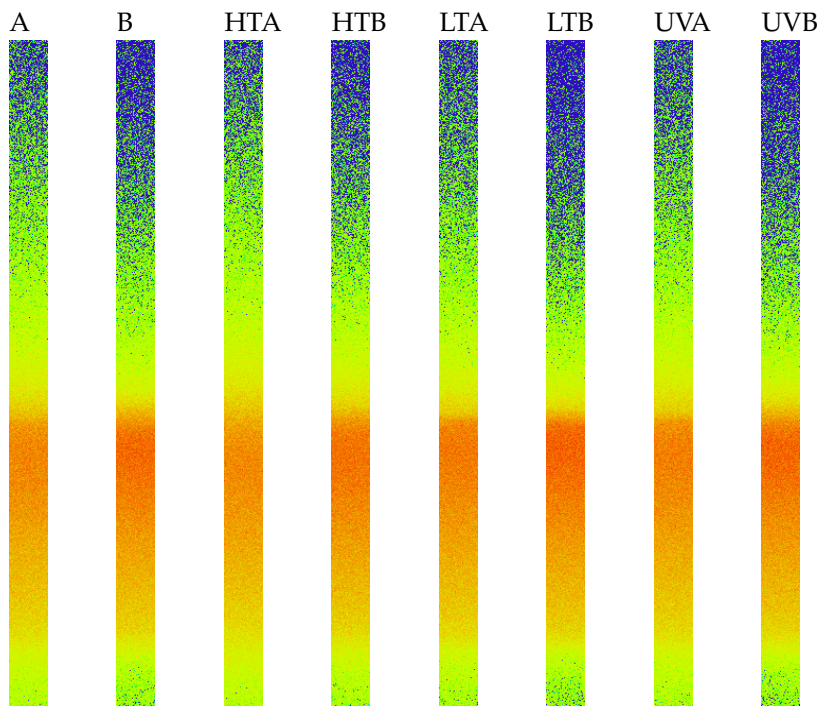


Obrázek 83 | Souhrnné srovnání rozptylů jednotlivých vzorků na malé části z válcového detektoru (1/36 z celkové plochy).

Shrnutí: po dosažení všech naměřených optických veličin a stanovení účinností jednotlivých vzorků se dá jednoznačně tvrdit, že vyšší účinnosti bude dosaženo použitím fólie B. Ta má ve všech případech účinnost vyšší než fólie A o přibližných 6 %. Tento fakt je způsoben jak vyšší odrazností fólie B, tak jejím menším rozptylem v oblasti vyšších úhlů. Přestože má nepatrně větší rozptyl než fólie A v oblasti spekulárního svazku, je její účinnost vyšší, neboť rozptyl v oblasti malých úhlů je pokryt válcovým detektorem. Mimo jiné, je to dokonce pozitivní jev z ohledu k PV, kde je výhodnější mít osvětlenou plochu větší, a ne koncentrovanou čistě v jednom bodě (v poměru na velikosti PV plochy, která není vytvořena pouze z jednoho dílu). To, že nejmenší účinnost vyšla právě u nezatížených vzorků A a B může být způsobeno nepřesnostmi měření, velkou nehomogenitou fólií vyráběných továrně (komentované již v 4.4.4), nebo jinou chybou v měření. Vzhledem k prvním dvěma bodům se tedy mohlo stát, že s ohledem na nehomogenitu fólií byl náhodou vybrán nekvalitní vzorek pro měření A a B a kvalitnější vzorky pro ostatní měření. Je nutno si ovšem povšimnout, že u nezatížených vzorků je odchylka měření nejvyšší. Každopádně jak u vzorků A, tak i u vzorků B se objevuje stejný trend, kdy hodnoty účinností jsou řazeny v následujícím pořadí: $LT > UV > HT > A/B$. Pomineme-li poslední nezatížené vzorky ovlivněné nejvyšší odchylkou, dá se předpokládat, že v reálném využití se bude fóliím dařit nejlépe v chladných klimatických podmínkách. Hůře potom v prostředí s vysokou teplotou. Rozdíl je však pouze 1 %. Jelikož využití má být přímo spojeno s koncentrací slunečních paprsků, projeví se UV zátěž u obou případů zvýšené i snížené teploty. U snížené teploty se ovšem dá předpokládat, že bude mít nižší vliv než u teploty zvýšené z důvodu energie a úhlu dopadajících paprsků v různých místech na zemském povrchu. rozptyly jsou pro lepší představu uvedeny také v logaritmické škále (viz. 84 a 85).



Obrázek 84 | Rozptyly všech vzorků na roztaženém plášti válcového detektoru v logaritmické škále. Hodnoty v pravých sloupcích jsou ve wattech.



Obrázek 85 | Souhrnné srovnání rozptylů jednotlivých vzorků na malé části z válcového detektoru (1/36 z celkové plochy) v logaritmické škále.

Závěr

Prvním úkolem diplomové práce bylo proměřit optické a mechanické vlastnosti různých vzorků. Nejvíce vzorků bylo proměřeno na integrační kouli a spektrometru za účelem zjištění spektrální odraznosti. Byla zvolena spodní hranice odraznosti a tímto způsobem byly vyselektovány jen vzorky s odrazností větší než 80 % v celém rozmezí měřených vlnových délek. Tímto kritériem prošly pouze dva vzorky (vzorek A a vzorek B), na kterých následně proběhly zátěžové testy. Degradované vzorky byly také změřeny. S výjimkou vzorku vystavenému zvýšené vlhkosti. U něj se projevila degradace na takové úrovni, že již nezbyl dostatek odrazné vrstvy, aby měření mělo smysl. V měřeních spektrální odraznosti lépe dopadly vzorky B, které měly vyšší odraznost ve všech případech. Podobně tomu bylo u rozptylových vlastností, kde opět vycházely lepší výsledky u vzorků B. Jinak tomu bylo pouze u mechanických testů, kde se výsledky lišily vzorek od vzorku. Nedá se tedy říci, že by jeden typ fólie byl lepší než druhý. Z provedených testů zatížení je patrný rozdíl v odezvě tenkovrstvého systému v závislosti na způsobu degradace spočívajícího v různé četnosti prasklin. Obecně, odolnost vrstev proti opotřebení je dobrá, bez známek katastrofického poškození odrazné vrstvy bez ohledu na typ degradace.

Hlavním cílem práce bylo spočítat celkovou účinnost zařízení SkyFlower[®] a stanovit její změnu v závislosti na způsobu degradace. A to vše pomocí výše komentovaných experimentálně naměřených dat a parametrů zařízení dodaných firmou Or Hama Energy[®] s.r.o. V obou případech (vzorky A i vzorky B) se objevil netradiční výsledek (avšak očekávaný ze znalosti výsledků odrazností), kdy s použitím nezatížených vzorků bylo dosaženo nižší účinnosti, než se vzorky "degradovanými". Jak již bylo komentováno několikrát, tento fakt je s nejvyšší pravděpodobností spojen s nehomogenitou fólií vyráběných továrně v daných tolerancích. Je tedy silně závislý na místě, na kterém byl daný vzorek zkoumán. Roli také hraje korekční měření spektrální odraznosti provedené na nezatížených vzorcích (u zatížených vzorků nemohlo být provedeno, protože nezbylo dost vzorků z daných zátěžových testů). S jistotou lze ovšem říci, že při srovnání výsledků ze vzorků A a ze vzorků B je vidět přibližně o 6 % vyšší účinnost při použití vzorků B. Tento výsledek koreponduje se všemi předpoklady odvozenými z předešlých měření (vyšší odraznost a menší rozptyl).

Shrnou-li se všechny výsledky dohromady, pak se k reálným aplikacím hodí více fólie typu B. Z e zátěžových testů zase nejlépe obstály vzorky vystavené snížené teplotě. Celková účinnost by se s největší pravděpodobností dala trochu zvýšit úpravou celkové geometrie zařízení, to však nebylo předmětem této diplomové práce a je ponecháno pro soukromou konzultaci se zástupci firmy Or Hama Energy[®] s.r.o. Lze konstatovat, že i přes některé neočekávané výsledky a se zohledněním všech aspektů se měření a výpočty dají považovat za správné v rozmezí jejich směrodatných odchylek.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Energy. (2018, May 12). Retrieved May 12, 2018, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Energy>
- [2] Energy conversion efficiency. (2018, May 09). Retrieved May 12, 2018, from https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_conversion_efficiency
- [3] O ÚČINNOSTI PŘEMĚN ENERGIE. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/ucinost_2.html
- [4] Kusala, J. (n.d.). SOLÁRNÍ ENERGIE. Retrieved May 12, 2018, from <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k13.htm>
- [5] Slunce a jeho energie. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/1948-slunce-a-jeho-energie>
- [6] Electric energy consumption. (2018, May 12). Retrieved May 12, 2018, from https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_energy_consumption
- [7] Servisní středisko pro podporu e-learningu na MU, servistech (at) fi.muni.cz. (n.d.). 3. 1 Zdroje energie. Retrieved May 12, 2018, from <https://is.muni.cz/elportal/estud/pedf/js10/antropog/web/pages/3-1-zdroje-energie.html>
- [8] Fil:Global Energy Potential 2014 08 09.svg. (n.d.). Retrieved August 15, 2018, from https://no.wikipedia.org/wiki/Fil:Global_Energy_Potential_2014_08_09.svg
- [9] Haderka, O. (n.d.). Detekce světla. Retrieved May 12, 2018, from <http://jointlab.upol.cz/haderka/detection.html>
- [10] Solar irradiance. (2018, May 12). Retrieved May 12, 2018, from https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_irradiance
- [11] Air mass (solar energy). (2018, April 03). Retrieved May 12, 2018, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_\(solar_energy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_(solar_energy))
- [12] How do Photovoltaics Work? (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells>
- [13] Department of Physics. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/current/postgraduate/regs/mpagswarwick/ex5/bandstructure/>
- [14] Solar Cell Structure. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <http://pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-structure>
- [15] Ebong, A., Chen, Nian. (2012). Metallization of crystalline silicon solar cells: A review. 2012 9th International Conference on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies, HONET 2012. 102-109. doi: 10.1109/HONET.2012.6421444, from <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6421444&isnumber=6421421>
- [16] Measuring PV Efficiency. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <http://www.pvpower.com/assets/Measuring-PV-Efficiency-Solar-Panels.pdf>
- [17] The Shockley-Queisser limit. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from http://ph.qmul.ac.uk/sites/default/files/u75/Solarcells_environmentalimpact.pdf
- [18] The Solar Energy Group, The University of Sydney. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <http://www.physics.usyd.edu.au/app/solar/research/pv.html>
- [19] 3 Generations of Solar Cells: Solar Facts and Advice. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <http://www.solar-facts-and-advice.com/solar-cells.html>
- [20] Photovoltaics. (2018, May 12). Retrieved May 12, 2018, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>

- [21] Third-generation photovoltaics. (2007, October 12). Retrieved May 12, 2018, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136970210770278X>
- [22] Recent advances in perovskite-based solar cells. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <http://www.currentscience.ac.in/Volumes/111/07/1173.pdf>
- [23] Perovskite solar cell. (2018, May 06). Retrieved May 12, 2018, from https://en.wikipedia.org/wiki/Perovskite_solar_cell
- [24] How It Works. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <http://morgansolar.com/how-it-works/>
- [25] Pravettoni, M., Galleano, R., Fucci, R., Kenny, R. P., Romano, A., Pellegrino, M., Aitasalo, T., Flaminio, G., Privato, C., Zaaiman, W., Dunlop, E. D. (2011). Characterization of high-efficiency c-Si CPV cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(7), 898-907, from <https://doi.org/10.1002/pip.1101>
- [26] BLAU, G. (2013). U.S. Patent No. WO 2013/093909 (A1). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office from https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?FT=D&date=20140807&DB=&locale=en_EP&CC=AU&NR=2012356054A1&KC=A1&ND=4
- [27] Or Hama Energy® s.r.o. (n.d.). SkyFlower®. Technologie, která mění svět. Retrieved May 12, 2018, from <http://orhamaenergy.eu/>
- [28] Křepelka, J. (2014). Úvod do optiky tenkých vrstev. Olomouc, CZ: Univerzita Palackého v Olomouci. Otevřená síť partnerství na bázi aplikované fyziky CZ.1.07/2.4.00/17.0014
- [29] Thin film. (2018, May 12). Retrieved May 12, 2018, from https://en.wikipedia.org/wiki/Thin_film
- [30] G. (n.d.). Ústav pro hydrodynamiku. Retrieved August 15, 2018, from http://www.ih.cas.cz/files/uploads/3_vyzkum/6_pristroje/Tescan_Vega3_LMU-brochure.pdf
- [31] Integrating sphere. (2018, April 28). Retrieved May 12, 2018, from https://en.wikipedia.org/wiki/Integrating_sphere
- [32] Tech Guide: Integrating Sphere Theory and Applications - Labsphere | Internationally Recognized Photonics Company. (n.d.). Retrieved March 28, 2018, from <https://www.labsphere.com/support/system-product-brochures/tech-guide-a-guide-to-integrating-sphere-theory-and-applications/>
- [33] Stover, J. C. (1995). *Optical scattering: Measurement and Analysis* (2.nd ed.). Washington, USA: Spie Optical Engineering.
- [34] Pech, M. (2012). *Charakterizace povrchu optických reflexních ploch*. Olomouc, CZ: Univerzita Palackého v Olomouci.
- [35] Fischer-Cripps, A. C. (2004). *Nanoindentation* (2.nd ed.). New York, USA: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-1-4757-5943-3
- [36] Čtvrtlík, R., Stranyánek, M., Boháč, P., Jastrabík, L. (2006). NanoTest™ NT600 - A DEVICE FOR ANALYSES OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS. *MATERIALS STRUCTURE in Chemistry, Biology, Physics and Technology*, 13(2), 90-93. Retrieved March 28, 2018, from <https://www.xray.cz/ms/bul2006-2/ctvrtlik.pdf>.
- [37] Jan Tomáščík, Hana Šebestová, Radim Čtvrtlík, Petr Schovánek, "Laser scanning confocal microscopy in materials engineering", *Proc. SPIE 8697, 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*, 869710 (18 December 2012); <https://doi.org/10.1117/12.2010259>
- [38] Lamp Bulb, 200W Mercury-Xenon (HgXe). (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <http://www.sciencetech-inc.com/all-products/light-sources/accessories/lamps/mercury-xenon-hg-xe-short-arc-lamps/lamp-bulb-200w-mercury-xenon-hgxe.html>

- [39] Halogen light sources. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from https://lot-qd.de/fileadmin/Mediapool/products/lightsources/en/LQ_200_400_W_halogen_light_source_en.pdf, from page <https://lot-qd.cz/cs/>
- [40] AvaSpec-ULS2048 StarLine Versatile Fiber-optic Spectrometer. (n.d.). Retrieved May 8, 2018, from <http://web.unideb.hu/uh9v32/muszer2/avaspec.pdf>.
- [41] OPÍČHAL, Antonín. Řízení a automatizace procesů pomocí distribuovaných sítí systémů firmy Siemens [online]. Olomouc, 2016 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/tafhtu/>. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D..
- [42] Solar Spectral Irradiance: ASTM G-173. (n.d.). Retrieved May 12, 2018, from <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>
- [43] ZEMAX manual. (2011, July 8). Retrieved May 12, 2018, from <https://neurophysics.ucsd.edu/Manuals/Zemax/ZemaxManual.pdf>
- [44] Nozka, L., Pech, M., Hiklova, H., Mandat, D., Hrabovsky, M., Schovanek, P., Palatka, M. (2011). BRDF profile of Tyvek and its implementation in the Geant4 simulation toolkit. Optics Express, 19(5), 4199-4209. <https://doi.org/10.1364/OE.19.004199>
- [45] Rykowski, R. (2008, February 05). BSDF Data Interchange File Format Specification. Retrieved August 2, 2018, from <http://customers.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/bsdf-data-interchange-file-format-specification>

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	plocha vtisku
AM	označení pro míru ovlivnění záření procházející atmosférou
ARS	metoda pracující s prostorovým rozložením intenzit rozptýleného záření
BRDF	dvousměrná distribuční funkce rozptýleného (pouze odraženého) záření
BSDF	dvousměrná distribuční funkce rozptýleného záření
BTDF	dvousměrná distribuční funkce rozptýleného (pouze prošlého) záření
CASI	zařízení sloužící k proměření a vyhodnocení pole rozptýleného světla
CPV	koncentrovaná fotovoltaika
CVD	chemická depozice z plynné fáze
\vec{E}	elektrická intenzita
E_e	intenzita ozáření
E_E	modul pružnosti
E_p	energie fotonu
f	podíl plochy portů
fólie A	první typ fólie s menší ochrannou vrstvou
fólie B	druhý typ fólie s větší ochrannou vrstvou
fólie D	mechanicky poničený vzorek
fólie H	fólie vystavena zvýšené vlhkosti
fólie HT	fólie vystavena zvýšené teplotě
fólie LT	fólie vystavena snížené teplotě
fólie S	fólie vystavena slanému prostředí
fólie UV	vzorek vystaven UV záření
fólie Z	zlatá strana fólie
fólie ZF	záchranná fólie
fólie ZFZ	zlatá strana záchranné fólie
\vec{H}	magnetická intenzita
H_e	ozáření
H_{IT}	vtisková tvrdost
I	zářivost
L	zář
LC	kritická zátěž
M	multiplikátor sféry
M_r	intenzita vyzařování
MBE	epitaxe molekulárním paprskem
MEMS	mikroelektromechanické systémy
MPWR	vícepřejezdový test opotřebení
N_p	počet fotonů
NEMS	nanoelektromechanické systémy
P_{out}	výkon
P_{in}	příkon
PSF	rozptylová funkce bodu
PV	fotovoltaika
PVD	fyzikální depozice z plynné fáze
Q	zářivá energie
\vec{S}_p	Poyntingův vektor
S-Q limit	Shockleyův-Queisserův limit
SNR	poměr signálu k šumu
ST	vrypová zkouška
TIS	metoda detekující celkový výkon rozptýleného záření
TV	tenká vrstva
W	hustota zářivé energie
λ	vlnová délka
ν	účinnost
ρ	odraznost
τ	transmise
Φ	zářivý tok