

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA OPTIKY

**Napařování a měření tenkých vrstev v UV
oblasti**

-

**Deposition and measurement of thin films
in UV region**

Bakalářská práce

Vypracoval:	Monika Nováková
Studijní program:	B1701 - Fyzika
Studijní obor:	bakalářské studium Optika a optoelektronika
Forma studia:	prezenční
Vedoucí práce:	Mgr. Jiří Kyvalský
Rok odevzdání práce:	2010

Poděkování:

Tímto bych chtěla upřímně poděkovat Mgr. Jiřímu Kyvalskému a Bc. Tomáši Konkolovi, za odborné vedení a ochotu při vzniku této bakalářské práce. Dále bych chtěla také poděkovat Prof. Dr. RNDr. Zdeňku Bouchalovi za zprostředkování této práce. A nakonec Meoptě-optika s.r.o. za umožnění vypracování bakalářské práce.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Napařování a měření tenkých vrstev v UV oblasti“ vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

OLOMOUC 2010

Monika Nováková

.....

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora:	Monika Nováková
Název práce:	Napařování a měření tenkých vrstev v UV oblasti
Typ práce:	Bakalářská práce
Pracoviště:	Meopta-optika, s.r.o.
Vedoucí práce:	Mgr. Jiří Kyvalský
Rok obhajoby práce:	2010
Počet stran:	62
Počet příloh:	9
Jazyk:	Čeština

Abstrakt:

Vzhledem ke snaze dosáhnout větší hustoty prvků na integrační desce se stále zvyšují nároky na zařízení vyrábějící, resp. kontrolující integrační obvody pomocí laserové litografie. Ke zvýšení rozlišovacích schopností se využívají lasery se stále menší pracovní vlnovou délkou ležící v UV či DUV (hluboká UV z anglického jazyka deep, proto zkratka DUV) oblasti. Zařízení schopná pracovat v UV oblasti však vyžadují speciální optiku. V této práci se proto zaměřuji na výrobu a kontrolu optických kusů vhodných pro ultrafialovou oblast.

Tato práce je zaměřena na výrobu a kontrolu optických kusů vhodných pro ultrafialovou oblast. První část práce obsahuje teorii týkající se výroby a kontroly optických tenkých vrstev, dále jsou zde uvedeny veličiny popisující spektrální vlastnosti optických tenkých vrstev, různé typy skel, tenkých vrstev a materiálů vhodných pro výrobu tenkých vrstev. V další části práce je popsán princip výroby tenkých vrstev (napařování) a následné měření spektrálních parametrů vrstev pomocí spektrometru doplněného měřením pomocí laseru. V závěrečné části je uveden podrobnější popis kontroly optických vlastností vybraného optického kusu i s výsledky měření.

Klíčová slova: Elektromagnetické záření, ultrafialové záření, tenké vrstvy, spektrum, vakuová aparatura, spektrometrie, laser.

Bibliographical identification:

Autor's first name and surname: Monika Nováková
Title: Deposition and measurement of thin films in UV region
Type of thesis (bachelor, master): Bachelor
Workplace: Meopta-optika, s.r.o.
Supervisor: Mgr. Jiří Kyvalský
The year of presentation: 2010
Number of pages: 62
Number of appendices: 9
Language: Czech

Abstract:

Because we want to get bigger volume density on the integrative desk, we need higher pretencion of machines, which created or controlled integrative perimetres by laser litografy. We use lasers with better abilities of distinction and smaller work wave lenght lying in UV or DUV area. Machines, which work in UV area, need a special optics. In my work Iconcetrate for the production and controll of optics areas, which we can use for ultra-violet area.

This work is concetrated on production and control of optics applied in ultraviolet region. First part of the work includes theory regarding to production and control of optical thin films, further there are presented quantities describing spectral characteristics of optical thin films, variety of glass, thin films and materials suitable for production of thin films. In the following part of work the process of production of thin films is described including measurement of spectral parameters of films with the spectrometer and the laser. In the last chapter there is presented more detailed description of control of optical characteristics of an optical piece with the attached measured results.

Keywords: Electromagnetic radiation, ultra-violet, thin films, spectrum colour, vacuum deposition system, spectrometers, laser.

Obsah:

1. Teoretický úvod	str. 7
1.1. Elektromagnetické záření	
1.2. Typy záření	
1.3. Spektrometrie	
2. Popis tenkých optických vrstev	str. 12
2.1. Veličiny popisující spektrální vlastnosti optických tenkých vrstev	
3. Typy tenkých vrstev	str. 14
3.1. Antireflexní – Protiodrazné vrstvy	
3.2. Optické děliče	
3.3. Vysoce reflexní vrstvy	
3.4. Filtry	
4. Spektrální charakteristiky skel	str. 18
4.1. Tavený křemen (Fused silica)	
4.2. Kalcium fluorid (CaF_2)	
5. Materiály používané pro zhotovení tenkých vrstev	str. 20
6. Napařování	str. 21
6.1. Možnosti uložení substrátu uvnitř komory	
6.2. Monitorování procesu napařování	
6.3. Proces napařování	
6.4. Napařovací rychlost	
6.5. Možnosti napařování	
7. Spektrální měření	str. 26
7.1. Druhy spekter	
7.2. Sestava spektrometru	
7.3. Typy spektrometru	
7.4. Princip měření spektrometrem	
7.5. Rozdíl mezi měřením v UV a VIS oblasti	
8. Měření pomocí laseru	str. 33
8.1. Sestava pro měření laserem	
8.2. Princip měření laserem	

Přílohy	str. 34
A. Fotografie vakuových napařovaček	str. 34
B. Fotografie součástek používaných k napařování tenkých vrstev	str. 36
C. Fotografie spektrometru	str. 38
D. Některé další typy polarizačních hranolů	str. 40
E. Měření spektrometrem	str. 41
F. Fotografie optické lavice se sestavou pro měření laserem	str. 52
G. Fotografie dalších součástek používaných pro měření optických vlastností	str. 54
H. Měření laserem	str. 55
I. Parametry laseru použitého pro měření	str. 57
Závěr	str. 58
Použitá literatura	str. 60

1. Teoretický úvod

1.1. Elektromagnetické záření

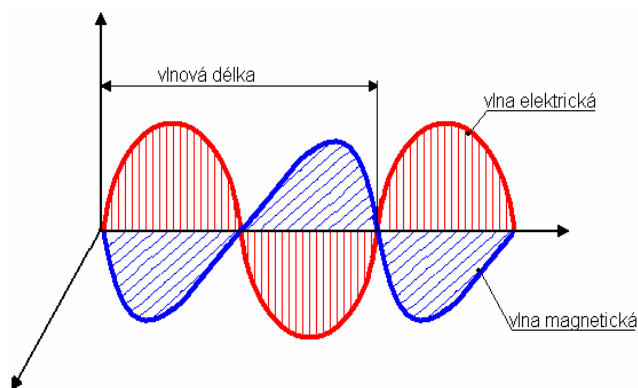
Elektromagnetické záření je kombinace magnetického pole a elektrického pole (Obr.1). Vektory intenzity elektrického pole a magnetického pole jsou na sebe navzájem kolmé. Elektrické pole, které se pohybuje nebo se mění, vyvolá magnetické pole a měnící se nebo pohybující se magnetické pole vyvolává elektrické pole. Elektromagnetické vlny lze charakterizovat vlnovou délkou [1].

Vlnová délka označuje vzdálenost mezi dvěma body vlnění, které kmitají se stejnou frekvencí. Vlnovou délku označujeme λ a její základní jednotkou je metr.

K vyjádření vlnové délky lze použít vztah $\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$, kde T je perioda, f je frekvence vlnění a v je fázová rychlost šíření vlny.

Rychlost světla v v látce o určitém indexu lomu n vypočteme ze vztahu $v = \frac{c}{n}$, kde c je rychlost světla ve vakuu ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

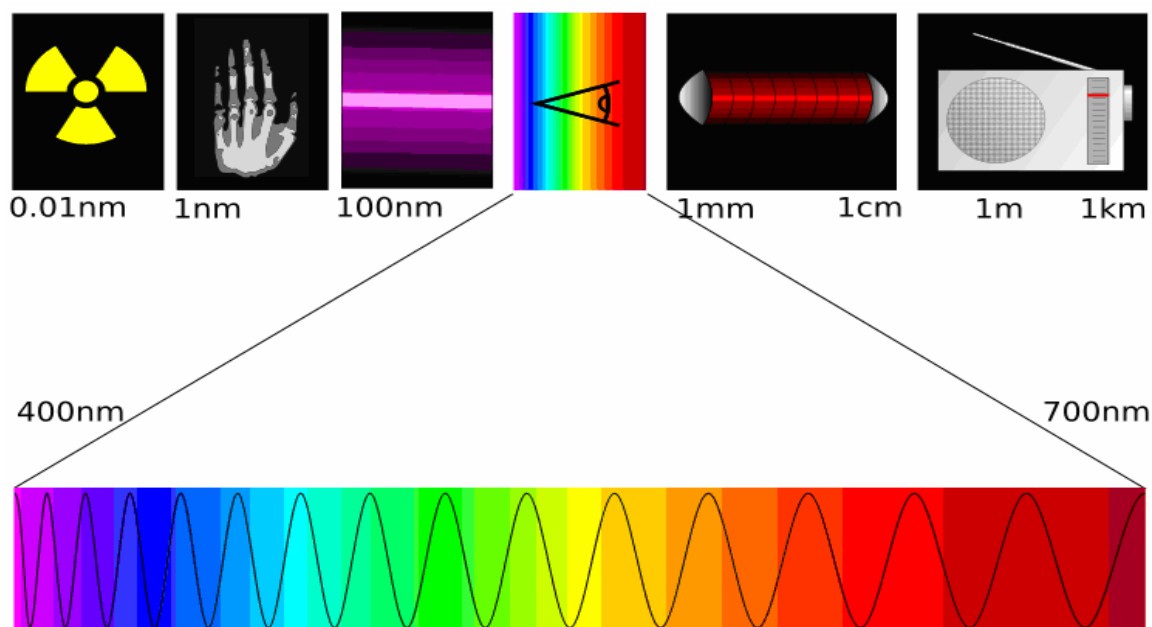
Elektromagnetické vlny, které se šíří rychlostí světla ve vakuu vyvolávají kmitavý elektrický obvod. Jako zdroj elektromagnetického vlnění můžeme považovat každé těleso, od něhož světlo přichází. Světelné zdroje jsou přirozené a umělé. Přirozené zdroje světla jsou takové, kde světlo vzniká přímo ve zdroji např: Slunce, plamen, žárovka, výbojka, lasery atd. Umělý světelný zdroj získáme odrazem světla od tělesa, jako je např: Měsíc, mraky, papír, stěna a všechny ostatní světelné předměty [1].



Obr.1: Elektromagnetické záření

1.2. Typy záření

Elektromagnetické záření v sobě zahrnuje různé typy záření: infračervené (IR - infrared), viditelné (VIS - visible) a ultrafialové (UV - ultraviolet) (Obr.2).



Obr.2: Dělení elektromagnetického záření (Převzato z [7])

a) Infračervené záření – IR (infrared)

Vložíme-li teploměr se začerněnou teploměrnou nádobou do spektra, zjistíme, že ve fialové části bude teplota podstatně nižší než v části červené. Budeme-li teploměr posunovat dále za červený okraj spektra, můžeme pozorovat zřetelné tepelné účinky i tady. Existuje tedy záření, jehož vlnová délka (od 1mm do 750 nm) je větší než u viditelného světla a zrakem ho už nevnímáme. Toto záření nazýváme **infračervené**. Platí zde stejné zákony jako u viditelného světla.

Běžným zdrojem infračerveného záření je sluneční záření, žárovka s wolframovým vláknem, oblouková lampa nebo jím může být třeba elektrická rozžhavená tyč z karbidu křemíku [2].

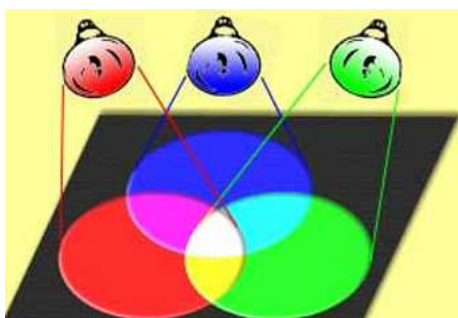
b) Bílé světlo – VIS (visible spectrum)

Bílé světlo není světlo jedné vlnové délky λ , ale z velkého množství různých vlnových délek. Tedy i různých frekvencí f a energiemi fotonů E .

Skládání barev ve viditelné oblasti:

- **Aditivní, součtové skládání základních barevných světél R,G,B:**

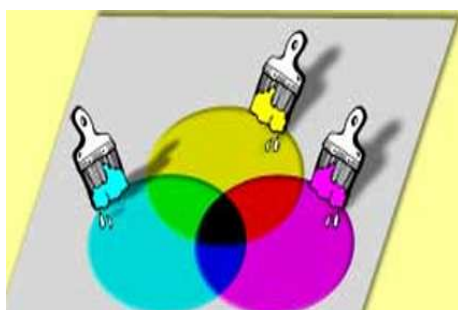
Barva je vytvářena sčítáním jednotlivých složek spektra (Obr.3). Jako základní barvy se používají červená, zelená a modrá (Red, Green, Blue – odtud zkratka R,G,B). Na tomto principu pracují např.: monitory [3,4].



Obr.3: Aditivní skládání barev (Převzato z [3])

- **Subtraktivní, odečtové skládání doplňkových barev C,M,Y a C,M,Y,K:**

Každá další barva ubírá část původního světla (Obr.4). Výsledná barva po odrazu obsahuje jen ty vlnové délky, které nebyly pohlceny [3,4].



Obr.4: Subtraktivní skládání barev (Převzato z [3])

Doplňkové barvy jsou azurová, purpurová a žlutá (Cyan, Magenta, Yellow – odtud zkratka C,M,Y). Na tomto principu pracují např.: tiskárny.

Protože při míchání černé barvy by se spotřebovalo velké množství doplňkových barev a úplně čisté černé barvy bychom nikdy nedocílili, zavádíme černou barvu samostatně. Potom má odečtové skládání doplňkových barev zkratku C,M,Y,K (Cyan, Magenta, Yellow, black – aby se označení černé barvy nepletlo s označením barvy modré, značíme černou barvu písmenem K).

Barva červená a modrá se složí v barvu purpurovou, která není ve spektru, a jejím doplňkem je barva zelená.

Jednotlivé spektrální barvy jsou jednoduché a dále se již nerozkládají.

Složením všech spektrálních barev dostaneme opět světlo bílé. Barvu bílou dostaneme i spojením tří doplňkových barev spektra. Naopak zkombinováním tří základních barev spektra dostaneme barvu černou [3,4].

c) **Ultrafialové záření – UV (ultraviolet)**

Zachytíme-li horní část spektra na bílý papír a dolní část na stínítko potřené sirníkem zinečnatým (ZnS), zjistíme, že stínítko světélkuje jasně zelenou barvou nejen ve fialové části viditelného spektra, ale i v oblasti nižších vlnových délek. Tedy i tam, kde oko už není schopné vnímat světlo, je záření schopno vyvolat fluorescenci. Tomuto záření říkáme **ultrafialové**. Jeho vlnová délka (350 až 10 nm) je menší než u viditelného světla, ale větší než u rentgenového záření. Pro člověka je toto záření neviditelné, ale existují živočichové, kteří UV záření vnímají. Láma a odráží se podobně jako záření viditelné.

Zdrojem ultrafialového záření jsou velmi často tělesa rozžhavená na velmi vysokou teplotu např.: Slunce (nejčastější zdroj), elektrický oblouk, ale zdrojem ultrafialového záření může být také oblouková lampa.

Ultrafialové záření působí hojivě, ničí bakterie a jiné mikroorganismy (používá se k sterilizaci pitné vody). Vlivem ultrafialového záření blednou barevné látky na světle a mnohé látky ozářené ultrafialovým zářením září ve tmě oslnivými barvami (použití ke kontrole čistoty potravin, rozpoznání padělků bankovek a obrazů, atd.).

Ultrafialové záření je pohlcováno atmosférou, proto jsou jeho účinky na vysokých horách v řídkém a čistém vzduchu mnohem vyšší než v nížině [2].

Tab.1: Druhy elektromagnetického vlnění:

Druh elektromagnetického vlnění			Frekvence	Vlnová délka
Rádiové vlny		Extrémně dlouhé vlny	3 až 3000 Hz	v rozmezí milimetrů až stovek metrů
	VDV	Velmi dlouhé vlny	3 až 30 kHz	
	DV	Dlouhé vlny	30 až 300 kHz	
	SV	Střední vlny	0,3 až 3 MHz	
	KV	Krátké vlny	3 až 30 MHz	
	VKV	Velmi krátké vlny	30 až 300 MHz	
	UKV	Ultra krátké vlny	0,3 až 3 GHz	
	SKV	Super krátké vlny	3 až 30 GHz	
	EKV	Extrémně krátké vlny	30 až 300 GHz	
Mikrovlny		SHF	3 až 30 GHz	menší než 1 m a větší než 1 mm
		EHF	30 až 300 GHz	
Infračervené světlo	IR		300 GHz až 400 THz	menší než 1 mm a větší než 750 nm
Viditelné světlo	VIS	červená	~ 480 až 405 THz	~ 750 až 625 nm
		oranžová	~ 510 až 480 THz	~ 625 až 590 nm
		žlutá	~ 530 až 510 THz	~ 590 až 565 nm
		zelená	~ 580 až 530 THz	~ 565 až 520 nm
		azurová	~ 600 až 580 THz	~ 520 až 500 nm
		modrá	~ 700 až 600 THz	~ 500 až 430 nm
		fialová	~ 790 až 700 THz	~ 430 až 350 nm
Ultrafialové světlo	UV		700 THz až 30PHz	350 až 10 nm
Rentgenové záření	RTG		30 PHz až 6 EHz	10 až 0,1 nm
Gama záření			od 6 EHz a nižší	kratší než 0,1 nm

1.3. Spektrometrie

Spektrometrie se zabývá elektromagnetickým spektrem a jeho vlastnostmi.

Spektrometrii zjišťujeme pomocí vědeckého přístroje spektrometr, který nám pomáhá zjistit chemické složení látky nebo tělesa. Princip spektrometru je v měření spektrálních vlastností měřených kusů v závislosti na vlnové délce dopadajícího světla. Spektrometr využíváme ke kontrole veličin popisujících spektrální vlastnosti optických tenkých vrstev napařených na optickou součást (odrazivost a propustnost). Jako další způsob používaný ke kontrole veličin popisujících spektrální vlastnosti optických tenkých vrstev můžeme použít měření pomocí laseru.

2. Popis tenkých optických vrstev

Za tenkou optickou vrstvou považujeme vrstvu dielektrického, kovového nebo polovodičového materiálu o tloušťce srovnatelné s vlnovou délkou světla. Charakteristika tenké vrstvy je závislá na koherentních vlastnostech daného záření. Počet vrstev na jedné optické součásti může být různý, od jedné vrstvy až po několik desítek vrstev.

Tenké vrstvy se zhotovují většinou napařováním, které probíhá ve vakuu. Nejčastěji se napařují oxidy (např.: Al_2O_3 Oxid hlinitý, HfO_2 Oxid hafničitý), dále také fluoridy (např.: MgF_2 Fluorid hořečnatý), někdy i kovy (např.: stříbro, hafnium). Tenké vrstvy se také mohou zhotovovat katodovým rozprašováním, stříkáním, elektrolytickým nanášením atd.

Typ tenké vrstvy se vyrábí podle pozdějšího použití optické součásti [1].

2.1. Veličiny popisující spektrální vlastnosti optických tenkých vrstev

Transmise: Je veličina, která popisuje množství světla určité vlnové délky, které prošlo vzorkem. Transmisi vyjádříme pomocí podílu intenzity světla, která prošla vzorkem - I a intenzity světla, která do vzorku vstoupila - I_0 . $\rightarrow T = \frac{I}{I_0}$ [8].

Reflexe: Jde o veličinu popisující množství světla, které se odrazí od vzorku při dopadu světla na optické rozhraní. Reflexi vyjádříme pomocí podílu intenzity světla, která do vzorku vstoupila - I a intenzity odraženého světla - I_1 . $\rightarrow R = \frac{I_1}{I}$

Absorpce světla: Optické prvky jsou vyráběny z materiálů, které světlo pohlcují a dochází ke ztrátám světla. Všechny paprsky se nedostanou až za optický prvek. Čím větší mohutnost optického prvku, tím větší absorpce světla. Záleží ovšem také na použitém materiálu [9].

Disperze: Disperze (rozklad) je závislá na vlnové délce. Bílé světlo se neláme na rozhraní dvou optických prostředí s jinými indexy lomu stejně, ale rozkládá se v úzký barevný proužek a tomuto jevu říkáme rozklad neboli disperze světla [10].

Musí platit:

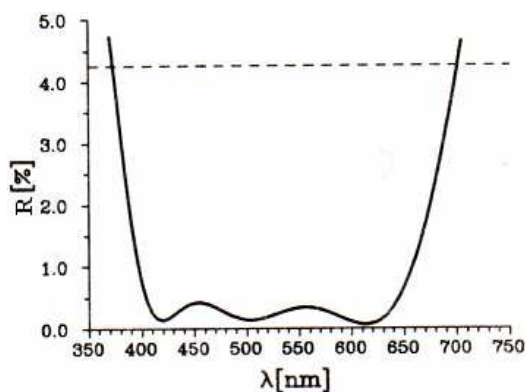
$$100\% = (\text{TRANSMISE} + \text{ABSORPCE}) + (\text{REFLEXE} + \text{DISPERZE})$$

Ze vzorce plyne, že disperze je závislá na reflexi a absorpce na transmisi, ale vzhledem k tomu, že disperze je velmi malá, tak s ní nepočítáme.

3. Typy tenkých vrstev

3.1. Antireflexní (protiodrazné) vrstvy

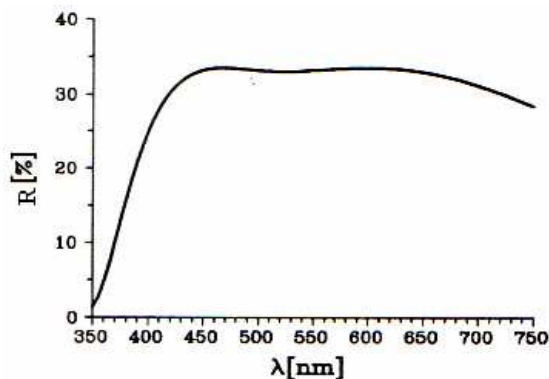
Při průchodu světla dvěma optickými rozhraními nepřechází všechna světelná energie do druhého prostředí, ale určitá část se odrazí zpět do prostředí prvního. Dochází tedy ke ztrátám světla. Ztráty světla způsobené odrazem a rozptylem silně rostou s počtem ploch optické soustavy. Podstatného snížení těchto nepříznivých jevů dosáhneme použitím antireflexních neboli protiodrazných vrstev. Můžeme tedy říct, že antireflexní vrstvy snižují koeficient reflexe optické součásti pro danou vlnovou délku nebo určitou oblast vlnových délek. Na obrázku 5 je čárkovaně vyznačena přibližná reflexe optické součásti bez antireflexní vrstvy a plnou čarou reflexe soustavy s antireflexní vrstvou. Antireflexní vrstvy se používají pro zvýšení světelnosti fotografických objektivů a současně pro potlačení šumu v obraze, v brýlové optice, v barvodělicích soustavách a dále všude tam, kde má vstupovat co největší množství světla a přitom není na ploše další vrstva [1,5].



Obr.5: Reflexe antireflexních vrstev (Převzato z [5])

3.2. Optické děliče

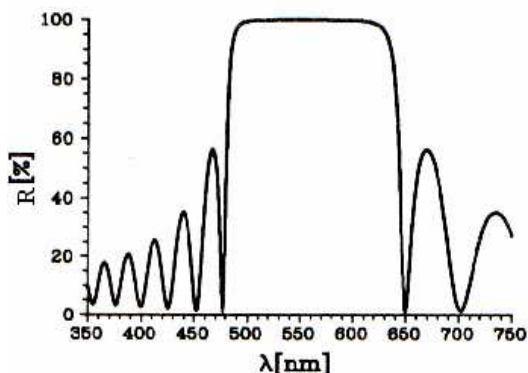
Optické děliče (Obr.6) jsou prvky, u kterých využíváme jak reflexi tak transmisi. Nemusí nutně platit, že jde o děliče 1:1 (50% světla odrazí a 50% propouští), které se využívají např: v interferometrech, ale mohou být i jiných poměrů [1,5].



Obr.6: Reflexe šedého filtru tvořeného dielektrickými vrstvami (Převzato z [5])

3.3. Vysoce reflexní vrstvy

Vysoce reflexní vrstvy (Obr.7) se používají k výrobě zrcadel s vysokou reflexí. Zrcadla vyrobená dielektrickými tenkými vrstvami mají podstatně vyšší úroveň reflexe a odolnosti než zrcadla vyrobená z kovových materiálů [1,5].

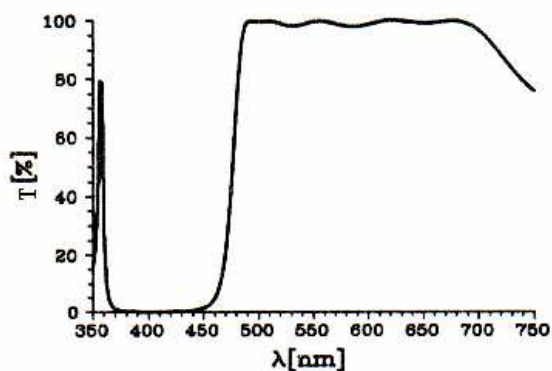


Obr.7: Vysoce reflexní vrstva (Převzato z [5])

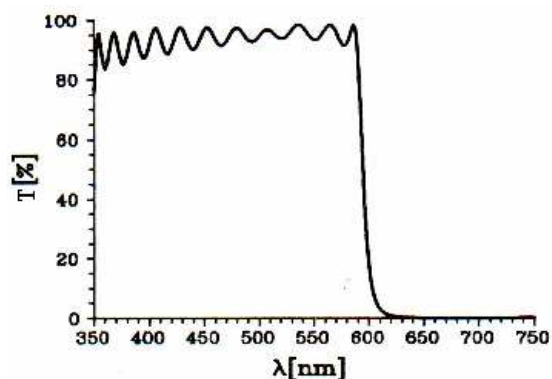
3.4. Filtry

a) Barevné filtry

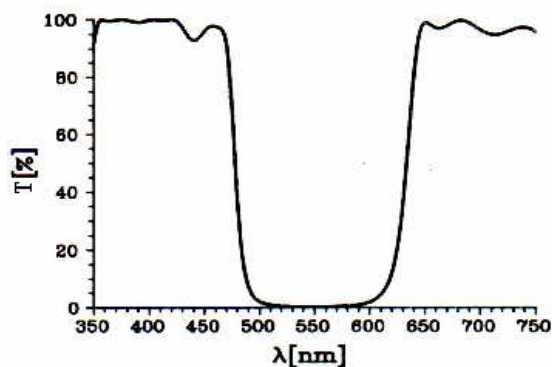
Filtry s použitím horní (Obr.8) a dolní (Obr.9) propusti se používají jako barevné filtry. Kombinací obou propustí lze sestavit filtr, který propouští pouze určené pásmo vlnových délek, tzv. pásmová propust' (Obr.11), resp. jejich průchodu zabraňuje – tzv. pásmová zádrž (Obr.10). Účelem těchto vrstev je dosáhnout vyčlenění úzké části spektra. Používají se třeba v barvodělicích soustavách (např.: u dataprojektorů) [1,5].



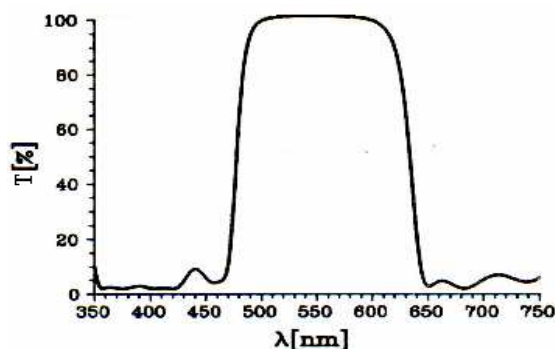
Obr.8: Transmise horní propust
(Převzato z [5])



Obr.9: Transmise dolní propust
(Převzato z [5])



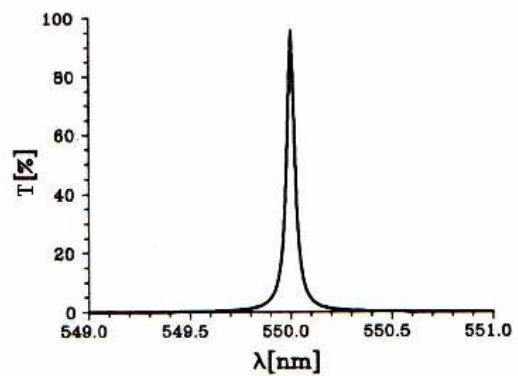
Obr.10: Transmise pásmové zadržky (prakticky by se dalo říct, že i zrcadlo pro oblast 550nm)
(Převzato z [5])



Obr.11: Transmise pásmové propusti
(Převzato z [5])

b) Úzkopásmové filtry

Úzkopásmové filtry (Obr.12) jsou takové filtry, které propouští pouze určitou část spektra. Šířku propouštěného spektra lze zvolit. Využívají se tam, kde není možné použít laser o jedné vlnové délce, ale kde potřebujeme úzkopásmový zdroj [1,5].

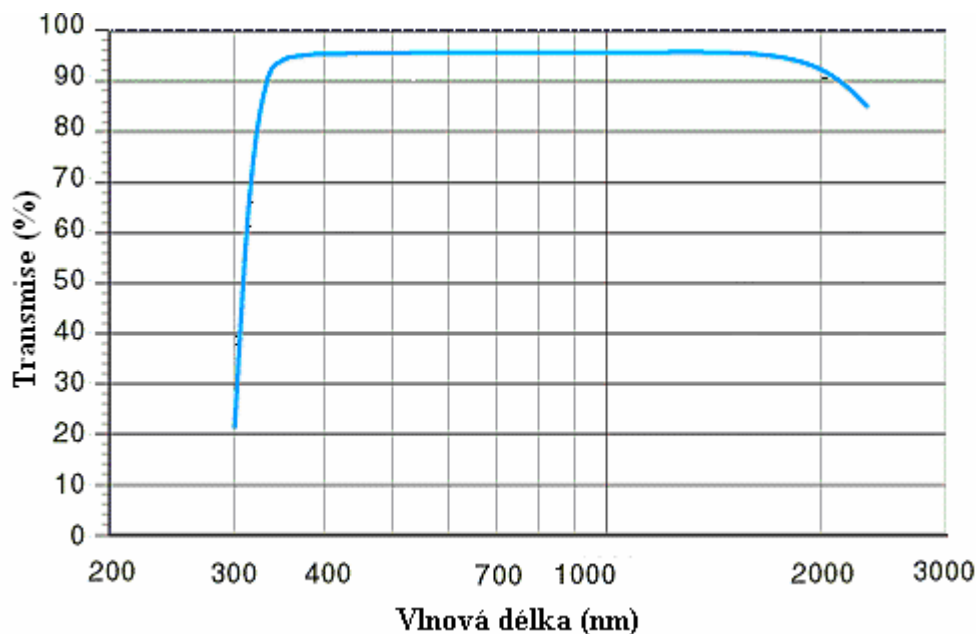


Obr.12: Transmise úzkopásmového filtru (Převzato z [5])

4. Spektrální charakteristiky skel

Existuje velká řada druhů skel pro optickou výrobu. Pro výrobu optických součástí, které jsou využívány v ultrafialové oblasti, jsou nejvhodnější různé typy taveného křemene (Fused silica) nebo také Fluorid vápenatý (Kalcium fluorid - CaF_2).

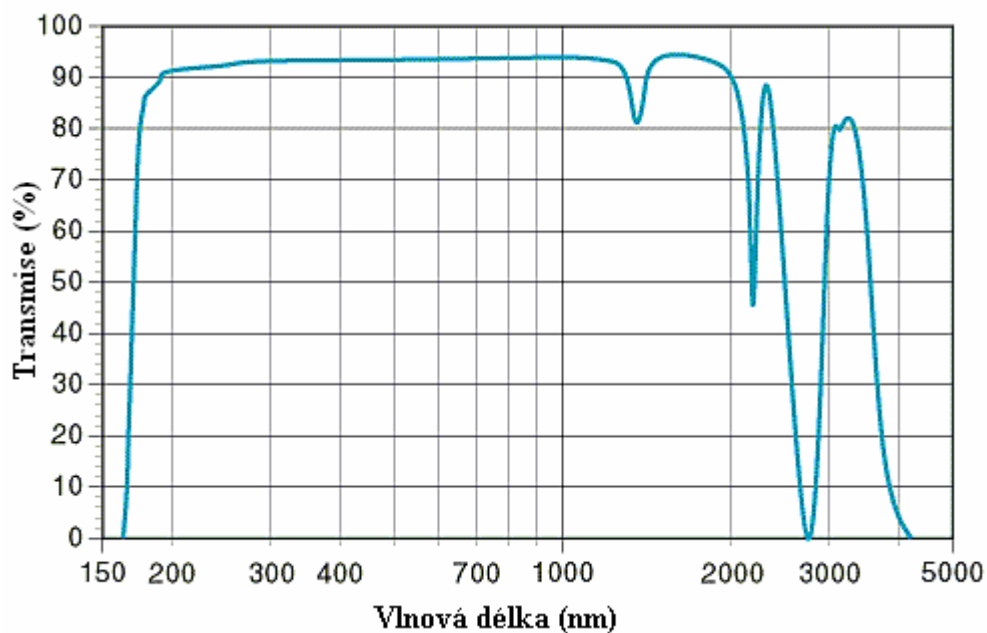
Například sklo BK7 (Obr.13) není vhodné pro ultrafialovou oblast, protože velmi silně v této oblasti absorbuje (slabě propouští ultrafialové záření). BK7 poskytuje dobrou propustnost ve viditelné oblasti spektra a v blízké infračervené oblasti spektra. Pro ultrafialovou oblast jde sklo BK7 použít pouze tam, kde záření sklem neprochází, jako je tomu např. u zrcadel [11].



Obr.13: BK7 (Převzato z [11])

4.1. Tavený křemen (Fused silica)

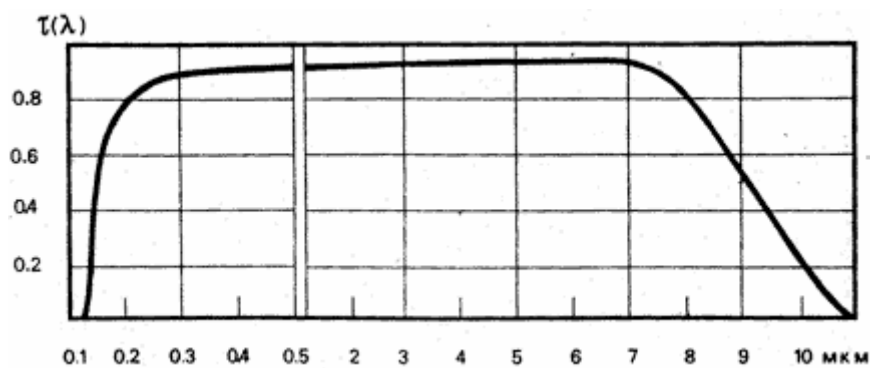
Jedná se o vysoce kvalitní syntetický amorfní Oxid křemičitý (SiO_2) s výjimečně dobrou propustností T v celé oblasti spektrální vlnové délky, obzvláště v ultrafialové oblasti. Příkladem je Lithosil (od německé firmy SCHOTT), který je k dostání ve čtyřech rozdílných vnitřních stupních kvality: Lithosil Q0, Lithosil Q1, Lithosil Q2, Lithosil QT. Pro ultrafialovou oblast jsou nejvhodnější Lithosil Q1, Lithosil Q2. Dalšími typy taveného křemene jsou pak Homosil, Suprasil, S1 – UVA,B (Obr.14) [12,13,14,15].



Obr.14.: S1-UVA,B (Převzato z [12])

4.2. Kalcium fluorid (CaF_2)

Kalcium fluorid (Obr.15) je krystalický materiál s propustností, který může mít rozsah od 130nm do $10\mu\text{m}$. Nicméně aktuální hloubka propustnosti v UV oblasti je velmi závislá na čistotě materiálu [16].



Obr.15: Kalcium fluorid (CaF_2) (Převzato z [16])

5. Materiály používané ke zhotovení tenkých vrstev

Rozhodujícím parametrem pro materiály používané na tenké vrstvy v ultrafialové oblasti je nízká absorpce. Materiály na tenké vrstvy musí mít velmi nízké přechody stupňů znečištění, a také uvnitř napařovací komory musí být dodržována maximální čistota.

O výběru materiálu pro výrobu dané tenké vrstvy rozhodují nejčastěji požadavky zákazníka. Nejsou-li požadavky zákazníka přímo dány, volíme materiály pro tenkou vrstvu s co nejrozdílnějším indexem lomu pro danou vlnovou délku [17].

Tab.2: Běžně používané materiály – pro ultrafialovou oblast (Převzato z [17]):

Materiál	Index lomu	Nejkratší používaná vlnová délka [nm] (rozsah vlnových délek pro jeden materiál)
MgF_2 - Fluorid hořečnatý	1,40 - 1,45	<200
AlF_3 - Fluorid hlinitý	1,40 - 1,45	≈ 200
CaF_2 - Fluorid vápenatý	1,45 - 1,50	<200
SiO_2 - Oxid křemičitý	1,45 - 1,55	200
LaF_3 - Fluorid lanthanitý	1,60 - 1,65	250
CeF_3 - Fluorid ceritý	1,65 - 1,75	≈ 250
Al_2O_3 - Oxid hlinitý	1,70 - 1,80	200
Sc_2O_3 - Oxid scanditý	1,90 - 2,05	≈ 300
Y_2O_3 - Oxid yttritý	2,00 - 2,10	≈ 250
HfO_2 - Oxid hafničitý	2,30 - 2,40	≈ 250
ZrO_2 - Oxid zirkoničitý	2,30 - 2,40	≈ 300

Tab.3: Příklady kombinace materiálů (Převzato z [17]):

Kombinace materiálů	Nejkratší používaná vlnová délka [nm] (vlnová délka pro kombinaci materiálů)
Sc_2O_3/SiO_2 - Oxid scanditý / Oxid křemičitý	355
Al_2O_3/SiO_2 - Oxid hlinitý / Oxid křemičitý	248
Sc_2O_3/SiO_2 - Oxid scanditý / Oxid křemičitý	248
ZrO_2/Y_2O_3 - Oxid zirkoničitý / Oxid yttritý	308

6. Napařování

Napařování je nejrozšířenější způsob nanášení tenkých vrstev, které probíhá ve vakuu. Substráty, na kterých chceme vytvořit tenkou vrstvu, umísťujeme do komory vakuové napařovačky.

6.1. Možnosti uložení substrátu uvnitř komory

Volíme mezi dvěma systémy uložení

a) Na segmentový kolotoč:

Segmentový kolotoč má jednu osu rotace. Výhodou segmentového uložení je možnost napaření většího množství kusů a tak snížení výrobních nákladů. Na segmentovém kolotoči mohou být dva druhy optického monitoringu - přímý a nepřímý.

- **Nepřímý (Reflexní měření):** Je umístěn v ose rotace kolotoče a měří reflexi na testovacím skle (viz. kap. 6.2.2.1.).
- **Přímý (Transmisní měření):** Má lampu umístěnou uvnitř stroje a měří testovací sklo umístěné mezi kusy (viz. kap.6.2.2.2.).

b) Na planetární otáčení:

Planetární otáčení má dvě rotační osy. Využívá se monitoringu pro viditelnou oblast i ultrafialovou oblast. Nevýhodou je umístění méně kusů, ale distribuce vrstvy na kusu je z hlediska jednoho kusu kvalitnější. Není zde možné použití transmisního měření optickým monitoringem (není možné umístit monitorovací sklo mezi napařované kusy). Komora je vytápěna infra topením (viz.6.3.b).

6.2. Monitorování procesu napařování

Proces napařování monitorujeme a to kvůli přesností výroby tenkých vrstev. Monitorujeme např.: index lomu uvnitř komory, napařovací rychlost atd.. Napařování můžeme monitorovat dvěma způsoby: pouze krystalem nebo krystalem a zároveň optickým monitoringem. Využijeme-li optického monitoringu s krystalem a máme napařované kusy uloženy ve vakuové aparatuře pomocí segmentového kolotoče můžeme volit mezi přímým (transmisním) měřením nebo nepřímým (reflexním). Jsou-li napařované kusy uloženy na planetárním otáčení lze zvolit pouze nepřímé měření.

6.2.1. Pouze krystalem

Krystal je zlatý vybrus, kmitající na 6MHz pro monitorování procesu napařování, umístěný v komoře na konstantním místě. Krystalem měříme napařovací rychlost a fyzickou tloušťku.

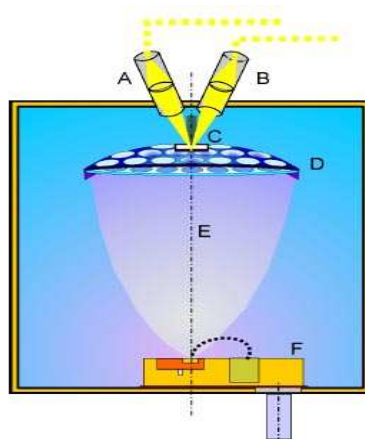
6.2.2. Optickým monitoringem s krystalem

Monitorovací sklo je buď na stálém místě, nebo na periodicky se pohybujícím místě a krystal na místě konstantním. Krystal měří napařovací rychlost a monitoring optickou tloušťku, změny indexu lomu uvnitř komory. Tyto změny dokáže korigovat, a proto je optický monitoring přesnější než monitorování pouze krystalem. Monitoruje napařovanou vrstvu na určité vlnové délce. Optický monitoring provádíme pomocí monitorovacích skel a to dvěma způsoby:

6.2.2.1. Reflexní měření (Nepřímé):

Poloha monitorovacího skla je uprostřed osy rotace segmentového kotouče. Jde o dvanáct monitorovacích skel umístěných na prstenci a kvůli většímu počtu monitorovacích skel se chyba vzniklá na začátku napařování nenavýšuje u všech vrstev, ale pouze u těch vrstev, které jsou napařovány na jedno monitorovací sklíčko.

Například, jestliže chceme napařovat 40 vrstev na optickou součást, tak můžeme vrstvy rozpočítat třeba po čtyřech na jedno monitorovací sklíčko a tím zamezit, aby se nám případná vzniklá chyba nenavýšovala na všech 40 vrstvách. Kdyby chyba vznikla na první vrstvě, tak by se navyšovala pouze na jednom monitorovacím sklíčku, to znamená jen na čtyřech vrstvách, pak by došlo ke změně monitorovacího sklíčka za druhé a chyba by se dále nenavýšovala.

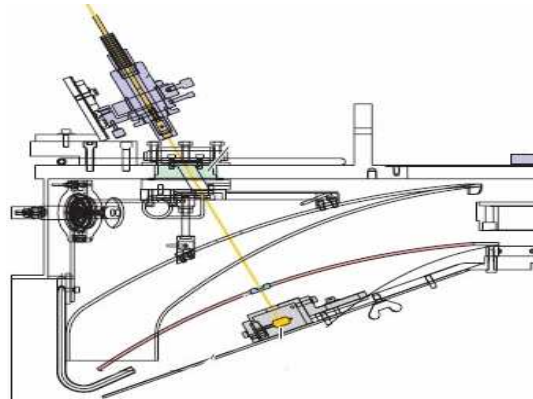


Obr.16: Reflexní měření (Převzato z [6])

Jelikož monitorovací sklíčko není umístěno ve stejné rovině jako napařované kusy musíme zavést TOOLING FACTOR, který určuje poměr napařované vrstvy mezi pozicí napařovaných kusů a monitorovacím sklem. Monitorovací paprsek se odráží od monitorovacího skla (Obr.16).

6.2.2.2. Transmisní měření (Přímé):

Jde pouze o jedno monitorovací sklo, což není výhodou, protože vzniklá chyba v začátku napařování se navyšuje po celou dobu procesu. Poloha monitorovacího skla je mezi napařovanými kusy a to je důvod, že nemusíme zavádět tooling factor. Monitorovací paprsek prochází přímo (Obr.17).



Obr.17: Transmisní měření (Převzato z [6])

6.3. Proces napařování

a) Vytvoření vakua

Vakuem v komoře vytváříme nejprve HRUBÉ, a až po vytvoření hrubého vakua vytváříme vakuum VYSOKÉ.

- **Hrubé vakuum** $\approx 1 - 10^{-3} \text{ mbar}$. Hrubé vakuum v komoře vytváří rotační vývěva.
- **Vysoké vakuum** od 10^{-4} mbar a níže. Vysoké vakuum vytváří v komoře pro viditelné světlo difuzní vývěva a pro UV oblast cryo vývěva. Difuzní vývěva je pro UV oblast nepoužitelná z toho důvodu, že může do komory vakuové napařovačky propouštět olejové výpary. V UV spektru by pak byla vysoká absorpce.

b) Případné tepelné vytopení komory

Komoru před samotným napařováním můžeme nebo nemusíme tepelně vytápět. V ultrafialové oblasti topíme infra zářiči.

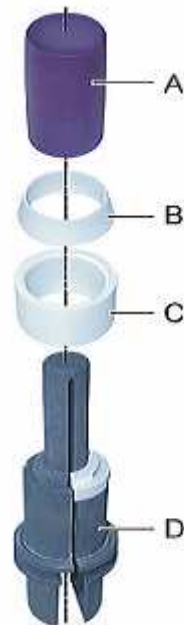
- **Procesy za studena** jsou rychlejší z toho důvodu, že komoru nevytápíme, ale jsou nestabilní z hlediska různých vrstev. Na začátku procesu napařování máme podstatně nižší teplotu v komoře než na jeho konci. Proto je každá vrstva napařována za jiné teploty a tím vznikají drobné změny indexu lomu.
- **Vytápění:** Jde o stabilnější proces. Teplota je po celou dobu napařování přibližně stejná a každá vrstva je napařována za stejných podmínek.

c) Možné zavedení APS zdroje

Tak jak můžeme nebo nemusíme komoru vytápět, tak volíme i zavádění APS zdroje. APS (Advanced Plasma Source) je iontový zdroj dopovaný argonem, který pomáhá usměrňovat v dalších krocích procesu odpařené částice na substrát.

Součástí plazmového zdroje je LaB_6 (LanthanBoridová) katoda nasunutá na grafitový heater (topič) (obr.18), kterým prochází proud v řádech stovek ampér. Při napařování dochází k opotřebení katody, proto je nutné ji zhruba po 100 aktivních hodinách

vyměnit – pokud rozžhavená katoda přijde do kontaktu s kyslíkem (O_2), nastane její kontaminace a je nezbytné ji vyměnit pro další napařování.



Obr. 18: (Převzato z [6])

- A - LaB_6 katoda
- B - Horní bornitridov prstenec
- C - Dolní bornitridov prstenec
- D - Grafitový heater

d) Třiminutové ozáření plazmou

Jestliže jsme zavedli APS zdroj, je dobré, aby před samotným napařováním proběhlo třiminutové ozáření substrátu plazmou. To umožní připravit vrstvenou podložku pro lepší adhezi vrstev.

e) Samotné napařování

Vrstva na substrátu je složena z několika vrstev. Proces napařování probíhá střídavým nanášením materiálů o různých indexech lomu na substrát. Antireflexní vrstvy mají většinou menší počet vrstev než děliče nebo zrcadla.

f) **Konec procesu**

Jestliže jsme použili vytápění, je třeba, aby teplota v komoře klesla, než se otevře. Kdyby nedošlo ke snížení teploty v komoře před jejím otevřením, tak by hrozilo popraskání substrátu z důvodu prudké změny teploty.

6.4. **Napařovací rychlost**

U každého procesu se monitoruje napařovací rychlost, protože pokud bychom napařovali konstantním výkonem, vrstvy budou různorodé. S úbytkem napařovacího materiálu by se měnila napařovací rychlost. Proto napařovací výkon je veličinou proměnnou a tudíž je řízen napařovací rychlostí. Napařovací rychlost je v jednotkách, někdy i v desetinách nm/s . Například MgF_2 (Fluorid hořečnatý) se napařuje rychlostí cca $1nm/s$ a opačným příkladem je $NiCr$ (Nikl chrom), kdy napařovací rychlost je $0,05$ až $0,1 nm/s$. Krystal, který monitoruje tyto veličiny, je zlatý krystal 6MHz.

6.5. **Možnosti napařování**

V ultrafialové oblasti používáme dvě možnosti napařování:

a) **Z elektronového děla – EBG (Electron Beam Gun)**

Katodový blok emituje elektrony ze žhavého wolframového vlákna, které jsou pomocí elektromagnetů usměřňovány na daný kelímek s materiálem k napaření. Vlivem prudkého zahřívání materiálu dochází k sublimaci, při níž se uvolňují částice materiálu, které následně dopadají na substrát. Díky elektromagnetům je možné mít různé druhy elektronových paprsků, které na časové ose tvoří periodický obrazec.

b) **Z lodičky – THE (THERmal Evaporator)**

Lodička je méně variabilní. Celé využití probíhá na průchodu silného proudu jdoucího skrz lodičku, vyrobenou většinou z molybdenu. Průchodem proudu se lodička silně zahřívá, a tím se zahřívá i materiál, který se následně odpařuje.

Problémem lodičky je její malá životnost v řádech několika vrstev a také její setrvačnost.

7. Spektrální měření

Jedná se o měření používané ke kontrole spektrálních vlastností optických součástí, v našem případě ke kontrole odrazivosti a propustnosti tenkých vrstev napařených na optickou součást, pomocí vědeckého přístroje spektrometr. Ten udává závislost spektrálních parametrů na vlnové délce světla prošlého nebo odraženého na měřeném kusu.

7.1. Druhy spekter:

Existuje více typů spekter. Můžeme je dělit podle světelného zdroje, vzhledu spektra nebo podle vlnových délek.

a) Podle světelného zdroje:

Mnoho látek se při zahřátí mění nejprve v páry, které pak vydávají světlo.

- **Spektra plamenová:** spektra vzniklá rozžhavením látky v plameni (u lehkých kovů).
- **Spektra oblouková:** rozžhavení látky v elektrickém oblouku. Je mnohem svítivější.
- **Spektra jiskrová:** rozklad světla, který dává elektrická jiskra mezi elektrodami.

b) Podle vzhledu spektra:

Při interakci spektra s látkou může dojít k tomu, že budou pohlceny některé části elektromagnetického spektra, nebo některé látky mohou vyzařovat pouze některé části spektra.

- **Spojité spektrum:** souvislý pruh, v němž barvy přecházejí plynule jedna v druhou (Obr.19) [7].



Obr.19: Spojité spektrum (Převzato z [7])

- **Čárové (emisní) spektrum:** skládá se z jednotlivých jasných čar, zpravidla velmi ostrých, úzkých a oddělených od sebe tmavými mezerami. Jednotlivé čáry čárového spektra se nazývají spektrální čáry. Pokud záření vzniká v určité látce, mluví se o spektru emisním. Jde o sadu spektrálních čar na tmavém pozadí (Obr.20) [7].



Obr.20: Čárové spektrum (Převzato z [7])

- **Absorpční čárové spektrum:** vzniká po průchodu bílého světla určitou látkou. Jde o doplněk emisního spektra té samé látky. Tam, kde se u absorpčního spektra nachází tmavé pruhy, jsou u emisního spektra stejné látky spektrální čáry a naopak (Obr.21) [7].



Obr.21: Absorpční čárové spektrum (Převzato z [7])

- **Pásové spektrum:** obsahuje místo jasných ostrých čar širší pruhy, neostře ohraničené, někdy složené z velkého počtu jemných čar (Obr.22) [7].



Obr.22: Pásové spektrum (Převzato z [7])

c) **Podle vlnové délky** (viz. Kapitola 1.2.):

- **Viditelné světlo**
- **Neviditelné světlo:** Záření infračervené a ultrafialové.

V případě spektrometru se využívá spojité spektrum zdrojové lampy, které se následně rozkládá na spektrum několika barev (červenou, oranžovou, žlutou, zelenou, modrou a fialovou).

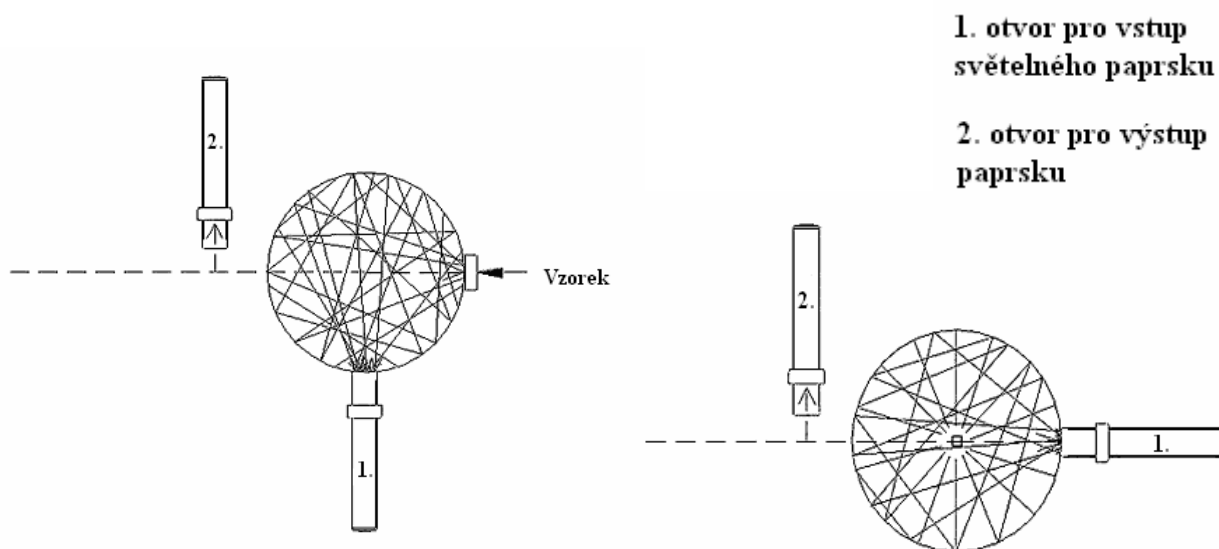
7.2. Sestava spektrometru

- **Zdroj světla** dávající spojité spektrum. Volíme zdroj světla zvlášť pro viditelnou a infračervenou oblast a zvlášť pro ultrafialovou.
- **Monochromátor** – výběr dané vlnové délky. K rozkladu světla se používají monochromátory hranolové nebo mřížkové (viz. Kapitola 7.3.).
- **Polarizátor** – je optická součástka k získání polarizovaného světla. Zdroj světla dává nepolarizované světlo, ale k měření je třeba světlo polarizované. Proto se do měřicí soustavy vkládá polarizátor.
- **Detektor** – zaznamenávání intenzity dopadajícího světla přímo na detektor nebo světlo vedeme do integrační koule s detektorem spojené.

- Výhody měření bez integrační koule: Detektory mají vyšší citlivost než integrační koule, protože v kouli se světlo rozptýlí a na detektor dopadá jen část světla, která do koule vstoupila \Rightarrow nižší šum.
- Nevýhody měření bez integrační koule: Při měření detektorem nedostáváme vždy stejnou hodnotu, protože na středu detektoru neměříme stejnou hodnotu jako na jeho krajích.

Při použití integrační koule používáme optickou lavici, na které lze zvolit měřicí metodu z většího výběru než v základní sestavě.

- **Optické součásti** jako jsou zrcadla, čočky atd.
- **Další součásti**, jako je například otočný stolek, který slouží ke správnému umístění kusu výškově, stranově a pod úhel, pod kterým světlo dopadá do optické součástky.
- **Integrační koule (Obr. 23 a 24)** - má otvor pro vstup světelného paprsku a otvor se vzorkem, na který světlo rozptýlené v kouli dopadá a měří se odražené světlo. V našem případě se na kouli vzorek nepřikládá, vstupuje totiž do ni již světlo, které vzorkem prošlo (nebo se od měřeného vzorku odrazilo).



Obr.23: Integrační koule (Převzato z [18])

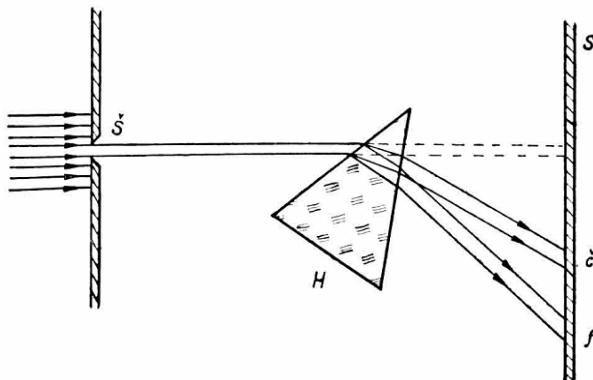
Obr.24: Integrační koule (Převzato z [18])

7.3. Typy spektrometru

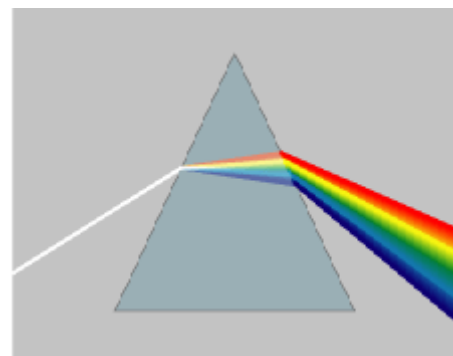
Podle možnosti typu monochromátoru.

a) Hranolový spektrometr

Hranolový spektrometr je přístroj, jehož hlavními částmi jsou vstupní štěrbinu, kolimátor, lámavý hranol a otáčivý dalekohled s úhlovou stupnicí. Činnost přístroje je založena na jevu zvaném optická disperze neboli rozkladu světla (závislost indexu lomu skla, z něhož je hranol vyroben, na vlnové délce), kdy se světlo různých vlnových délek při průchodu hranolem láme pod různými úhly (Obr.25 a 26) [2].



Obr.25: Rozklad světla hranolem
(Převzato z [2])

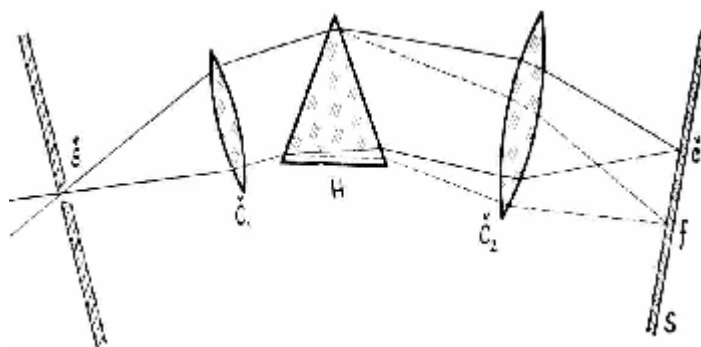


Obr.26: Rozklad světla hranolem
(Převzato z [10])

Budeme-li rozkládat světlo pomocí lomu na hranolu, a to tak, že svazek bílého světla vymežeme štěrbinou a necháme dopadnout na hranol, pak se nám na stínítku postaveném za hranolem objeví spektrum několika barev a to červené, oranžové, žluté, zelené, modré a fialové. Přitom červená barva se bude od původního směru odchylovat nejméně a fialová nejvíce.

Po průchodu hranolem se spektrální barvy získané z různých míst hranolu budou skládat (viz kap. 1.2.b). Abychom ve spektru dosáhli oddělení barev, museli bychom docílit kolimace paprsku tak, že bychom před nebo za hranol umístili spojnou čočku, tak aby zdroj světla byl v ohnisku této čočky.

Je taky možné spojnou čočku umístit na obě strany hranolu, aby na hranol dopadaly rovnoběžné svazky paprsků (Obr. 27) [2].



Obr.27: Uspořádání pokusu pro získání čistého spektra se dvěma spojnými čočkami (Převzato z [2])

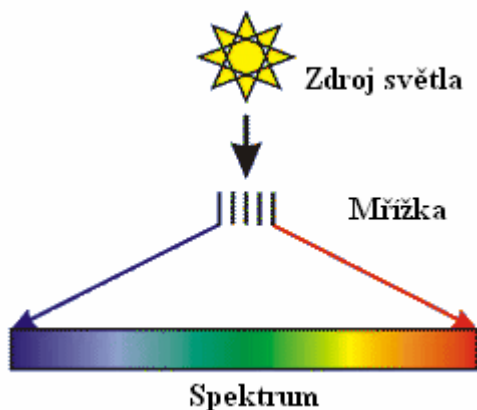
b) Mřížkový spektrometr

Mřížkový spektrometr je v zásadě podobný hranolovému spektrometru, jen je tvořen optickou mřížkou místo optického hranolu. Skládá se ze vstupní štěrbinu, kolimátoru, optické mřížky a otočného dalekohledu s úhlovou stupnicí.

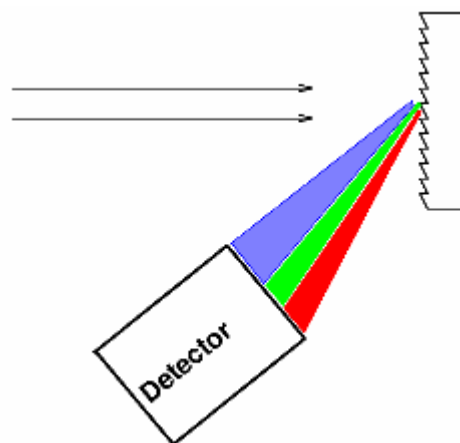
Za optickou mřížku považujeme malou skleněnou nebo plastovou destičku na níž je pravidelně a hustě vyrobeno velké množství tenkých štěrbin (100 až 1000 štěrbin na 1mm). Pokud na optickou mřížku dopadne rovnoběžný světelný svazek můžeme každou štěrbinu optické mřížky považovat za zdroj elementárního vlnění.

Činnost mřížkového spektrometru je stejně jako činnost hranolového spektrometru založena na jevu zvaném optická disperze neboli rozkladu světla, ale v tomto případě se světlo rozkládá pomocí difrakce (ohybu) na optické mřížce (Obr.28 a 29). Necháme-li svazek bílého světla dopadnout na optickou mřížku, pak se nám na stínítku postaveném za mřížkou objeví stejně jako v případě hranolu spektrum barev. Po průchodu světla optickou mřížkou se od původního směru odchyluje nejméně barva fialová zatímco barva červené nejvíce. To znamená, že je tomu právě naopak jako u rozkladu světla pomocí lámavého hranolu což můžeme vidět na obrázcích 26 a 29.

V Meoptě nalezneme spektrometry od firmy PerkinElmer 950 λ , 900 λ s dvojnásobnými mřížkovými monochromátory pracujícími v ultrafialové, viditelné a infračervené oblasti. Každý z monochromátorů je tvořen dvěma mřížkami – UV/VIS a IR.



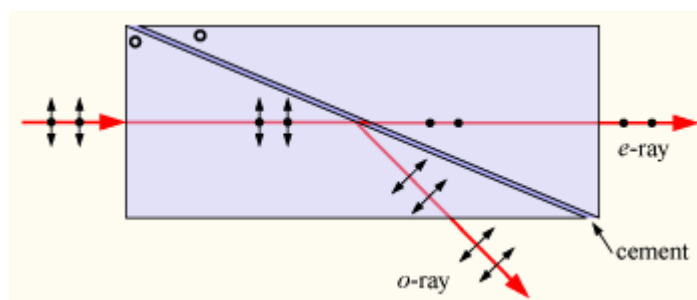
Obr.28: Rozklad světla na mřížce propustností (Převzato z [20])



Obr.29: Rozklad světla optickou mřížkou odrazem (Převzato z [19])

7.4. Princip měření spektrometrem

- a) Sestavení sestavy pro měření daného kusu
- b) Nastavení parametrů:
 - Vlnové délky – v programu
 - Polarizace – v programu: Zdroj světla dává světlo nepolarizované, ale pro měření potřebujeme světlo lineárně polarizované, proto do sestavy vkládáme Glanův-Thompsonův polarizační hranol (Obr.30), který se používá v Meoptě. Jinak existuje velká řada polarizačních hranolů.



Obr.30: Glanův-Thompsonův polarizační hranol (Převzato z [28])

- c) Kalibrace – při kalibraci není v měřicím prostoru kus, a jde při ní o nastavení intenzity detekovaného světla na úroveň 100%.

d) Měření:

Mechanické výškové a stranové nastavení (aby svazek procházel středem kusu) a nastavení úhlu dopadu světla. Integrační kouli nastavíme tak, aby do ní vstupoval paprsek procházející optickou součástí.

e) Spuštění programu

f) Vyhodnocení – vytvoření protokolu, zjištění, zda kus odpovídá požadavkům daných zákazníkem.

7.5. Rozdíl mezi měřením v UV a VIS oblasti:

- Pro ultrafialovou oblast musíme zvolit lampu z deuteria zářící UV oblasti.
- Ne všechny optické prvky použité v dané měřicí sestavě propouštějí světlo v UV oblasti. Musíme tedy volit optické prvky (čočky jako kolimátory, optická vlákna atd.) z materiálu vhodného pro UV oblast (např.: Lithosil, Suprasil, Homosil, atd.).
- DUV - hluboká ultrafialová oblast (z anglického jazyka deep, proto zkratka DUV) – pod 190nm: nedetekuje integrační koule, polarizátor nepropouští, je proto nutné speciální příslušenství. DUV záření je navíc pohlcováno kyslíkem v atmosféře, což vede k prudkému nárůstu šumu, a proto do spektrometru vpouštíme dusík a měříme v dusíkové atmosféře.

8. Měření pomocí laseru

8.1. Sestava pro měření laserem

- **Laser pro ultrafialovou oblast (266nm).**
- **Půlvlnová fázová destička** – jde o planparalelní destičku vyrobenou s jednoosého krystalu, která slouží k natáčení roviny polarizace procházející vlny.
- **Objektiv jako kolimátor** - spojná soustava vytvářející rovnoběžné světelné svazky.
- **Irisová clona** – pomocí clony určujeme průměr světelného svazku.
- **Polarizátor** – slouží k získání polarizovaného světla.
- **Otočný stoleček** – slouží ke správnému umístění kusu výškově, stranově a pod úhlem, pod kterým světlo dopadá do optické součástky.
- **Integrační koule** – má otvor, do něhož vstupuje světelný paprsek, a další otvor se vzorkem, na který dopadá paprsek a měří se odražené světlo. V případě uvedeného laserového měření je v jednom z otvorů umístěn detektor, do druhého vstupuje laserový svazek.
- **Powermetr** - napojený na detektor, udává nám naměřené hodnoty.

8.2. Princip měření laserem

- a) **Sestavení sestavy pro měření laserem**
- b) **Nastavení parametrů polarizace**
- c) **Kalibrace** - měření intenzity světla bez kusu pro zjištění 100% světla.
- d) **Měření** - Mechanické výškové, stranové nastavení (aby svazek procházel středem kusu) a nastavení úhlu dopadu světla. Integrační kouli nastavíme tak, aby do ni vstupoval paprsek procházející optickou součástí.
- e) **Zapsání výsledných hodnot**
- f) **Vyhodnocení** - vytvoření protokolu, zjištění, zda kus odpovídá požadavkům daných zákazníkem.

Přílohy

A. Fotografie vakuových napařovaček



Obr.31: Komora vakuové napařovačky s uložením na segmentový kolotoč (Převzato z [21])

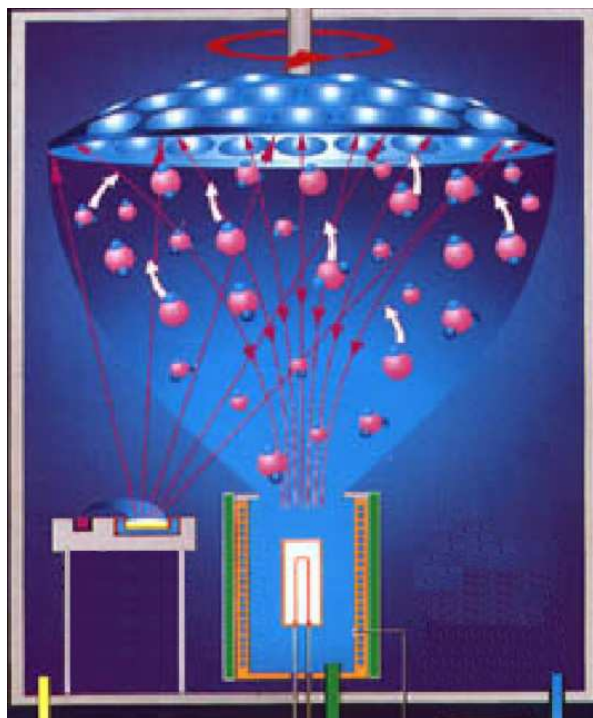


Obr.32: Vakuové napařovačky s uložením na segmentový kolotoč (Převzato z [21])



Obr.33: Vakuová napařovačka s planetárním uložením (Převzato z [21])

B. Fotografie součástek používaných k napařování tenkých vrstev



Obr.34: Princip použití APS (Advanced Plasma Source) zdroje. Plazmový zdroj je iontový zdroj dopovaný argonem, který pomáhá usměrňovat v dalších krocích procesu odpařené částice na substrát (Převzato z [22]).



Obr.35: LaB_6 (LanthanBoridová) katoda, která je součástí plazmového zdroje nasunutá na grafitový heater (topič) (viz. kap. 6.3. obr.18). Na obrázku je vidět postupné opotřebení katody (Převzato z [6]).

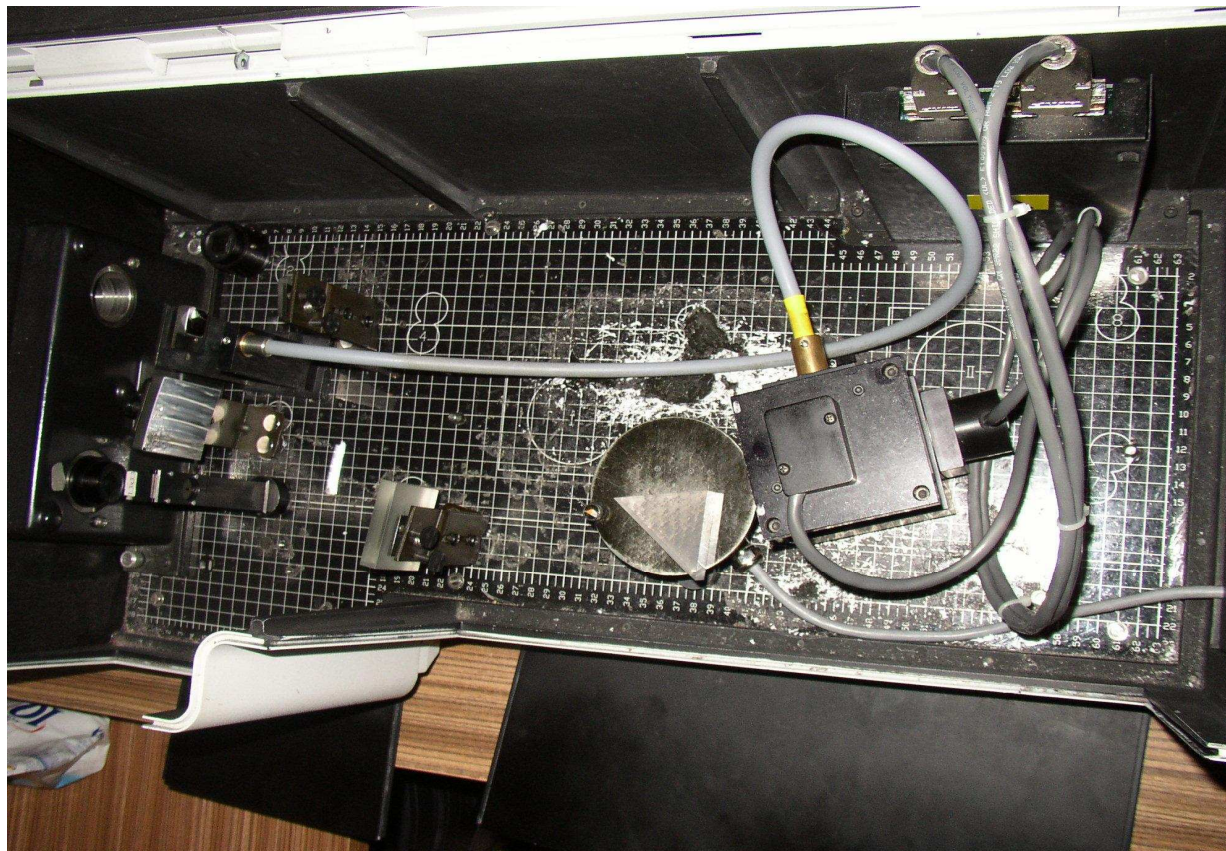


Obr.36: Fotografie plazmového zdroje
(Převzato z [23])

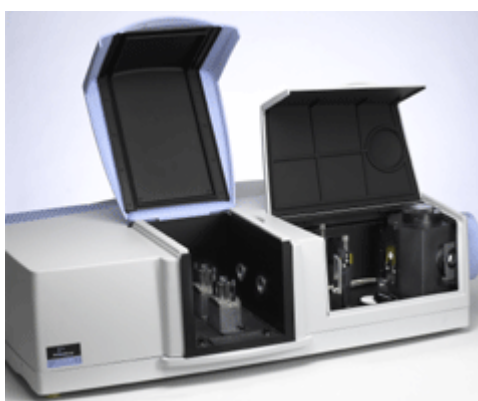


Obr. 37: Monitorovací sklo
pro reflexní měření
(Převzato z [6])

C. Fotografie spektrometru



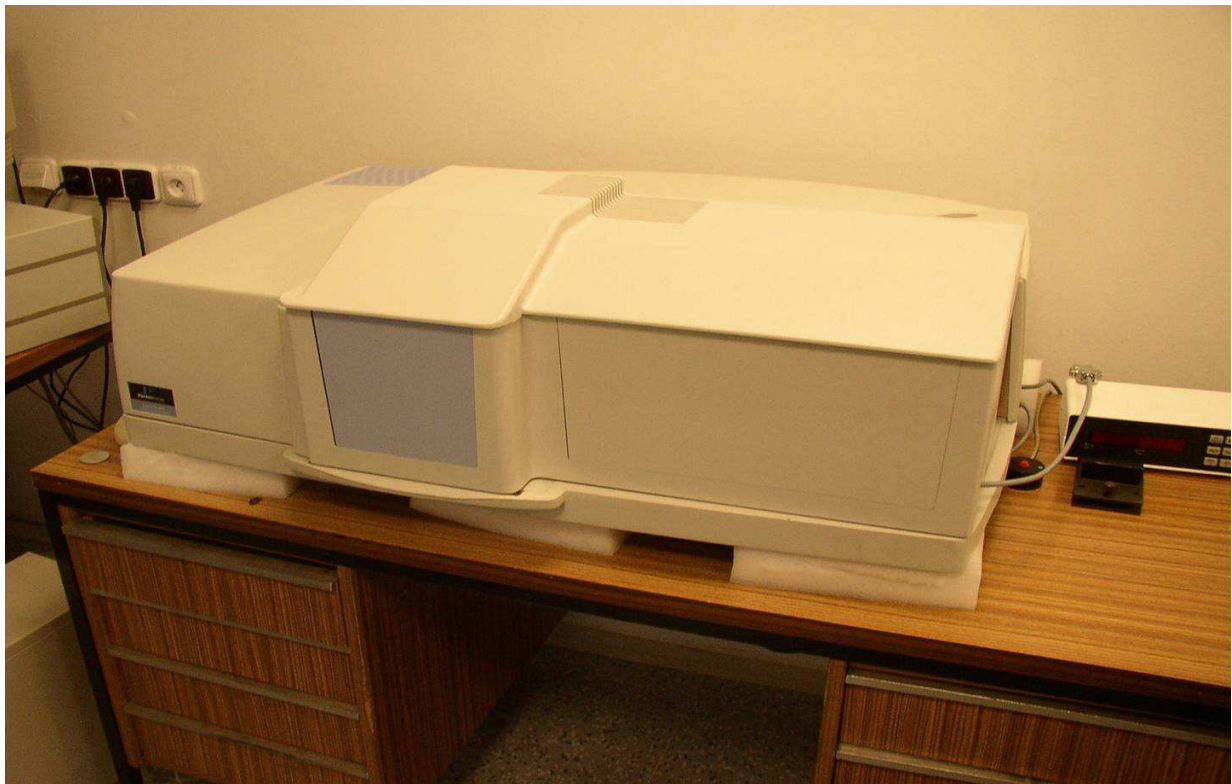
Obr.38: Optická lavice uvnitř spektrometru



Obr.39: Spektrometr 950λ po otevření (Převzato z [24])

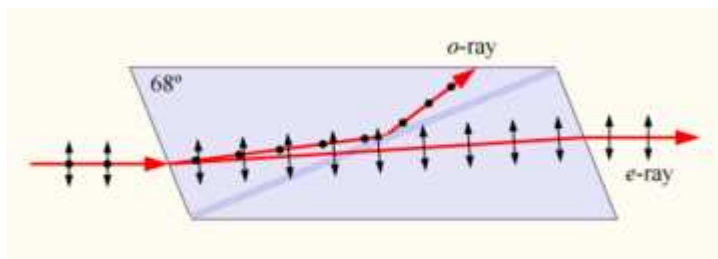


Obr.40: Spektrometr 950 λ (Převzato z [25])

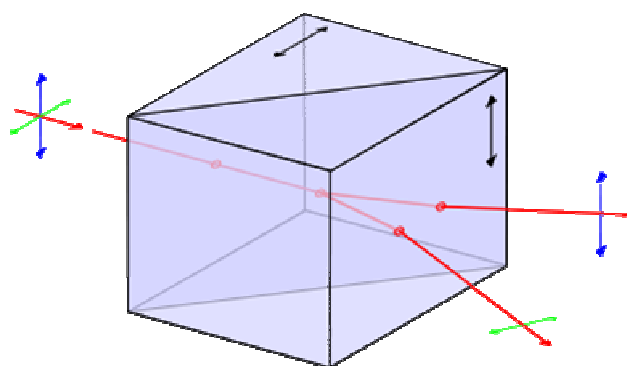


Obr:41: Spektrometr 950 λ používaný v Meoptě-optika, s.r.o.

D. Některé další typy polarizačních hranolů



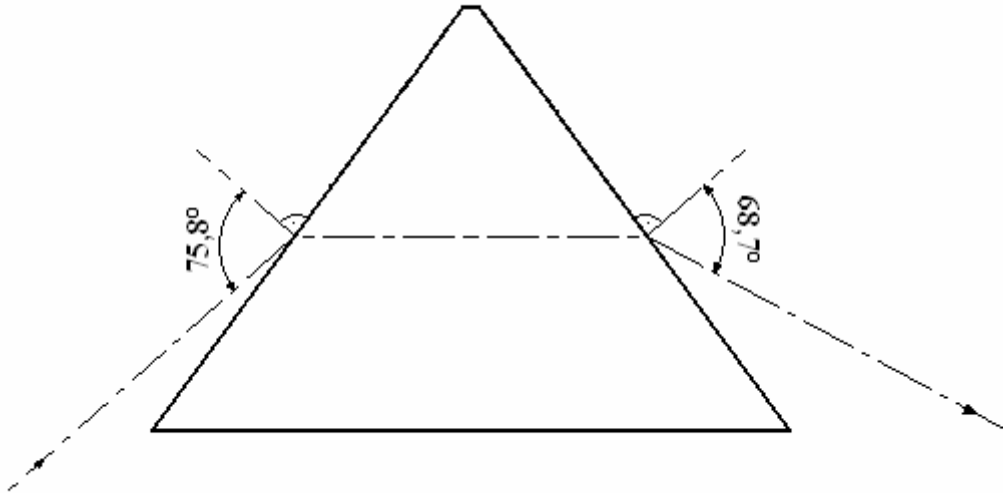
Obr:42: Polarizační Nikolův hranol (Převzato z [29])



Obr:43: Polarizační Wolastonův hranol (Převzato z [30])

E. Měření spektrometrem

Měřila jsme obrazivost a propustnost hranolu se dvěma rovinnými stěnami nejdříve na spektrometru a později i laserem.



Obr.44: Měřený hranol

- **Princip měření spektrometrem:** Jde o šest velmi podobných měření.
 - i. Měření odrazivosti na vstupní straně hranolu pro složku polarizace s .
 - ii. Měření odrazivosti na výstupní straně hranolu pro složku polarizace s .
 - iii. Měření odrazivosti na vstupní straně hranolu pro složku polarizace p .
 - iv. Měření odrazivosti na výstupní straně hranolu pro složku polarizace p .
 - v. Měření propustnosti pro složku polarizace p .
 - vi. Měření propustnosti pro složku polarizace s .

- **Postup měření:** Měření jsem provedla postupně od prvního měření k šestému:
 1. Sestavila jsme sestavu pomocí součástek vhodných pro UV oblast: Nejprve pro měření odrazivosti (měření i),ii),iii) a iv)) a později pro měření propustnosti (v) a vi)).
 2. V programu jsem nastavila vlnovou délku ultrafialové oblasti ($\lambda = 280 - 250nm$) pro všechna měření stejnou, polarizační úhel jsem nastavila pro měření i), ii) a vi) 90° a pro další tři měření 0° .
 3. Protože jsem měřila v UV oblasti, musela jsme zapnout lampu pro UV oblast.
 4. Spustila jsem kalibraci – měření bez kusu pro zjištění 100% světla.
 5. Po ukončení kalibrace jsem přepnula vlnovou délku na bílé světlo, abych mohla umístit měřený kus.

6. Kus jsem umístila výškově a stranově na otočný stolek, tak aby dopadající svazek světla procházel středem přední strany kusu, zjistila jsme zda dopadající a odražený paprsek má stejnou dráhu, pak jsem mohla nastavit úhel mezi dopadajícím a odraženým paprskem, který byl při měření (i) a iii)) vstupní strany hranolu $75,8^\circ$, výstupní strany $68,7^\circ$. Při měření propustnosti jsem nastavovala úhel mezi dopadajícím a odraženým paprskem $284,2^\circ$ (doplněk k úhlu $75,8^\circ$).
7. Integrační kouli jsem nastavila tak, aby do ní vstupoval paprsek procházející (resp. odrážející se) hranolem.
8. Spustila jsem program a naměřené hodnoty uložila.
9. Výsledky měření jsem vyhodnotila a vytvořila protokoly.

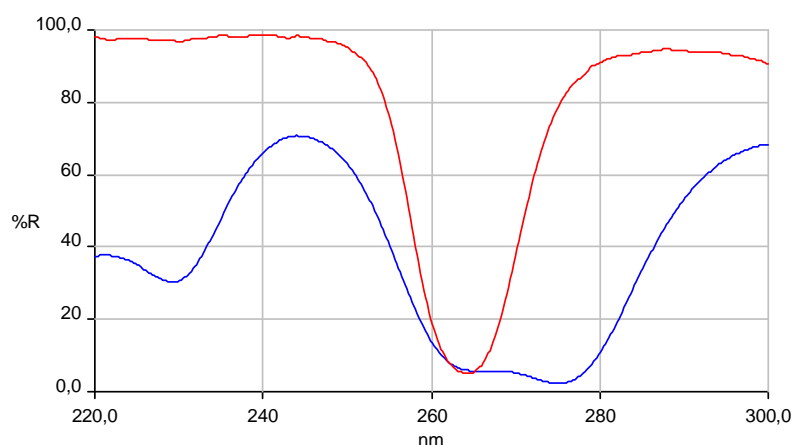
○ **Výsledky měření na spektrometru**

a) Měření odrazivosti na vstupní straně hranolu s antireflexní vrstvou:

**MĚŘENÍ ODRAZIVOSTI NA VSTUPNÍ STRANĚ HRANOLU S ANTIREFLEXNÍ
VRSTVOU**

Typ měření:	Měření odrazivosti hranolu v UV oblasti
Měřicí zařízení:	PerkinElmer Lambda 950 B
Měřený parametr:	Antireflexní vrstva
Vlnová délka:	220-300 nm
Úhel dopadu:	$75,8^\circ$
Datum měření:	26. 2. 2009
Naměřila:	Monika Nováková

Výsledky měření:



Obr.45: Graf odrazivosti na vstupní straně hranolu

Tab. 4: Výsledky naměřené při měření odrazivosti na vstupní straně hranolu

Vlnová délka (λ)	Odrazivost pro složku polarizace p (R_p)	Vlnová délka (λ)	Odrazivost pro složku polarizace s (R_s)	Odrazivost (R)
220	37,46	220	98,34	67,90
221	37,72	221	97,59	67,66
222	37,61	222	97,03	67,32
223	37,13	223	97,81	67,47
224	36,30	224	97,62	66,96
225	35,19	225	97,67	66,43
226	33,62	226	97,50	65,56
227	32,12	227	97,26	64,69
228	30,95	228	97,38	64,17
229	30,31	229	97,37	63,84
230	30,55	230	96,75	63,65
231	32,05	231	97,11	64,58
232	34,84	232	97,84	66,34
233	38,67	233	97,73	68,20
234	43,12	234	98,13	70,62
235	47,82	235	98,48	73,15
236	52,59	236	98,32	75,46
237	56,93	237	98,11	77,52
238	60,45	238	98,29	79,37
239	63,62	239	98,61	81,12
240	66,16	240	98,78	82,47
241	68,07	241	98,53	83,30
242	69,53	242	98,30	83,91
243	70,47	243	97,69	84,08
244	70,80	244	98,52	84,66
245	70,59	245	98,11	84,35
246	69,97	246	97,72	83,84
247	68,99	247	97,49	83,24
248	67,54	248	96,60	82,07
249	65,47	249	96,47	80,97

250	62,96	250	95,21	79,09
251	59,82	251	93,49	76,66
252	55,91	252	91,67	73,79
253	51,45	253	88,53	69,99
254	46,29	254	83,47	64,88
255	40,58	255	76,23	58,41
256	34,71	256	66,57	50,64
257	28,80	257	54,55	41,68
258	23,13	258	41,34	32,23
259	18,07	259	29,07	23,57
260	13,82	260	19,15	16,49
261	10,53	261	12,35	11,44
262	8,15	262	8,10	8,12
263	6,68	263	5,88	6,28
264	5,92	264	5,01	5,47
265	5,69	265	5,37	5,53
266	5,70	266	7,30	6,50
267	5,80	267	11,61	8,70
268	5,78	268	18,30	12,04
269	5,62	269	27,43	16,52
270	5,23	270	37,73	21,48
271	4,64	271	48,10	26,37
272	3,88	272	58,02	30,95
273	3,13	273	66,43	34,78
274	2,50	274	73,45	37,98
275	2,22	275	78,64	40,43
276	2,43	276	82,75	42,59
277	3,32	277	85,58	44,45
278	4,96	278	87,14	46,05
279	7,44	279	89,95	48,69
280	10,68	280	90,82	50,75
281	14,51	281	92,12	53,31
282	19,01	282	92,77	55,89
283	23,75	283	92,93	58,34
284	28,82	284	93,33	61,07
285	33,68	285	93,83	63,75
286	38,13	286	94,06	66,10
287	42,57	287	94,43	68,50
288	46,47	288	94,86	70,66
289	49,94	289	94,23	72,09
290	53,19	290	94,31	73,75
291	56,05	291	93,95	75,00
292	58,50	292	93,96	76,23
293	60,68	293	94,10	77,39
294	62,65	294	94,04	78,35
295	64,19	295	93,36	78,77
296	65,52	296	93,04	79,28
297	66,50	297	92,83	79,67
298	67,40	298	92,05	79,73
299	68,14	299	91,64	79,89
300	68,39	300	90,59	79,49

b) Měření odrazivosti na výstupní straně hranolu s antireflexní vrstvou:

MĚŘENÍ ODRAZIVOSTI NA VÝSTUPNÍ STRANĚ HRANOLU S ANTIREFLEXNÍ VRSTVOU

Typ měření: Měření odrazivosti hranolu v UV oblasti

Měřicí zařízení: PerkinElmer Lambda 950 B

Měřený parametr: Antireflexní vrstva

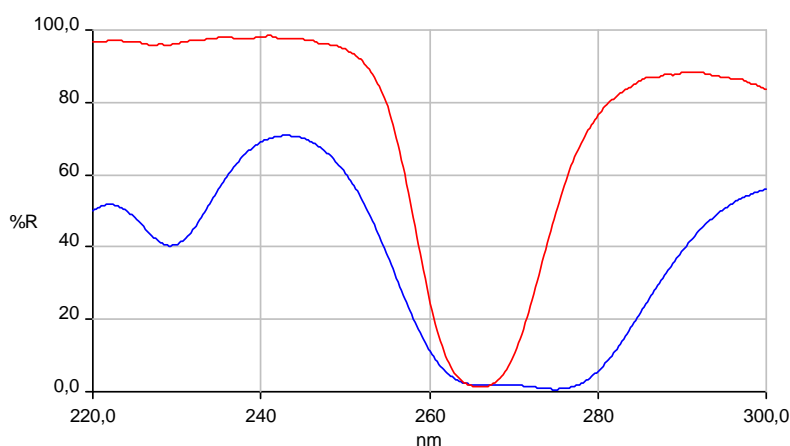
Vlnová délka: 220-300 nm

Úhel dopadu: 68,7°

Datum měření: 26. 2. 2009

Naměřila: Monika Nováková

Výsledky měření:



Obr.46: Graf odrazivosti na výstupní straně hranolu

Tab.5: Výsledky naměřené při měření odrazivosti na výstupní straně hranolu

Vlnová délka (λ)	Odrazivost pro složku polarizace p (R_p)	Vlnová délka (λ)	Odrazivost pro složku polarizace s (R_s)	Odrazivost (R)
220	49,97	220	96,81	73,39
221	51,31	221	96,63	73,97
222	51,92	222	97,11	74,51
223	51,37	223	97,07	74,22
224	50,09	224	96,82	73,45
225	48,17	225	96,93	72,55
226	45,68	226	96,38	71,03
227	43,19	227	95,75	69,47

228	41,30	228	96,09	68,70
229	40,33	229	95,87	68,10
230	40,65	230	96,40	68,53
231	42,25	231	96,71	69,48
232	45,01	232	97,29	71,15
233	48,50	233	97,32	72,91
234	52,34	234	97,54	74,94
235	56,25	235	97,94	77,10
236	59,81	236	97,98	78,89
237	62,91	237	97,86	80,39
238	65,55	238	97,72	81,63
239	67,55	239	97,86	82,70
240	69,08	240	97,99	83,53
241	70,09	241	98,54	84,31
242	70,65	242	97,86	84,25
243	70,93	243	97,45	84,19
244	70,66	244	97,69	84,18
245	70,11	245	97,45	83,78
246	69,15	246	97,19	83,17
247	67,56	247	96,29	81,92
248	65,74	248	96,11	80,92
249	63,33	249	95,66	79,49
250	60,58	250	94,75	77,67
251	57,11	251	93,28	75,20
252	53,14	252	91,58	72,36
253	48,41	253	88,60	68,50
254	43,19	254	84,67	63,93
255	37,76	255	79,33	58,54
256	31,95	256	70,96	51,45
257	26,13	257	60,98	43,56
258	20,69	258	49,21	34,95
259	15,63	259	36,89	26,26
260	11,37	260	25,45	18,41
261	7,91	261	16,11	12,01
262	5,29	262	9,17	7,23
263	3,50	263	4,91	4,21
264	2,43	264	2,61	2,52
265	1,92	265	1,58	1,75
266	1,76	266	1,26	1,51
267	1,78	267	1,60	1,69
268	1,86	268	2,85	2,36
269	1,89	269	5,46	3,67
270	1,82	270	9,83	5,83
271	1,65	271	15,96	8,80
272	1,36	272	23,73	12,54
273	1,05	273	32,22	16,64
274	0,78	274	41,19	20,98
275	0,65	275	49,43	25,04
276	0,80	276	56,93	28,86
277	1,29	277	63,57	32,43
278	2,22	278	68,66	35,44
279	3,67	279	72,93	38,30

280	5,59	280	76,45	41,02
281	8,08	281	79,31	43,69
282	10,98	282	81,28	46,13
283	14,33	283	83,17	48,75
284	17,99	284	84,43	51,21
285	21,64	285	85,92	53,78
286	25,36	286	87,18	56,27
287	28,95	287	86,80	57,87
288	32,46	288	87,81	60,14
289	35,74	289	87,56	61,65
290	38,87	290	88,22	63,55
291	41,74	291	88,23	64,98
292	44,42	292	88,35	66,39
293	46,73	293	87,94	67,34
294	48,76	294	87,21	67,99
295	50,61	295	87,10	68,85
296	52,11	296	86,42	69,27
297	53,44	297	86,48	69,96
298	54,45	298	85,36	69,90
299	55,37	299	84,74	70,05
300	56,06	300	83,57	69,82

c) Měření propustnosti hranolu s antireflexní vrstvou:

MĚŘENÍ PROPUSTNOSTI HRANOLU S ANTIREFLEXNÍ VRSTVOU

Typ měření: Měření odrazivosti hranolu v UV oblasti

Měřicí zařízení: PerkinElmer Lambda 950 B

Měřený parametr: Antireflexní vrstva

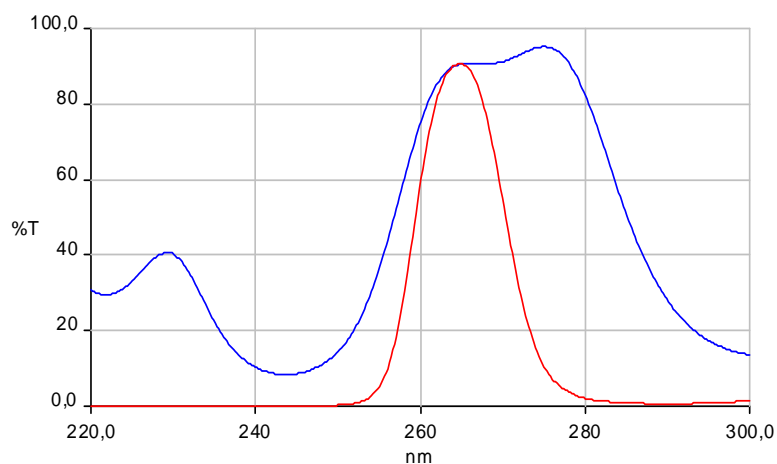
Vlnová délka: 220-300 nm

Úhel dopadu: 75,8°

Datum měření: 26. 2. 2009

Naměřila: Monika Nováková

Výsledky měření:



Obr.47: Graf propustnosti hranolu s Antireflexní vrstvou

Tab.6: Výsledky naměřené při měření propustnosti hranolu s antireflexní vrstvou

Vlnová délka (λ)	Propustnost pro složku polarizace p (T_p)	Vlnová délka (λ)	Propustnost pro složku polarizace s (T_s)
220	30,66	220	0,05
221	29,72	221	0,08
222	29,40	222	0,08
223	29,96	223	0,06
224	31,16	224	0,07
225	32,92	225	0,07
226	35,34	226	0,09
227	37,79	227	0,11
228	39,72	228	0,10
229	40,75	229	0,11
230	40,39	230	0,11
231	38,46	231	0,09
232	35,12	232	0,06
233	30,96	233	0,06
234	26,57	234	0,04
235	22,37	235	0,03
236	18,67	236	0,03
237	15,66	237	0,04
238	13,35	238	0,04
239	11,57	239	0,03
240	10,25	240	0,02
241	9,36	241	0,02
242	8,77	242	0,04
243	8,41	243	0,06
244	8,40	244	0,03
245	8,62	245	0,05
246	9,08	246	0,06
247	9,86	247	0,09
248	10,90	248	0,13
249	12,41	249	0,15

250	14,31	250	0,24
251	16,89	251	0,43
252	20,25	252	0,68
253	24,55	253	1,28
254	29,90	254	2,47
255	36,25	255	4,79
256	43,55	256	9,47
257	51,54	257	17,29
258	59,74	258	29,05
259	67,74	259	43,64
260	74,85	260	58,77
261	80,74	261	71,69
262	85,25	262	81,39
263	88,25	263	87,27
264	89,95	264	90,19
265	90,65	265	90,81
266	90,78	266	89,25
267	90,67	267	84,81
268	90,61	268	77,38
269	90,75	269	66,89
270	91,18	270	54,74
271	91,91	271	42,53
272	92,92	272	31,22
273	93,94	273	22,18
274	94,81	274	15,22
275	95,20	275	10,54
276	94,85	276	7,25
277	93,52	277	5,12
278	91,07	278	3,93
279	87,38	279	2,65
280	82,64	280	2,11
281	77,02	281	1,59
282	70,65	282	1,32
283	64,01	283	1,16
284	57,21	284	1,01
285	50,93	285	0,85
286	45,25	286	0,74
287	39,99	287	0,72
288	35,43	288	0,61
289	31,53	289	0,70
290	28,04	290	0,65
291	25,10	291	0,69
292	22,60	292	0,69
293	20,53	293	0,69
294	18,75	294	0,74
295	17,33	295	0,84
296	16,18	296	0,92
297	15,28	297	0,94
298	14,55	298	1,14
299	13,94	299	1,24
300	13,61	300	1,51

d) Měření propustnosti hranolu bez antireflexní vrstvy:

MĚŘENÍ PROPUSTNOSTI HRANOLU BEZ ANTIREFLEXNÍ VRSTVY

Typ měření: Měření odrazivosti hranolu v UV oblasti

Měřicí zařízení: PerkinElmer Lambda 950 B

Měřený parametr: Antireflexní vrstva

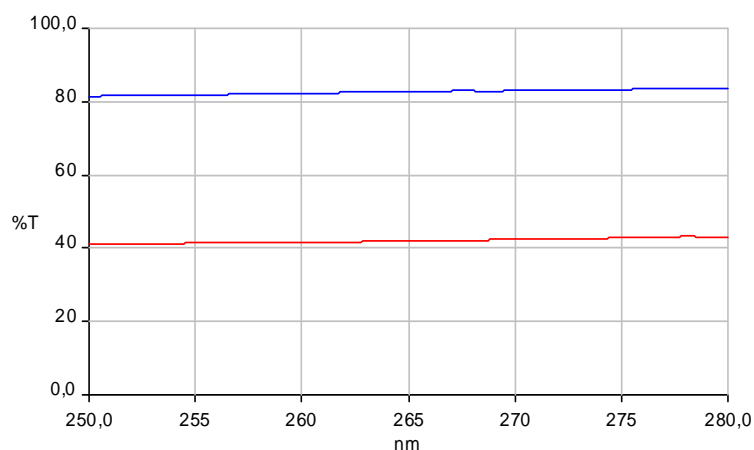
Vlnová délka: 250-280 nm

Úhel dopadu: 75,8°

Datum měření: 26. 2. 2009

Naměřila: Monika Nováková

Výsledky měření:



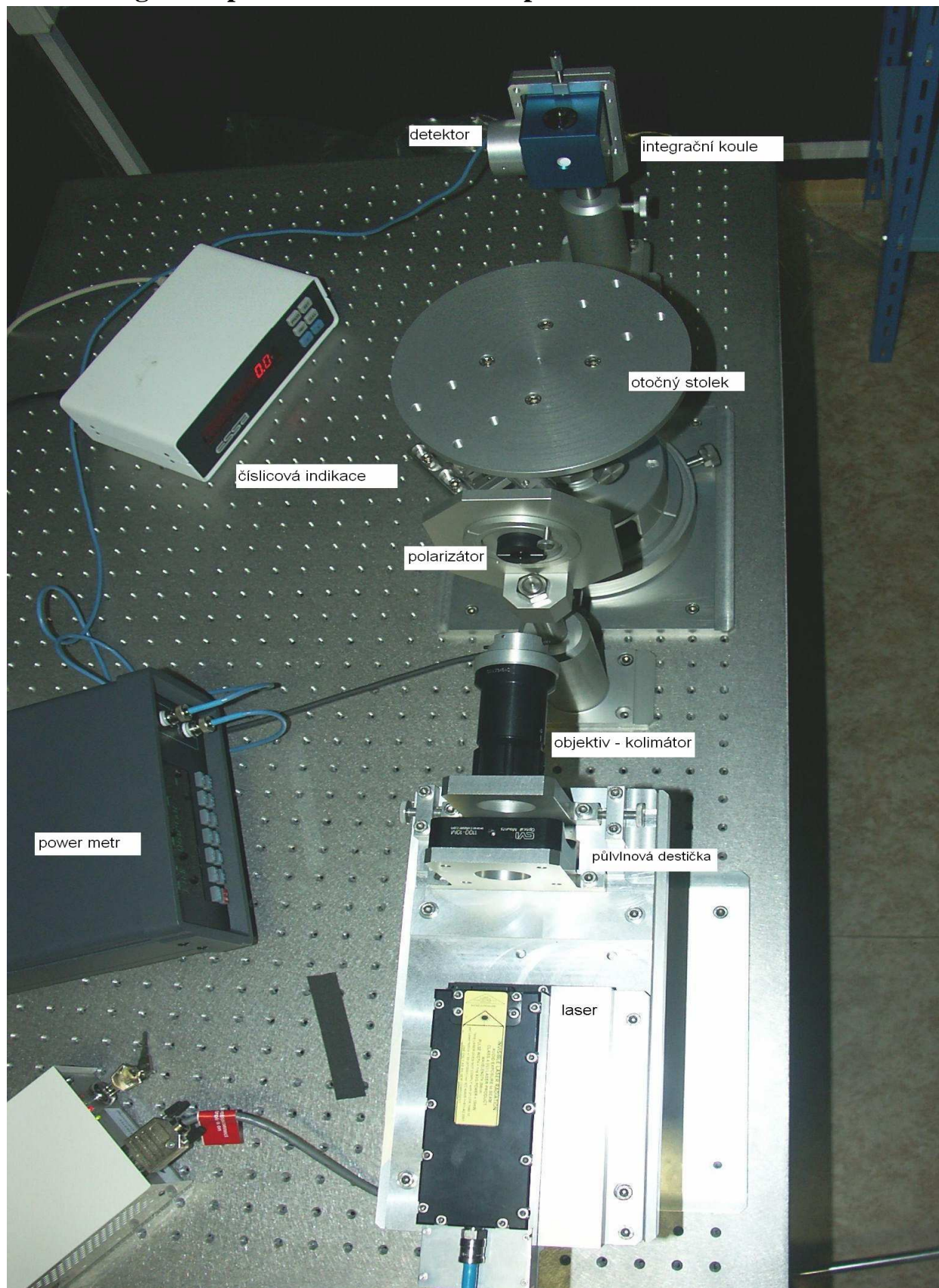
Obr.48: Graf propustnosti hranolu bez antireflexní vrstvy

Tab.7: Výsledky naměřené při měření propustnosti hranolu bez antireflexní vrstvou

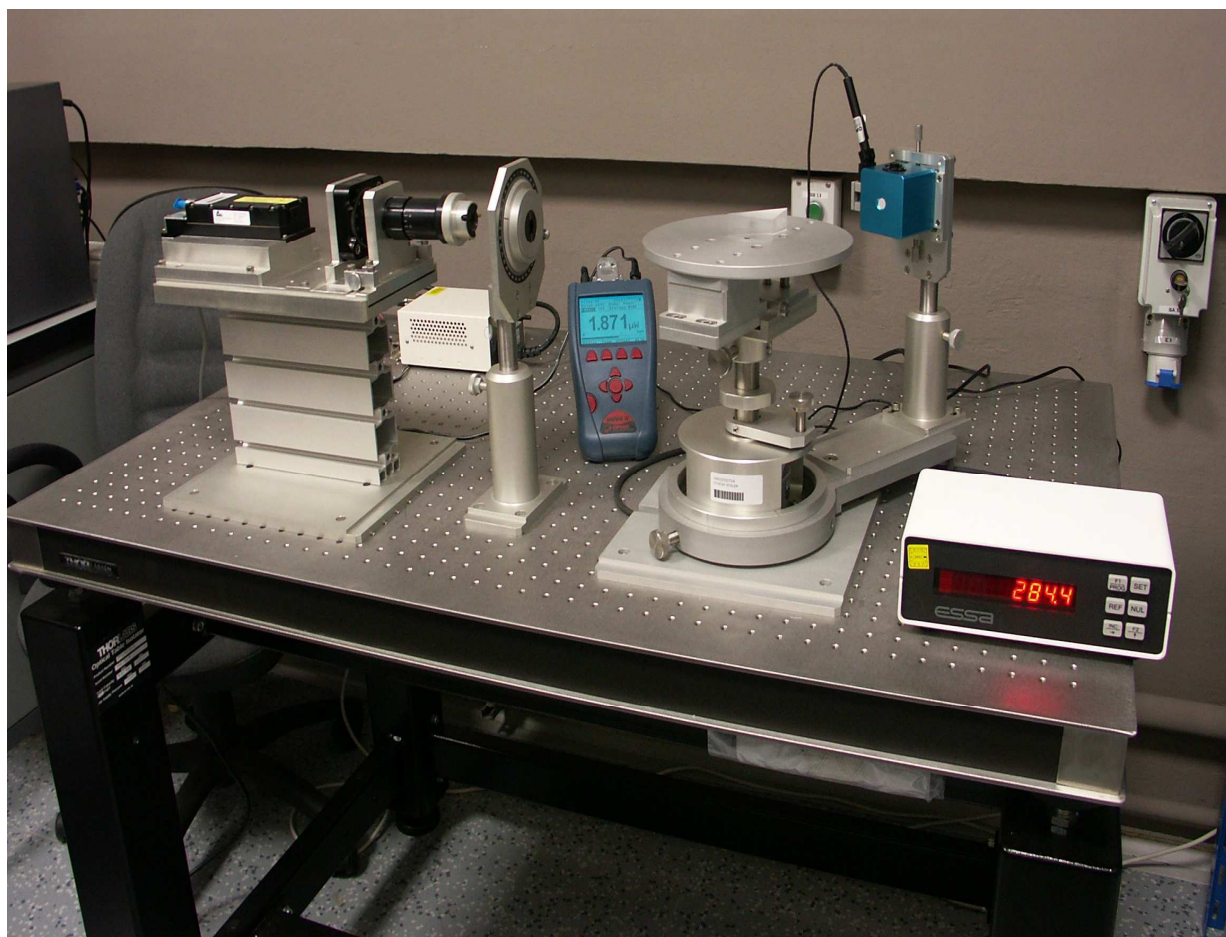
Vlnová délka (λ)	Propustnost pro složku polarizace p (T_p)	Vlnová délka (λ)	Propustnost pro složku polarizace s (T_s)
250	81,46	250	41,01
251	81,60	251	41,14
252	81,69	252	41,11
253	81,76	253	41,03
254	81,83	254	41,17
255	81,76	255	41,55
256	81,93	256	41,39
257	82,08	257	41,38
258	82,16	258	41,41
259	82,27	259	41,58
260	82,30	260	41,68
261	82,38	261	41,76

262	82,51		262	41,54
263	82,57		263	41,90
264	82,55		264	42,04
265	82,83		265	42,07
266	82,89		266	42,09
267	82,94		267	42,25
268	82,96		268	42,06
269	82,82		269	42,34
270	83,09		270	42,43
271	83,09		271	42,64
272	83,38		272	42,67
273	83,32		273	42,64
274	83,40		274	42,67
275	83,31		275	42,92
276	83,53		276	43,13
277	83,61		277	42,97
278	83,49		278	43,29
279	83,54		279	43,14
280	83,56		280	43,20

F. Fotografie optické lavice se sestavou pro měření laserem



Obr.49: Sestava pro měření laserem



Obr.50: Měření hranolu laserem

G. Fotografie dalších součástek používaných pro měření optických vlastností



Obr.51: Integrační koule (Převzato z [27])



Obr.52: Polarizátor (Převzato z [26])

H. Měření laserem

Při měření laserem jsem měřila odrazivost a propustnost stejného hranolu jako při měření spektrometrem.

○ **Měření pomocí laseru:** Opět šlo o šest měření.

- Měření odrazivosti na vstupní straně hranolu pro složku polarizace p .
- Měření odrazivosti na výstupní straně hranolu pro složku polarizace p .
- Měření propustnosti pro složku polarizace p .
- Měření odrazivosti na vstupní straně hranolu pro složku polarizace s .
- Měření odrazivosti na výstupní straně hranolu pro složku polarizace s .
- Měření propustnosti pro složku polarizace s .

○ **Postup měření:**

1. Sestavila jsem sestavu pro měření v UV oblasti.
2. Vzhledem k tomu, že laser je částečně polarizován, není nutné u měření používat polarizátor, kde je mezi p a s složkou malý rozdíl. Požadovaná polarizace se pak nastavují otáčením půlvlnové destičky.
3. Provedla jsem kalibraci.
4. Kus jsem umístila výškově a stranově na otočný stoleček, tak aby dopadající svazek světla procházel středem přední strany kusu, zjistila jsem zda dopadající a odražený paprsek má stejnou dráhu.
5. Nastavila jsem úhel mezi dopadajícím a odraženým paprskem pro i) a iv) měření $75,8^\circ$, pro ii) a v) $68,7^\circ$. Při měření propustnosti jsem nastavila úhel $284,2^\circ$, stejně jako u měření spektrometrem.
6. Integrovní kouli jsem nastavila tak, aby do ní vstupoval paprsek procházející (resp. odrážející se) hranolem.
7. Zapsala jsme hodnoty, které ukazoval powermetr napojený na integrační kouli.

○ **Výsledky měření laserem**

Tab.8: Výsledky měření při měření laserem:

	Polarizace složky s		Polarizace složky p
Kalibrace	$1,740\mu W = 100\%$	Kalibrace	$1,672\mu W = 100\%$
Měření i)	$0,130\mu W = 7,5\%$	Měření iv)	$0,094\mu W = 5,6\%$
Měření ii)	$0,021\mu W = 1,62\%$	Měření v)	$0,032\mu W = 1,29\%$
Měření iii)	$1,543\mu W = 88,7\%$	Měření vi)	$1,513\mu W = 90,5\%$

I. Parametry laseru použitého pro měření



LASER HEAD SNU-02P-000

Page 2 of 5

	Specifications
<u>Wavelength</u>	266 nm
<u>Output Performance</u> Average Output Power Pulse width (FWHM) Repetition rate Wavelength rejection	>2 mW < 500 psec. 6 kHz – 10 kHz <10 ⁻⁴ @ 808nm <10 ⁻³ @ 1064, 532nm
<u>Beam Quality</u> Horizontal plane Beam propagation profile Beam diameter at output plane Beam divergence (full angle at 1/e ²) Waist radius (1/e ²) Vertical plane Beam propagation profile Beam diameter at output plane Beam diameter at 300 mm from output	Gaussian 450 μm ± 50 μm 11 ± 2 mrad ⁽¹⁾ 16 μm ± 5 μm (sin x / x) ² See note ⁽²⁾ 630 μm ± 100 μm <1.5 mm ⁽²⁾
<u>Beam position</u> Beam height Static alignment Angular tolerance Waist position	22 mm ± 0.5 mm ± 5 mrad 86 mm inside the laser from the output plane
<u>Polarisation</u> Linear Polarization ratio Polarization direction	> 100:1 Vertical ± 5°
<u>Pointing stability</u> At stabilized t° (2 hrs, 20 ± 3 °C) Over operating temperature range	< 60 μrad < 40 μrad/ °C
<u>Power stability</u> ⁽³⁾ Short term (10 min) Long term (1 hrs)	< ± 1% < ± 5%
<u>Dimensions (LxWxH)</u> Head	180 x 55 x 35.5 mm
<u>Laser safety class</u> According to IEC 60825-1993 According to 21 CFR 1040.10	4 IV
<u>Cable length</u>	1 meter
<u>Weight</u>	670 g (typical)
<u>Warranty</u>	12 months or 5000 hours whichever occurs first
<u>Certification</u>	CE certified ⁽⁴⁾

Závěr

V bakalářské práci se zabývám principy napařování tenkých vrstev používaných v Meoptě – optika s.r.o. a následně i měřením jejich spektrálních vlastností se zaměřením na ultrafialovou oblast.

Popisuji různé typy tenkých vrstev. Za tenkou optickou vrstvu považujeme vrstvu dielektrického, kovového nebo polovodičového materiálu o tloušťce srovnatelné s vlnovou délkou světla. Např.: antireflexní, optický dělič, vysoce reflexní vrstvy, filtry – barevné či úzkopásmové.

Tenké vrstvy jsou napařovány na optické součásti vyrobené z optických skel různých vlastností. Některé typy skel nejsou pro ultrafialovou oblast vhodné, jelikož velmi silně absorbují v ultrafialové oblasti. Proto při výrobě optických součástí volíme sklo s takovými vlastnostmi, aby vyhovovalo pozdějšímu použití. O výběru materiálu pro výrobu tenké vrstvy rozhodují nejčastěji požadavky zákazníka.

V bakalářské práci dále popisuji principy napařování. Napařování je nejrozšířenější způsob nanášení tenkých vrstev, který probíhá ve vakuu. Substráty, na kterých chceme vytvořit tenkou vrstvu, umístíme do komory stroje, který je pro napařování tenkých vrstev určen a nazývá se vakuová napařovačka.

Vakuové napařovačky se mohou lišit:

Možnosti uložení substrátu uvnitř komory: Volíme mezi dvěma systémy uložení – na segmentový kolotoč nebo na planetární otáčení.

Možnosti monitorování procesu napařování: Přímý (transmisní) proces nebo nepřímý (reflexní).

Monitorování procesu napařování: Napařování můžeme monitorovat dvěma způsoby. Pouze krystalem nebo optickým monitoringem s krystalem.

Existují dvě možnosti napařování pro ultrafialovou oblast: Napařování z elektronového děla nebo z lodičky.

Druhá část bakalářské práce zahrnuje měření optických vlastností na spektrometrech nebo pomocí laseru.

Spektrometry jsou měřicí přístroje používané ke kontrole spektrálních vlastností optických tenkých vrstev napařených na optickou součást. Skládají se ze zdroje spojitého světelného spektra, monochromátoru (hranolového nebo mřížkového) a detektoru. Pro měření spektrálních parametrů lze vytvořit řadu měřících metod pomocí různých přípravků.

V případě měření v ultrafialové oblasti je třeba použít v dané měřicí metodě speciální optické prvky např.: deuteriovou lampu, optická vlákna vyrobená ze skel vhodných pro UV oblast.

K rychlé kontrole slouží sestava s laserovým zdrojem (266nm) doplněná o otočný stolek a detektor napojený na powermetr. Jako příklad je v bakalářské práci uvedeno měření transmise (propustnosti) a reflexe (odrazivosti) hranolu s antireflexními vrstvami na vstupní a výstupní ploše.

Použitá literatura:

- [1] Klabazňa, J., Nuc J., Kopal, B.: *Optika pro SOU*, Praha 1984
- [2] Fuka, J., Havelka, B.: *I. díl OPTIKA, Fyzikální kompendium pro VŠ, díl IV.*, Praha 1961
- [3] Ponec, J.: *O barvě*, Olomouc, listopad 2005
- [4] Curych, P., Vondruška, J. ml., Felzman, R.: *SVĚTLO A ZVUK v rukou tvůrců divadelního představení*
- [5] Křepelka J.: *Optika tenkých vrstev*, Olomouc 1993
- [6] PDF materiály dodané firmou Meopta-Optika

Internet:

- [7] http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum (4.11.2008)
- [8] [ttp://cs.wikipedia.org/wiki/Transmitance](http://cs.wikipedia.org/wiki/Transmitance) (5.3.2009)
- [9] http://cs.wikipedia.org/wiki/Absorpce_sv%C4%B9tla (4.11.2008)
- [10] [ttp://cs.wikipedia.org/wiki/Rozklad_sv%C4%B9tla](http://cs.wikipedia.org/wiki/Rozklad_sv%C4%B9tla) (5.3.2009)
- [11] <http://www.glassdynamicsllc.com/BK7%20Material%20Data%20Sheet.htm>
(30.12.2008)
- [12] <http://www.glassdynamicsllc.com/SI-UV%20Material%20Data%20Sheet.htm>
(30.12.2008)

- [13] http://www.us.schott.com/lithotec/english/download/fs_june_2006_final_us.pdf
(30.12.2008)
- [14] <http://www.unitedlens.com/stuff/contentmgr/files/226b47c5d575a0530afcf452700c7315/misc/homosil.pdf> (30.12.2008)
- [15] <http://www.unitedlens.com/stuff/contentmgr/files/226b47c5d575a0530afcf452700c7315/misc/suprasil.pdf> (30.12.2008)
- [16] <http://www.alkor.net/alkorru/CaF21.html>
- [17] http://www.cerac.com/pubs/cmn/cmn8_2.htm (4.1.2009)
- [18] <http://olisweb.com/products/accessories/integratingsphere.php> (6.3.2009)
- [19] <http://spiff.rit.edu/classes/phys301/lectures/spectra/spectra.html> (5.3.2009)
- [20] http://www.mssl.ucl.ac.uk/www_astro/guides/beginners_spectra.html (5.3.2009)
- [21] <http://www.leyboldoptics.com/en/syruspro.html> (17.1.2009)
- [22] http://www.siltint.com/precision_products/aps.htm (11.5.2009)
- [23] <http://focus.aps.org/story/v23/st4> (11.5.2009)
- [24] <http://www.perkinelmer.co.kr/product/sub2.php?pd=2446> (24.5.2009)
- [25] http://www.solidphys.ethz.ch/spectro/exp_fac.htm (11.5.2009)
- [26] <http://artemis.osu.cz/Fyzp3/multimed/pristr/pristr.htm> (6.3.2009)
- [27] <http://www.oceanoptics.com/products/fois.asp> (6.3.2009)
- [28] http://en.wikipedia.org/wiki/Glan%E2%80%93Thompson_prism (10.4.2010)

[29] http://en.wikipedia.org/wiki/Nicol_prism (10.4.2010)

[30] http://en.wikipedia.org/wiki/Wollaston_prism (10.4.2010)