

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA OPTIKY

**Měření spektrálních vlastností optických
součástí v oblasti VIS a NIR na
spektrometrech PerkinElmer a Nicolet**

-

**Measurement of spectral characteristics of
optical components in VIS and NIR region
at spectrometers PerkinElmer and Nicolet**

Diplomová práce

Vypracoval:	Monika Nováková
Studijní program:	N1701 - Fyzika
Studijní obor:	Optika a optoelektronika
Forma studia:	prezenční
Vedoucí práce:	Mgr. Jiří Kyvalský
Konzultant práce:	RNDr. Josef Kapitán, Ph.D
Rok odevzdání práce:	2012
Pracoviště:	Meopta – optika, s. r. o.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Měření spektrálních vlastností optických součástí v oblasti VIS a NIR na spektrometrech PerkinElmer a Nicolet“ vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

OLOMOUC 31. 7. 2012

Monika Nováková

.....

Poděkování:

Tímto bych chtěla upřímně poděkovat vedoucímu diplomové práce Mgr. Jiřímu Kyvalskému a konzultantovi RNDr. Josefu Kapitánovi, Ph.D., za odborné vedení a ochotu při vzniku této diplomové práce. Dále bych chtěla také poděkovat Meoptě-optika s.r.o. za umožnění vypracování diplomové práce a všem ostatním co měli větší či menší přínos na vzniku této diplomové práce.

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora:	Monika Nováková
Název práce:	Měření spektrálních vlastností optických součástí v oblasti VIS a NIR na spektrometrech PerkinElmer a Nicolet
Typ práce:	Diplomová práce
Pracoviště:	Meopta-optika, s.r.o.
Vedoucí práce:	Mgr. Jiří Kyvalský
Konzultant práce:	RNDr. Josef Kapitán, Ph.D
Rok obhajoby práce:	2012

Abstrakt:

V diplomové práci se zaměřuji na kontrolu spektrálních vlastností optických kusů.

První část práce je zaměřena na teoretický popis problematiky později použité v diplomové práci např.: zdroje elektromagnetického záření, základní optické zákony, typy tenkých vrstev atd.

Druhá část diplomové práce je blíže zaměřena na spektroskopická měření, najdeme zde popis spektrometrů použitých pro měření v diplomové práci, jejich výhody a nevýhody, postup měření s těmito spektrometry a také postup měření na optické lavici s laserovým zdrojem.

Ve třetí části najdeme teoretické křivky tenkých vrstev nanášených na optické součásti, které budou později měřeny.

Další část diplomové práce navazuje na předchozí a obsahuje měřené výsledky jednotlivých měřených optických součástí s křivkami naměřených hodnot a porovnání výsledků.

V diplomové práci byla měřena např. odrazivost zrcátka, odrazivosti a propustnosti hranolu a dělicí kostky.

Klíčová slova:	Elektromagnetické záření, spektrum, tenké vrstvy, spektroskopie, laser.
Počet stran:	72
Počet příloh:	2
Jazyk:	Čeština

Bibliographical identification:

Autor's first name and surname: Monika Nováková
Title: Measurement of spectral characteristics of optical components in VIS and NIR region at spectrometers PerkinElmer and Nicolet
Type of thesis (bachelor, master): Master
Workplace: Meopta-optika, s.r.o.
Supervisor: Mgr. Jiří Kyvalský
Consultant: RNDr. Josef Kapitán, Ph.D
The year of presentation: 2012

Abstract:

In this thesis I focus on the control of spectral properties of optical units.

The first part focuses on the theoretical description of the problem later used in this thesis as: sources of electromagnetic radiation, basic optical laws, types of thin films, etc.

The second part of this thesis is focused to the spectroscopic measurements, we find here a description of the spectrometers used for measurements in this thesis, their advantages and disadvantages, the measurement procedure with these spectrometers and measurement procedure on the optical bench with a laser source too.

In the third part we find the theoretical curves of thin coatings applied to optical components that will later be measured.

Another part of the thesis builds on the previous one and contains the measured results of individual optical components of the measured curves with the measured values and comparing results.

For example, reflectance of mirrors, reflectance and transmittance of dividing cube prism was measured in this thesis.

Keywords: Electromagnetic radiation, spectrum, thin films, spectrometers, laser.
Nuber of pages: 72
Nuber of appendices: 2
Language: Czech

Obsah:

1. Teoretický úvod.....	str. 7
1.1. Maxwellovy rovnice	
1.2. Elektromagnetické záření	
1.3. Radiometrie	
1.4. Typy zdrojů elektromagnetického vlnění	
1.5. Základní optické zákony	
1.6. Michelsonův interferometr	
1.7. Fourierova transformace	
2. Tenké vrstvy.....	str. 26
2.1. Druhy tenkých vrstev	
3. Spektroskopické měření použité v diplomové práci.....	str. 28
3.1. Spektrometr	
3.2. Spektrometr PerkinElmer	
3.3. Spektrometr Nicolet	
3.4. Měření laserovým zdrojem	
4. Požadované parametry měřených součástí.....	str. 40
4.1. Požadované parametry zrcátka	
4.2. Požadované parametry hranolu	
4.3. Požadované parametry dělicí kostky	
5. Naměřená data.....	str. 44
5.1. Naměřená data odrazivosti zrcátka	
5.2. Naměřená data odrazivosti a propustnosti hranolu	
5.3. Naměřená data odrazivosti a propustnosti dělicí kostky	
Závěr.....	str. 57
Přílohy.....	str. 59
A. Technické výsledky měřených součástí	
B. Fotografie a obrázky	
Použitá literatura.....	str. 71

1. Teoretický úvod

1.1. Maxwellovy rovnice v látkovém prostředí

Maxwellovy rovnice popisují chování elektromagnetického pole a jsou zapisovány pro prostředí bez zdrojů:

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (1.1.)$$

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (1.2.)$$

$$\operatorname{div}\vec{D} = 0 \quad (1.3.)$$

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0 \quad (1.4.)$$

, kde \vec{D} je vektor elektrické indukce, \vec{E} je vektor intenzity el. pole, \vec{B} je vektor magnetické indukce a \vec{H} je vektor intenzity mag. pole.

Vztah mezi \vec{D} a \vec{E} závisí na vlastnostech elektrických prostředí a vztah mezi \vec{B} a \vec{H} závisí na vlastnostech magnetických prostředí. Tyto vztahy se nazývají materiálové vztahy a jsou popsány takto:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad \vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.5.) (1.6.)$$

, kde \vec{P} je polarizace, \vec{M} je magnetizace, ε_0 je permitivita vakua ($\varepsilon_0 \doteq 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$), μ_0 je permeabilita ($\mu_0 \doteq 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$).

Uvažujeme-li vakuum nebo homogenní, izotropní látky, pro které je, pak píšeme materiálové vztahy ve tvaru.

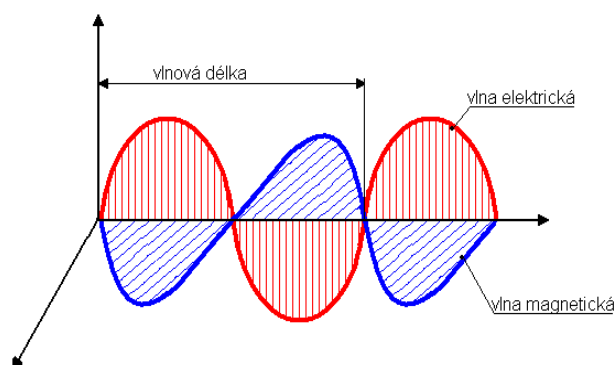
$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \quad \vec{B} = \mu\vec{H} \quad (1.7.) (1.8.)$$

[6]

1.2. Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je kombinace dvou souvisejících vektorových polí, magnetického pole a elektrického pole (Obr. 1). Vektory intenzity elektrického pole a magnetického pole rovinné vlny jsou na sebe navzájem kolmé, šířili se tato vlna vakuem nebo homogenním, izotropním prostředím. Elektrické pole, které se pohybuje nebo se mění, vyvolá magnetické pole a měnící se nebo pohybující se magnetické pole vyvolává elektrické pole

(vychází z Maxwellových rovnic). Elektromagnetické vlny lze charakterizovat vlnovou délkou. [1,4]



Obr. 1: Elektromagnetické záření

Vlnová délka $\lambda[m]$ označuje nejbližší vzdálenost mezi dvěma body vlnění, které kmitají se stejnou fází. K vyjádření vlnové délky lze použít vztah

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}, \quad (1.9)$$

kde T je perioda, f je frekvence vlnění a v je rychlost šíření vlny.

Rychlost světla $v[m/s]$ v homogenním, izotropním prostředí o určitém indexu lomu n vypočteme ze vztahu

$$v = \frac{c}{n} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \doteq 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (1.10.) \quad (1.11.)$$

,kde c je rychlost světla ve vakuu.

Index lomu $n[-]$ je poměr rychlosti světla ve vakuu a rychlosti světla v prostředí. Popisuje šíření světla v látkách. Je závislý na vlnové délce atp. Jde o bezrozměrnou veličinu. (Kapitola 1.5.1.)

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (1.12.)$$

1.3. Radiometrie

Radiometrie se zabývá energetickými vlastnostmi optického záření. Tyto energetické vlastnosti popisují radiometrické veličiny. Mezi radiometrické veličiny patří:

Zářivá energie $Q[J = m^2 kg/s^2]$ je energie vyslaná, přenesená nebo přijatá jako elektromagnetické záření.

Zářivý tok $\phi[W]$ jde o zářivou energii Q , která projde danou plochou za dobu t .

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.13.)$$

Zářivost $I[W/sr]$ v daném směru je dána podílem části zářivého toku $d\phi$, který vychází ze zdroje do jednotkového prostorového úhlu $d\Omega$. Použití pro popis bodových zdrojů.

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (1.14.)$$

Zář $L[W/sr \cdot m^2]$ je zářivý tok do úhlu α na promítnutou jednotkovou plochu zdroje.

$$L = \frac{I}{dS \cdot \cos \alpha} \quad (1.15.)$$

Ozáření $E[W/m^2]$ popisuje množství zářivého toku dopadající na jednotkovou plochu.

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dS} \quad (1.16.)$$

1.4. Typy zdrojů elektromagnetického vlnění

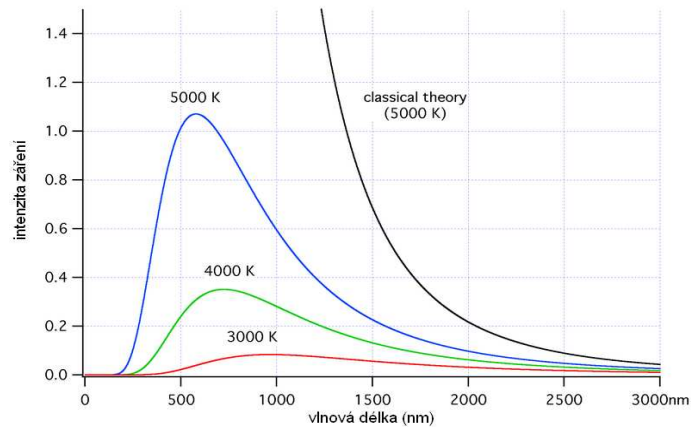
Jako zdroj elektromagnetického vlnění můžeme považovat každé těleso, od něhož světlo přichází. Tyto zdroje dělíme na **přírozené** (např.: slunce, měsíc, mraky...) a **umělé** (např.: žárovka, výbojka, lasery...).

Jako ideální zářič je považováno **absolutně černé těleso**, vysílá největší možné množství zářivé energie vzhledem k dopadající energii, která je plně pohlcována. Pohlcená energie absolutně černým tělesem je stejná jako vyzářená. Celkové množství vyzářené energie absolutně černým tělesem a rozložení intenzity závisí na jeho teplotě (vyzářená energie je tím větší čím je teplota tělesa větší). Příkladem absolutně černého tělesa je duté těleso s velmi malým otvorem – záření, které vniká otvorem do dutiny, zůstává v této dutině a je pohlcováno stěnami dutiny. Záření, které tímto otvorem naopak uniká, má podobné vlastnosti jako záření absolutně černého tělesa. [5,8,4]

Závislost intenzity I absolutně černého tělesa na frekvenci ω vyjadřuje **Planckův vyzařovací zákon**:

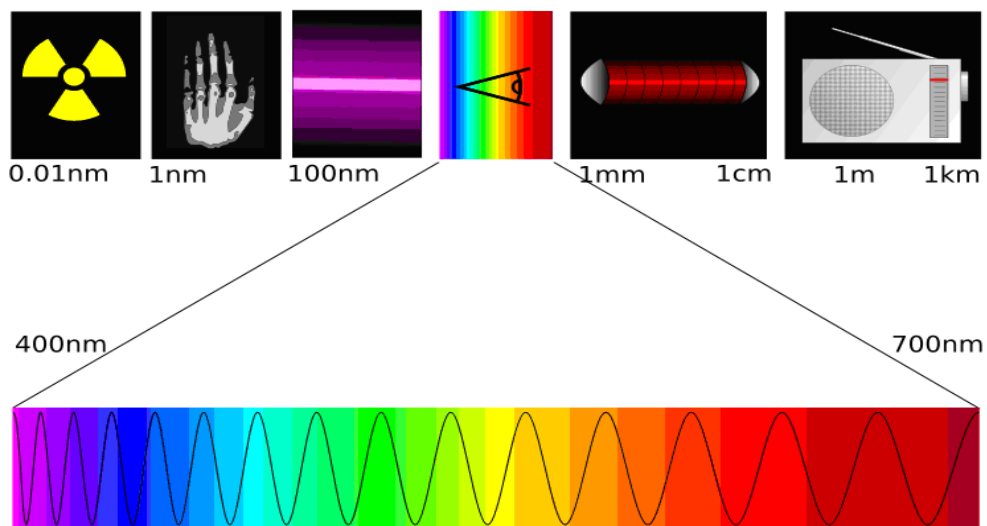
$$dI = \frac{\hbar}{\pi^2 c^2} \frac{\omega^3}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1} d\omega \quad (1.17.)$$

,kde ω je frekvence záření vyzářeného tělesem, I je intenzita záření, T je teplota absolutně černého tělesa, \hbar je redukovaná Planckova konstanta ($\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), c je rychlost světla ve vakuu ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a k Boltzmanova konstanta ($0,138 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$). [5]



Obr. 2: Závislost teploty, intenzity a vlnové délky absolutně černého tělesa – s rostoucí teplotou se vrchol intenzity posouvá ke kratším vlnovým délkám (Převzato z [17])

Elektromagnetické vlnění v sobě zahrnuje různé typy záření, které rozdělujeme podle vlnové délky λ na gama záření, RTG, UV, VIS, IČ, mikrovlny, rádiové vlny (Obr. 3). Pro spektroskopická měření se využívá UV, VIS a IČ záření.



Obr. 3: Dělení elektromagnetického záření (Převzato z [18])

Zdrojem **ultrafialového záření** (UV - $\lambda \approx 10$ až 350nm) jsou velmi často tělesa rozžhavená na velmi vysokou teplotu např.: Slunce (nejčastější zdroj), elektrický oblouk, ale zdrojem ultrafialového záření může být také oblouková lampa. U spektrometru PerkinElmer, který je v diplomové práci použit pro měření, je jako zdroj UV záření použita deuteriová

lampa. Pro člověka je toto záření neviditelné, ale existují živočichové, kteří UV záření vnímají. Láma a odráží se podobně jako záření viditelné. [2,13]

Ultrafialové záření se dělí podle škodlivosti na **UVA** ($\lambda \approx 315$ až 400 nm), které je neškodné a na zemi ho dopadá z celkového množství největší část, **UVB** ($\lambda \approx 280$ až 315 nm) a **UVC** ($\lambda \approx$ nižší než 280 nm), které je škodlivé.

Zdroje **viditelného světla** (VIS - $\lambda \approx 350$ až 750 nm) jsou např.: žárovky, zářivky, lasery, slunce, plamen atd. U spektrometrů použitých pro měření diplomové práce je zdrojem viditelného záření wolframová lampa. VIS se využívá v mnoha přístrojích (např.: v LCD obrazovkách, DVD přehrávačích, mobilních telefonech atd.), ve strojírenství (např.: k řezání, svařování atd.), v lékařství (např.: k operování atd.) a v mnoha dalších odvětvích. [3, 12]

Běžným zdrojem **infračerveného záření** (IR - $\lambda \approx 750$ nm až 1 mm) je sluneční záření, žárovka s wolframovým vláknem, oblouková lampa nebo jím může být třeba elektrická rozžhavená tyč z karbidu křemíku. Jako zdroj NIR záření je u spektrometrů, které byly použity pro měření diplomové práce, wolframová lampa u PerkinElmer a výkonná keramická tyčinka u Nicoletu. [2, 13]

Infračervené záření často dělíme na NIR (blízké IR - $\lambda \approx 750$ nm – 5μ m), (střední IR - $\lambda \approx 5$ – 30μ m), FIR (dlouhé IR - $\lambda \approx 30\mu$ m – 1 mm).

Některé typy záření zde nejsou popsány, jelikož se jimi v diplomové práci nezabývám. [4]

1.5. Základní optické zákony

1.5.1. Zákon odrazu a zákon lomu – Snellův zákon

Zákon odrazu říká, že na rovinném rozhraní dvou homogenních, izotropních a rozdílných prostředí se paprsky řídí také zákonem odrazu. To znamená, že úhel dopadu je roven úhlu odrazu $\alpha = \alpha'$, přičemž odražené paprsky zůstávají v rovině dopadu. [6]

Zákon lomu říká, že na rovinném rozhraní dvou homogenních, izotropních a rozdílných prostředí s indexy lomu n_1 a n_2 se světelné paprsky řídí zákonem lomu:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad (1.18.)$$

Lom ke kolmici: úhel dopadu je větší než úhel lomu $\alpha > \beta$. Paprsek jde z řidšího do hustšího prostředí $n_1 < n_2$ např.: ze vzduchu vstupuje do skla.

Lom od kolmice: úhel dopadu je menší než úhel lomu $\alpha < \beta$. Paprsek jde z hustšího do řidšího prostředí $n_1 > n_2$ např.: ze skla do vzduchu.

Láme-li se světlo pod pravým úhlem $\beta = \frac{\pi}{2}$, pak je úhel dopadu roven **meznímu úhlu**, který je dán:

$$\alpha_M = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.19.)$$

Mezní úhel je největší možný úhel, při kterém ještě dochází k lomu vlnění. [6]

Je-li úhel dopadu větší než mezní úhel $\alpha > \alpha_M$ pak se paprsek vůbec nedostane do druhého prostředí n_2 , ale odrazí se zpět do prvního prostředí n_1 . Tuto situaci nazveme **totální odraz**.

Reflexe je veličina 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 .

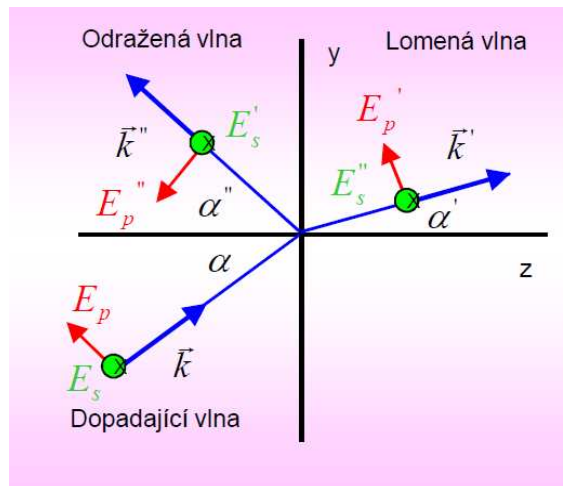
$$R = \frac{I_1}{I}. \quad (1.20.)$$

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 .

$$T = \frac{I}{I_0}. \quad (1.21.)$$

Fresnelovy rovnice lze odvodit z Maxwellových rovnic pro monochromatickou rovinnou vlnu. Popisují amplitudové, fázové a polarizační vlastnosti odražené a lomené vlny na rozhraní dvou prostředí (Obr. 4). Tyto vlastnosti závisejí na polarizaci dopadající vlny.

Polarizace dopadající vlny je **kolmá k rovině dopadu** (transverzální elektrická vlna) – mluvíme o „s“ polarizaci a vektory elektrické intenzity jsou značeny pro dopadající vlnu E_s , odraženou vlnu E'_s , lomenou vlnu E''_s nebo **leží v rovině dopadu** (transverzální magnetická vlna) – mluvíme o „p“ polarizaci a vektory elektrické intenzity jsou značeny pro dopadající vlnu E_p , lomenou vlnu E''_p , odraženou vlnu E'_p .



Obr. 4: Odraz a lom na rozhraní dvou prostředí (Převzato z [9])

Má-li dopadající vlna „s“ polarizaci je taková i polarizace odražené a lomené vlny. To samé platí i u dopadající vlny s „p“ polarizací. [9,17]

$$\text{Koeficient amplitudové reflexe pro „s“ polarizaci } r_s \equiv \frac{E_s''}{E_s} = -\frac{\sin(\alpha - \alpha')}{\sin(\alpha + \alpha')} \quad (1.22.)$$

$$\text{Koeficient amplitudové reflexe pro „p“ polarizaci } r_p \equiv \frac{E_p''}{E_p} = \frac{\text{tg}(\alpha - \alpha')}{\text{tg}(\alpha + \alpha')} \quad (1.23.)$$

$$\text{Koeficient amplitudové transmise pro „s“ polarizaci } t_s \equiv \frac{E_s'}{E_s} = 2 \frac{\sin \alpha' \cdot \cos \alpha}{\sin(\alpha + \alpha')} \quad (1.24.)$$

$$\text{Koeficient amplitudové transmise pro „p“ polarizaci } r_p \equiv \frac{E_p'}{E_p} = 2 \frac{\sin \alpha' \cdot \cos \alpha}{\sin(\alpha + \alpha') \cdot \cos(\alpha - \alpha')} \quad (1.25.)$$

1.5.2. Absorpce (Pohlcování)

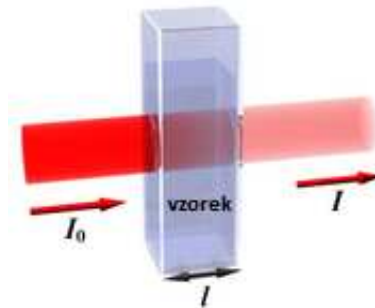
Optické prvky jsou vyráběny z materiálů, které světlo pohlčují a dochází tak ke ztrátám světla např.: přeměnou energie optického záření na energii tepelnou. Tento fyzikální proces se nazývá absorpce světla.

Absorpce záření je závislá na použitém materiálu i vlnové délce záření. [6]

Lambertův-Beerův zákon (Obr. 5) udává snížení intenzity záření v důsledku absorpce po průchodu vzorkem vyrobeného z nerozptylující látky

$$I = I_0 \exp(-gl), \quad (1.26.)$$

kde I_0 je intenzita záření vstupujícího do vzorku, I intenzita záření vystupujícího ze vzorku, l tloušťka vzorku a g je absorpční koeficient.

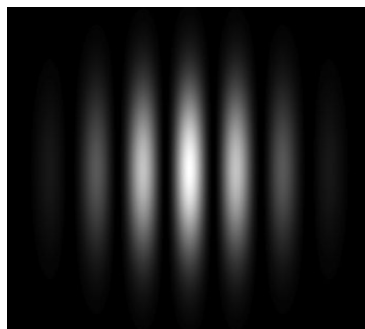


Obr. 5: Absorpce záření, Lambertův-Beerův zákon (Převzato z [19])

Lambertův-Beerův zákon platí pouze pro malé hodnoty intenzity záření, u velkých hodnot intenzity záření dojde k prosvětlení vzorku – vystupující intenzita by byla v tomto případě nižší, než udává Lambertův-Beerův zákon. [8]

1.5.3. Interference

K jevu, který se nazývá interference, neboli skládání dochází vždy, když se v nějakém bodu prostoru setkají nejméně dvě světelné vlny splňující interferenční podmínky (musí být koherentní, izotropní, se stejnou polarizací), které se pak zesilují nebo zeslabují (ruší). Tyto jevy se zobrazují pomocí interferenčních obrazců (Obr. 6) např. kroužků či proužků, kde pozorujeme střídající se projevy zesilování a zeslabování. [6]



Obr. 6: Interferenční proužky (Převzato z [20])

Vznik interferenčního maxima (zesilování) – konstruktivní interference (Obr. 7):

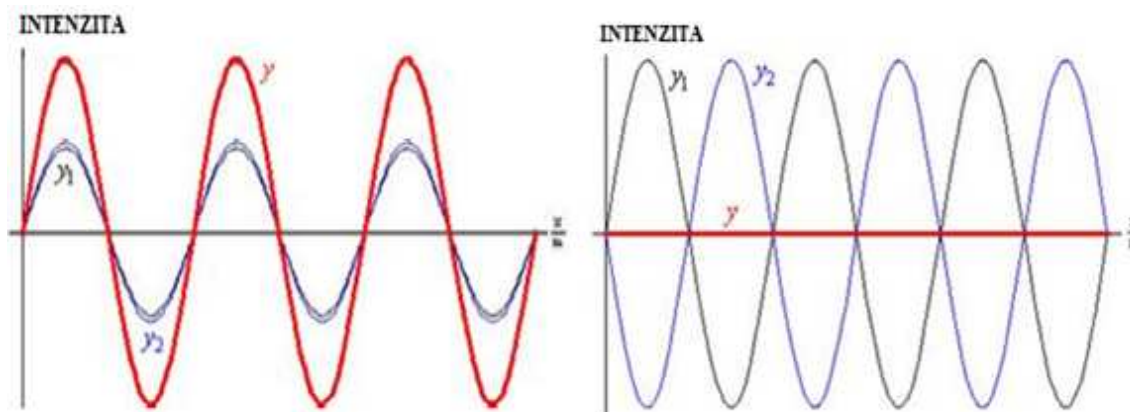
Dráhový rozdíl je roven sudému násobku $\lambda/2$:

$$\Delta\varphi_{\max} = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (1.27.)$$

Vznik interferenčního minima (zeslabování) – destruktivní interference (Obr. 8):

Dráhový rozdíl je roven lichému násobku $\lambda/2$:

$$\Delta\varphi_{\min} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (1.28.)$$



Obr. 7, 8: Interferenční maximum a minimum (Převzato z [20])

Interferenci lze pozorovat jen tehdy, jsou-li fázové rozdíly mezi skládanými vlnami stále v čase tzn. že vlnění je koherentní neboli fázově sladěné. Tato podmínka musí platit, alespoň po dobu pozorování.

Interferenční zákon udává výslednou intenzitu skládaných vln

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\varphi \quad \text{a} \quad \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (1.29.)$$

kde I je intenzita výsledné vlny, I_1 je intenzita první vlny, I_2 intenzita druhé vlny, φ je fázový posuv, φ_1 fáze první vlny, φ_2 fáze druhé vlny.

Kvalitu interferenčních obrazců a zároveň i stupeň koherence nám udává tzv. **vizibilita** neboli viditelnost interferenčních obrazců, která je dána vztahem:

$$v = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1.30.)$$

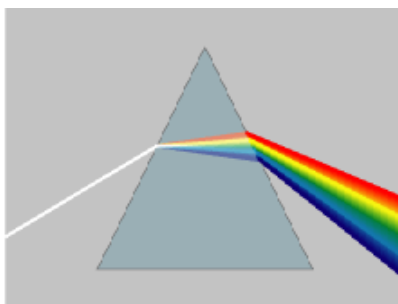
kde I_{\max} je maximální intenzita interferenčních proužků a I_{\min} je minimální intenzita. Při **koherentním záření** je vizibilita rovna jedné ($v=1$), $I_{\max}=1$ a $I_{\min}=0$. Při **nekoherentním záření** je vizibilita rovna nule ($v=0$) a $I_{\max}=I_{\min}$. Jestliže je $0 < v < 1$, pak záření nazýváme **částečně koherentním**. [5]

1.5.4. Disperze (Rozklad)

Jevy, které vznikají, v důsledku závislosti indexu lomu na vlnové délce se nazývají disperze neboli rozklad světla. Bílé světlo se neláme na rozhraní dvou optických prostředí s jinými indexy lomu stejně, ale rozkládá se ve spektrum. [5]

V přírodě pozorujeme disperzi např.: při vzniku duhy.

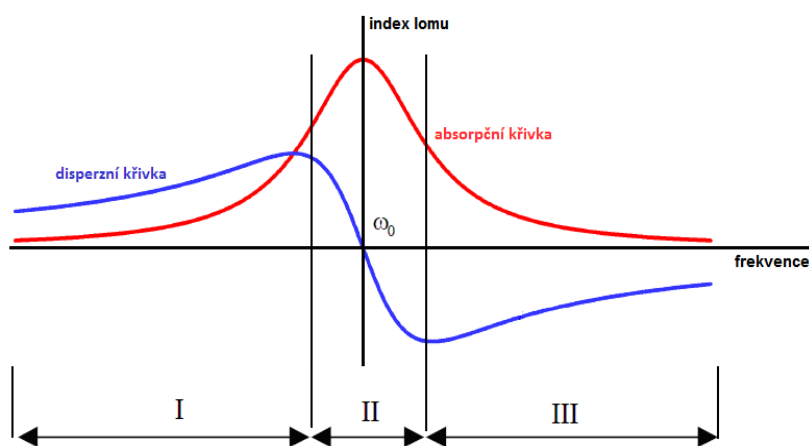
Budeme-li rozkládat světlo pomocí lomu na hranolu (Obr. 9), a to tak, že svazek bílého světla vymežeme štěrbinou a necháme dopadnout na hranol, pak se nám na stínítku postaveném za hranolem objeví elektromagnetické spektrum. Červená barva se bude v tomto případě od původního směru odchylovat nejméně a fialová nejvíce. [2]



Obr. 9: Rozklad světla hranolem (Převzato z [21])

Dělení disperze:

- **Anomální disperze** (oblast II na obr. 10) vzniká v prostředích, kde index lomu prostředí klesá s rostoucí frekvencí. Je zde vysoká absorpce v celé viditelné oblasti spektra. Index lomu má anomální průběh, frekvence ω je přibližně rovna rezonanční frekvence ω_0 ($\omega \approx \omega_0$). Jde o rezonanční oblast.



Obr. 10: Absorpční a disperzní křivka (Převzato z [9])

- **Normální disperze** (oblast I a III na obr. 10) vzniká v prostředích, kde index lomu prostředí roste s rostoucí frekvencí. V těchto oblastech není téměř žádná absorpce. V oblasti I

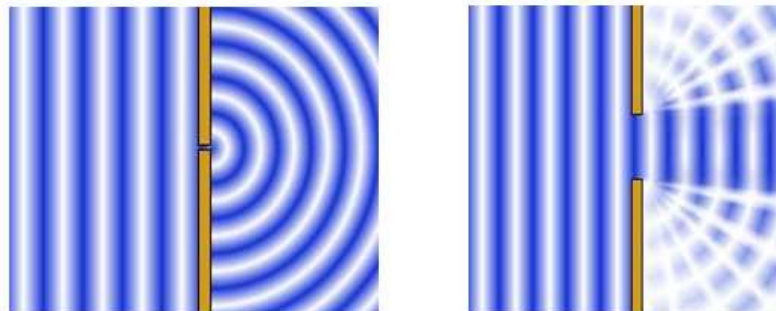
je index lomu větší než 1 ($n > 1$), frekvence ω je mnohonásobně menší než rezonanční frekvence ω_0 ($\omega \ll \omega_0$), vhodná pro většinu optických průhledných materiálů. Oblast III je u běžných látek mimo viditelnou oblast, týká se spíše rentgenového záření.

Charakteristika disperze prostředí:

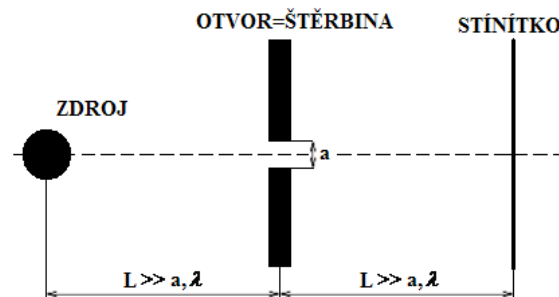
$$\frac{\delta n}{\delta \lambda} > 0 \dots \text{normální disperze}, \quad \frac{\delta n}{\delta \lambda} < 0 \dots \text{anomální disperze}, \quad \frac{\delta n}{\delta \lambda} = 0 \dots \text{nedisperzní prostředí}$$

1.5.5. Difrakce (Ohyb)

Difrakcí nazýváme jevy, které vznikají při průchodu vlnění otvorem nebo kolem překážky způsobující narušení vlnění. Pokud jsou rozměry otvoru resp. překážky příliš velké vzhledem k vlnové délce, je difrakce uplatňována velmi málo. Má-li však otvor resp. překážka rozměry srovnatelné s vlnovou délkou záření, pak toto záření proniká i za okraje překážky do tzv. geometrického stínu a vzniká tak ohybový jev (Obr. 11 a 12). [5]



Obr. 11, 12: Difrakce rovinné vlny na štěrbině a na štěrbině o velikosti srovnatelné s vlnovou délkou záření (Převzato z [22])



Obr. 13: Fraunhoferův ohyb

Difrakci dělíme na **Fresnelův ohyb**, který nastává tehdy, je-li čelo vlnoplochy kulové - tento ohyb nalezneme v dostatečné blízkosti bodového zdroje a na **Fraunhoferův ohyb** (Obr. 13), který nastává tehdy, je-li čelo vlnoplochy rovinná - pozorujeme ve větší vzdálenosti od bodového zdroje, kdy vzdálenost zdroje od otvoru L a vzdálenost od otvoru po stínítko L' , na kterém difrakci pozorujeme je mnohonásobně větší než velikost otvoru a a vlnové délky λ .

Řadu štěrbin, na kterých se projevuje difrakce, je možné považovat za **difrakční optickou mřížku**. 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). Difrakční mřížka může být transmisní i reflexní. Pokud na optickou mřížku dopadne rovnoběžný světelný svazek, můžeme každou štěrbinu optické mřížky považovat za zdroj elementárního vlnění. [8]

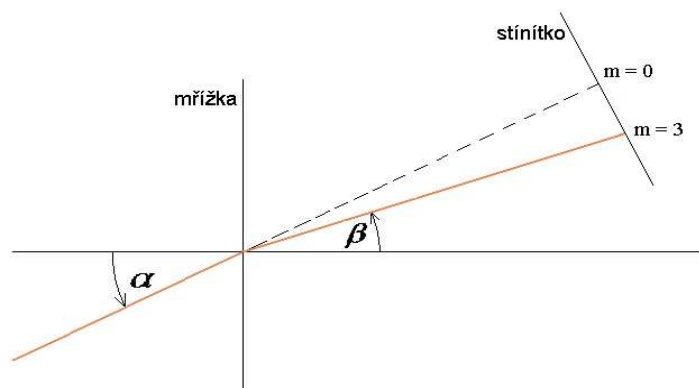
Jestliže necháme bílé světlo dopadat na optickou mřížku a budeme ho rozkládat pomocí difrakce (ohybu), pak se nám na stínítku postaveném za mřížkou objeví stejně jako v případě rozkladu světla hranolem spektrum barev. Po rozkladu světla optickou mřížkou se od původního směru odchyluje nejméně barva fialová zatím co barva červená nejvíce. To znamená, že je tomu právě naopak jako u normálního rozkladu světla získaného pomocí lomu na hranolu. [5]

Mřížková rovnice je dána vztahem:

$$d \cdot (\sin \alpha + \sin \beta) = m \cdot \lambda, \quad (1.31.)$$

kde d je mřížková konstanta (perioda mřížky), α je úhel pod kterým záření vstupuje do mřížky, β je úhel pod kterým záření vystupuje z mřížky tzv. úhel difrakce, m je difrakční řád ($0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) a λ je vlnová délka použitého záření. Mřížková rovnice popisuje, o jaký úhel bude odkloněno záření dané vlnové délky po průchodu difrakční mřížkou. [8]

Difrakční mřížka tvoří základ spektrometrů PerkinElmer použitých v diplomové práci.



Obr. 14: Optická mřížka (Převzato z [33])

1.5.6. Polarizace

Všechny zdroje světla kromě laseru, maseru atd. nám dávají světlo nepolarizované, což znamená, že světelné vlny kmitají ve všech možných směrech. Vybereme – li pouze kmity určitého směru, bude mít vlnění v různých směrech kolmých ke směru šíření různé vlastnosti a tak půjde o světlo polarizované. [6]

Polarizace je možné dosáhnout různými způsoby: odrazem a lomem, dvojlomem, absorpcí.

Rovnice polarizační elipsy v rovině kolmé na směr šíření

$$\frac{E_x^2}{e_x^2} + \frac{E_y^2}{e_y^2} - \frac{2E_x E_y}{e_x e_y} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi \text{ a } \Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x, \quad (1.32.)$$

kde E_x a E_y jsou složky vektoru elektrické intenzity ve směru os x a y , e_x a e_y jsou amplitudy složek vektoru elektrické intenzity, $\Delta\varphi$ je rozdíl počátečních fází φ_x a φ_y . [8]

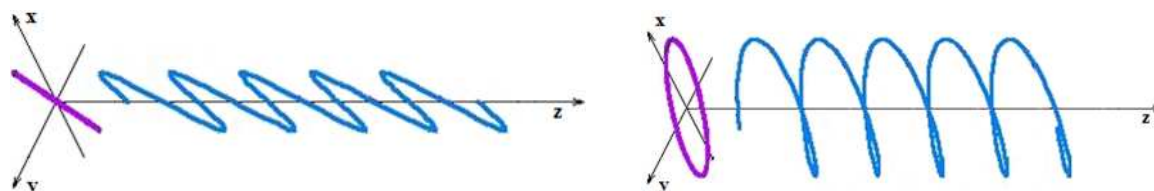
Typy polarizace:

Lineárně polarizovaná vlna (Obr. 15): příčná vlna, jejichž kmitání probíhá v určité rovině, všechny výchylky leží ve všech místech vlny ve stejné rovině. [8]

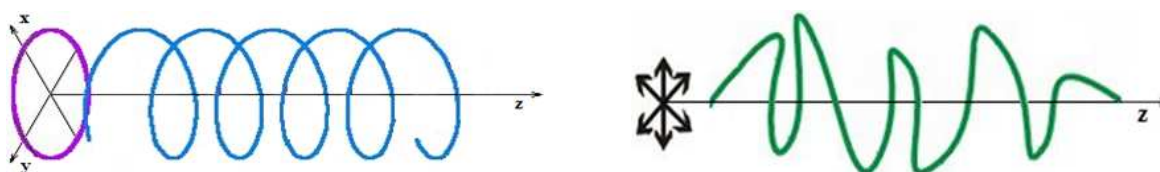
Elipticky polarizovaná vlna (Obr. 16): výchylky opisují elipsu v rovině kolmé k šíření vlny. [8]

Kruhově polarizovaná vlna (Obr. 17): jde o speciální případ elipticky polarizované vlny. Výchylky opisují kružnici. Je-li $\sin \Delta\varphi > 0$ jde o pravotočivou kruhovou polarizaci a při $\sin \Delta\varphi < 0$ o levotočivou. [8]

U nelineární vlny (Obr. 18) jsou sice všechny výchylky ve všech místech vlny kolmé ke směru šíření vlny, avšak neleží všechny v jedné rovině.



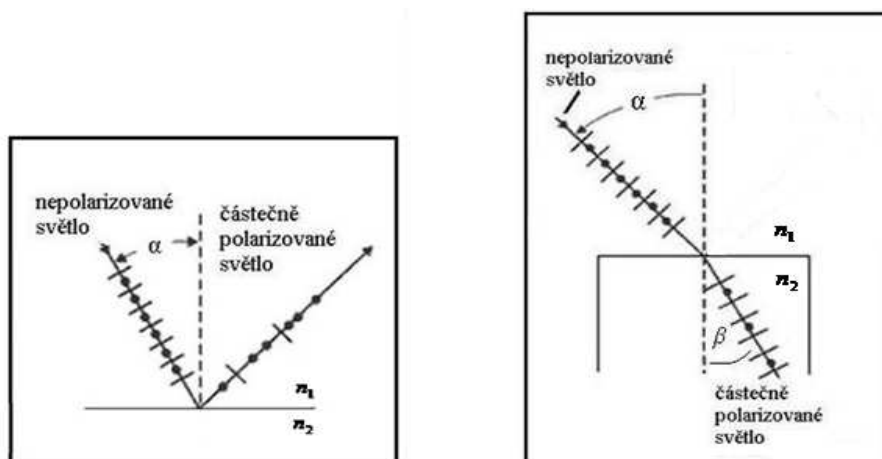
Obr. 15, 16: Lineární a eliptická polarizace světla (Převzato z [24])



Obr. 17, 18: Kruhová polarizace světla a nepolarizované světlo (Převzato z [24])

Polarizace světla odrazem a lomem

Necháme – li na optické rozhraní dopadnout nepolarizované světlo pod určitým úhlem α , dojde k rozdělení světelného záření na odražený (Obr. 19) a lomený (Obr. 20) paprsek a přitom každý bude částečně polarizovaný.

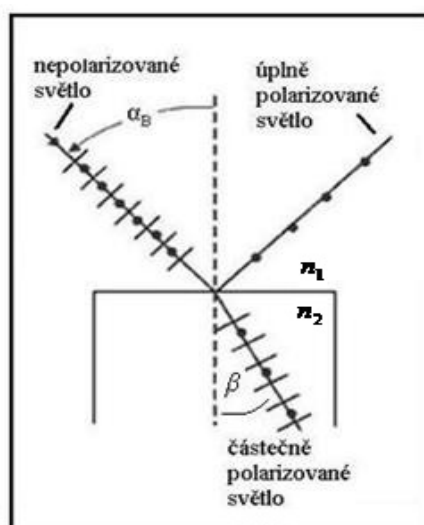


Obr. 19, 20: Částečná polarizace odrazem a lomem (Převzato z [25])

Chceme-li dosáhnout odrazem úplně polarizovaného světlo (Obr. 21), musíme na optické rozhraní nechat dopadnout nepolarizované záření pod tzv. **Brewsterovým úhlem** α_B , který je dán vztahem:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.33.)$$

kde n_1 je index lomu prvního prostředí a n_2 index lomu druhého prostředí. Je-li úhel dopadu roven Brewsterovu úhlu, jsou odražené a lomené paprsky navzájem kolmé. [1, 13]



Obr. 21: Úplná polarizace Brewsterovým úhlem (Převzato z [25])

Polarizace dvojlomem

Dvojlom nastává v krystalech s anizotropním prostředím, kde se světlo šíří v různých směrech, různou rychlostí. Při dopadu nepolarizovaného světla na tento krystal se paprsek rozdělí na dva a to na paprsek řádný a mimořádný. Oba paprsky jsou úplně lineárně polarizované v rovinách vzájemně kolmých, šíří se různými směry a různou rychlostí. [13, 6] Paprsek řádný se značí o a chová se jako paprsek v izotropním prostředí – při kolmém dopadu se neláme a šíří se všude stejnou rychlostí. Ve všech směrech má stejný index lomu. Paprsek mimořádný se značí e a i při kolmém dopadu se láme, v různých směrech se krystalem šíří různou rychlostí. Index lomu mimořádného paprsku se mění se směrem šíření světla. [12]

Druhy krystalů:

Jednoosý krystal má jedinou optickou osu a dochází v něm ke dvojlomu. V každém směru je jeden paprsek řádný (jeho rychlost je závislá na směru šíření) a jeden mimořádný, který má větší nebo menší rychlost jak paprsek řádný. Výjimkou je směr šíření paprsku rovnoběžně s optickou osou krystalu, kde k dvojlomu nedochází a můžeme tedy říct, že řádný a mimořádný paprsek se šíří stejnou rychlostí. V tomto směru se šíří záření nepolarizované. Ve směru kolmém na optickou osu je naopak největší rozdíl mezi rychlostí řádného a mimořádného paprsku a tím i mezi indexy lomu. [13]

Dvouosý krystal má dvě optické osy. Ve všech směrech nastává dvojlom a oba vzniklé paprsky se chovají jako mimořádné až na výjimku a to při rovnoběžném šíření paprsku s některou ze dvou optických os, kde jsou rychlosti obou paprsků stejné. [13]

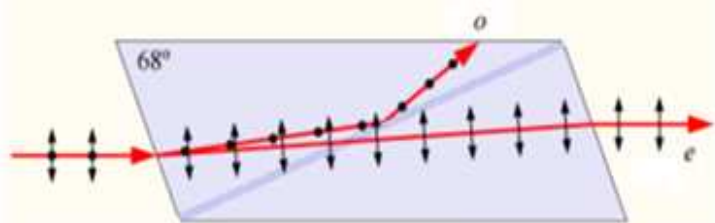
Z optických hranolů je možné vyrobit polarizační hranol.

Mezi nejčastěji používané polarizační hranoly patří např.: Nikolův hranol, Glanův-Thompsonův hranol, Wolastonův hranol atd.

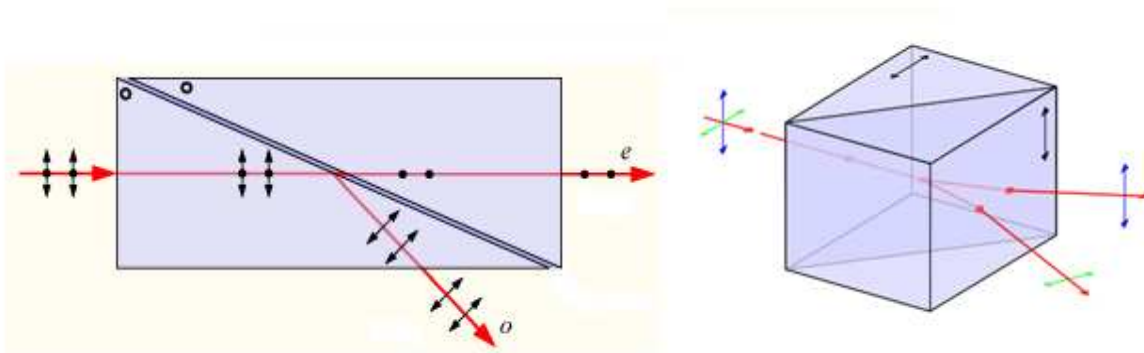
Nikolův hranol (Obr. 22) je zhotovený z krystalu dvojlomného islandského vápence, který je rozříznut a následně slepen kanadským balzámem. Z tohoto hranolu vychází pouze mimořádný paprsek jako úplně polarizované světlo, paprsek řádný je odražen a absorbován. [13, 14]

Glanův-Thompsonův polarizační hranol (Obr. 23) je také vyroben z islandského vápence, který je rozřezán úhlopříčně, rovnoběžně s optickou osou krystalu, která je kolmá k nákresně a opět slepen kanadským balzámem. Řádný paprsek je totálně odražen a vystupuje boční stranou z hranolu. Mimořádný paprsek prochází balzámem a v druhé půlce hranolu postupuje téměř v původním směru. Dostáváme lineárně polarizované světlo. [13, 15]

Wollastonův polarizační hranol (Obr. 24) je složen ze dvou pravouhlých hranolů se vzájemně kolmými osami také vyrobených z islandského vápence. V první části hranolu jdou oba hranoly stejným směrem a v druhé části hranolu se řádný paprsek změni v mimořádný a naopak a tím se paprsky rozestoupí. Při použití tohoto hranolu lze využít oba paprsky vzniklé dvojlomem, které jsou oba lineárně polarizované. [13]



Obr: 22: Polarizační Nikolův hranol (Převzato z [26])



Obr. 23, 24: Glanův-Thompsonův a Wollastonův polarizační hranol (Převzato z [27] a [28])

Polarizace absorpcí

Některé druhy látek se vyznačují tím, že pohlcují různým způsobem obě polarizační složky. Tyto materiály jsou vhodné pro výrobu polarizačních filtrů. [16]

1.6. Michelsonův interferometr

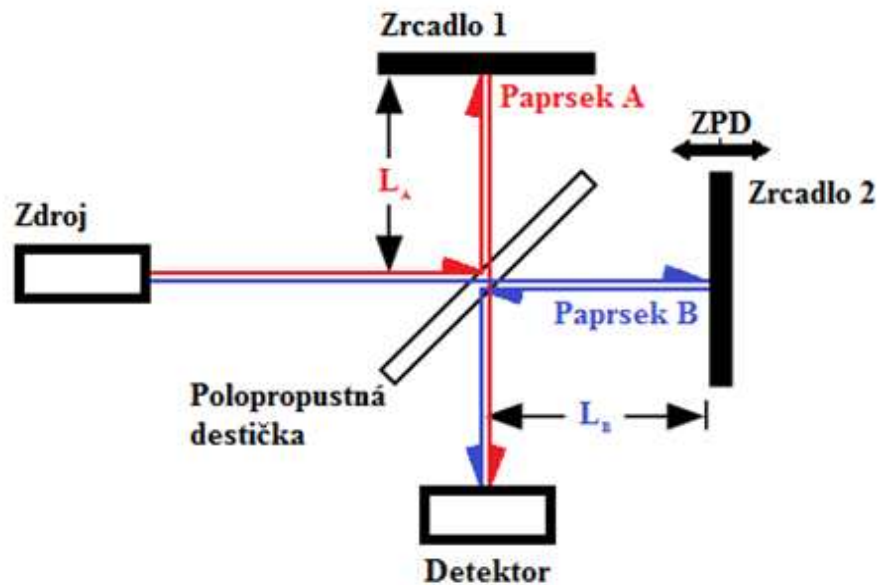
Michelsonův interferometr je přístroj pro měření interference. [8]

Jak můžeme vidět na obrázku (Obr: 25) Michelsonův interferometr je složen ze zdroje záření, polopropustného zrcadla, zrcadla 1 – pevně umístěného, zrcadla 2 - pohyblivého a detektoru.

Rozdělení paprsku probíhá na polopropustném zrcadle, které je přizpůsobeno pro každou příslušnou oblast spektra. [10,8]

Záření vycházející ze zdroje dopadá na polopropustné zrcadlo, která přesně polovinu záření odráží (paprsek A) a druhou polovinu záření propouští (paprsek B). Paprsek A dopadá

na pevné zrcadlo 1, kde je záření odraženo zpět na polopropustné zrcadlo, kterým záření projde. Paprsek B dopadá na pohyblivé zrcadlo 2 a odráží se zpět, kde je dále odražen polopropustným zrcadlem. Za polopropustným zrcadlem se obě části záření opět skládají, vzniká interference (Kapitola 1.7.3.) a záření dopadá na detektor. [10]



Obr: 25: Jednoduché schéma Michelsonova interferometru

Interference monochromatického záření

Pohyblivé zrcadlo se pohybuje směrem paprsku B k polopropustnému zrcadlu a zpět. Jelikož pohyblivé zrcadlo mění svou polohu, mění se dráhový rozdíl mezi paprskem A a B (změna polohy zrcátka) a periodicky se mění i dráhový rozdíl.

Bude-li vzdálenost pohyblivého zrcadla od polopropustného zrcadla stejná jako vzdálenost pevného zrcadla od polopropustného zrcadla, tzn. $L_A = L_B$, dojde ke skládání vlny – **konstruktivní interference** (tuto polohu nazýváme nulový dráhový rozdíl neboli ZPD) pro záření všech vlnových délek. Posune-li se pohyblivé zrcadlo o čtvrtinu vlnové délky procházející vlny (v jednom i druhém směru), dojde ke zmenšení nebo zvětšení dráhy paprsku B a vlny se zcela vyruší – **destruktivní interference**.

Jak se pohybuje pohyblivé zrcadlo od a k propustnému zrcadlu vytváří výstupní vlnu s proměnnou amplitudou resp. intenzitou. [10]

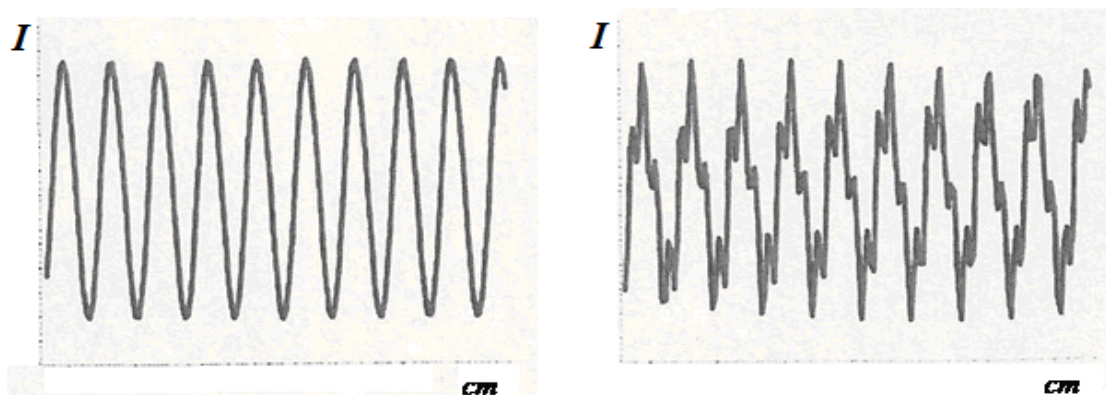
Interference polychromatického záření

Reálný přirozený zdroj záření nebývá monochromatický (až na laser, který být monochromatický může), ale produkuje záření o různé intenzitě v závislosti na vlnové délce

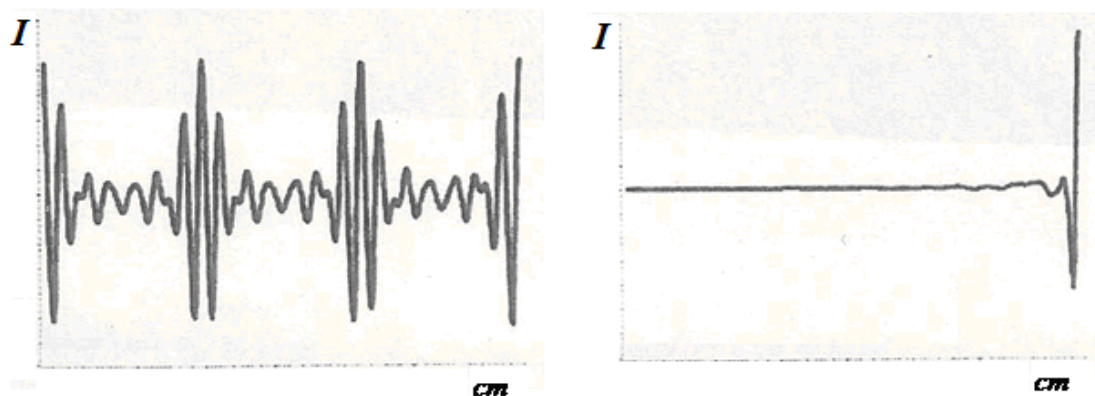
(spektrum). Všechny vlny se skládají konstruktivně v bodě ZPD bez ohledu na svou vlnovou délku. V jakékoliv jiné poloze některé vlnové délky interferují konstruktivně a jiné destruktivně.

Při interference různého počtu vln v poloze ZPD všechny vlny dohromady vytváří maximum signálu. Se zvětšující se vzdáleností od ZPD se pak skládají více a více destruktivně, tzv. amplituda vlnění se podstatně snižuje (Obr. 26, 27, 28, 29).

Závislost výstupní intenzity na optickém dráhovém rozdílu (dvojnásobku vzdálenosti posunutí zrcátka 2 z nulové polohy) se nazývá **interferogram**, který je zaznamenáván detektorem. [10]



Obr. 26, 27: Interference jedné a dvou vln – závislost intenzity na poloze zrcadla 2 (Převzato z [10])



Obr. 28, 29: Interference osmi a několika vln (Převzato z [10])

1.7. Fourierova transformace

Fourierova transformace převádí interferogram $F(\nu_x)$ na spektrum $f(\tilde{\nu})$

$$f(\tilde{\nu}) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\nu_x) \cdot e^{-2\pi i \nu_x \tilde{\nu}} d\nu_x \quad (1.34.)$$

a inverzní Fourierova transformace naopak

$$F(\nu_x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tilde{\nu}) \cdot e^{2\pi i \nu_x \tilde{\nu}} d\tilde{\nu} \quad (1.35.)$$

Jde o převod intenzity signálu závislé na optickém dráhovém rozdílu (dvojnásobku vzdálenost zrcátek Michelsonova interferometru) $\nu_x [cm]$ na spektrum $\tilde{\nu} [cm^{-1}]$.

Fourierova transformace umožňuje analyzovat spektrum signálu.

Vypočtená spektra uvádíme ve vlnočtech $[cm^{-1}]$, tj. veličině odpovídající převrácené hodnotě vlnové délky:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.36.)$$

2. Tenké vrstvy

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.

Tenkou vrstvou nanášíme na optické součásti, abychom docílili lepších spektrálních vlastností např.: větší propustnosti optické součásti, odrazivosti povrchu součásti. Také tenké vrstvy využíváme při výběru dané vlnové délky z celého elektromagnetického spektra.

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. [1,4]

2.1. Druhy tenkých vrstev

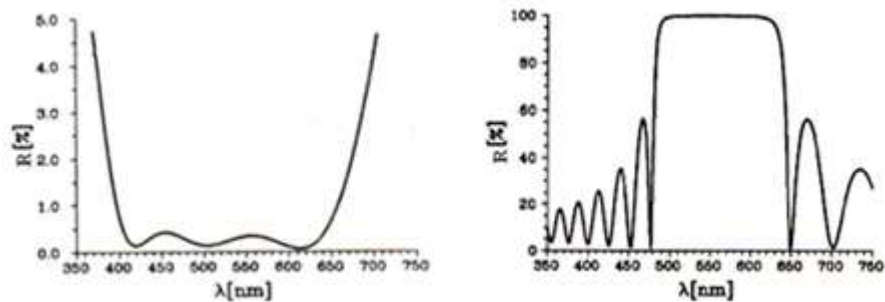
Antireflexní (protiodrazné - Obr. 30) vrstvy slouží ke snížení nepříznivých jevů, které nastávají při průchodu světla dvěma optickými rozhraními, kdy nepřechází všechna světelná energie do druhého prostředí, ale určitá část se odráží zpět do prostředí prvního. Dochází tedy ke ztrátám světla. Ztráty světla způsobené odrazem a rozptylem silně rostou s počtem ploch optické soustavy. [1,7]

Vysoce reflexní vrstvy (Obr. 31) se používají k výrobě zrcadel s vysokou reflexí. [1,7]

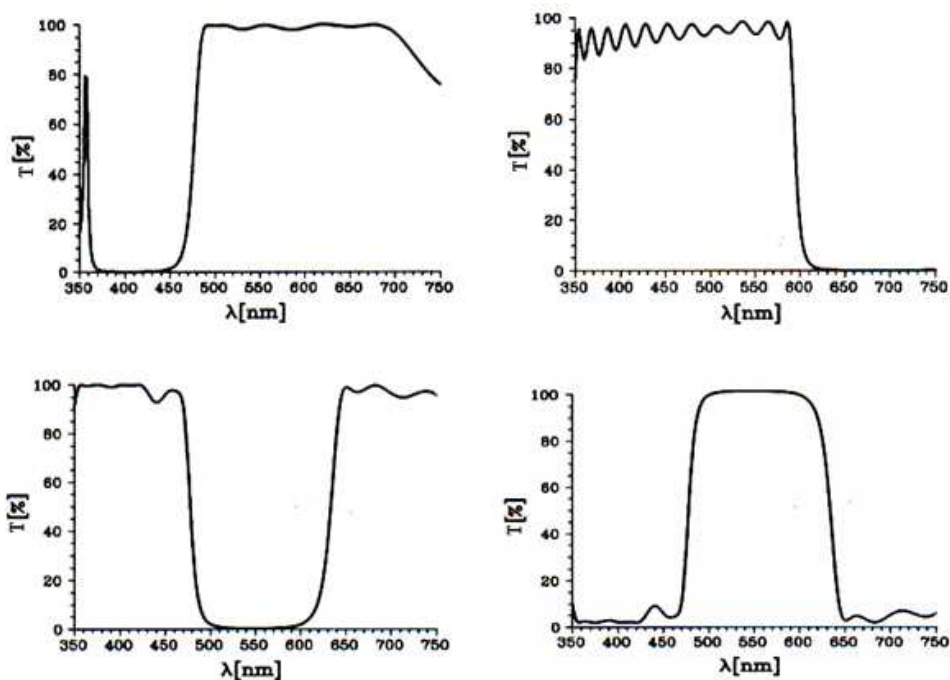
Filtry s použitím horní (Obr. 32) a dolní (Obr. 33) propusti se používají jako **barevné filtry**. Kombinací obou propustí lze sestavit filtr, který propouští pouze určené pásmo vlnových délek, tzv. pásmová propust' (Obr. 34), resp. jejich průchodu zabraňuje – tzv. pásmová zádrž (Obr. 35). Účelem těchto vrstev je dosáhnout vyčlenění úzké části spektra. Používají se třeba v barvodělicích soustavách (např.: u dataprojektorů). [1,7,4]

Úzkopásmové filtry (Obr. 36) jsou takové filtry, které propouští pouze určitou část spektra. Šířku propouštěného spektra lze zvolit. [1,7,4]

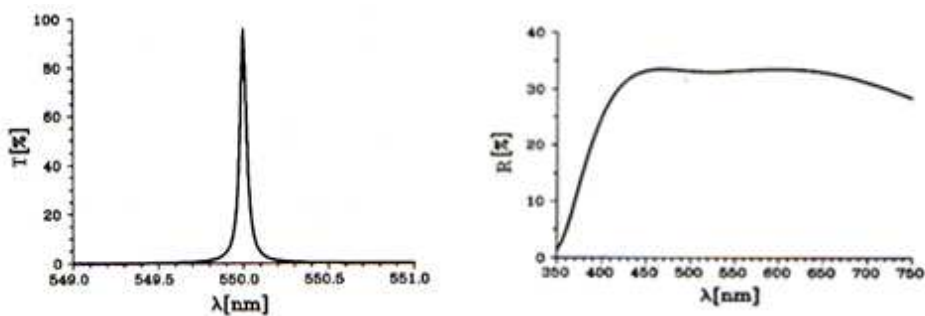
Optické děliče (Obr. 37) jsou prvky, u kterých využíváme jak reflexi, tak transmisi (děliče 1:1 - 50% světla odráží a 50% propouští). Existují také polarizační děliče, které jednu složku polarizace potlačí. Na tomto principu fungují polarizátory. [1,7,4]



Obr. 30, 31: Reflexe antireflexních vrstev a vysoce reflexní vrstva (Převzato z [7])



Obr. 32, 33, 34, 35: Transmise horní propust, dolní propust, pásmové zadržky (prakticky se dá říci, že i zrcadlo pro oblast 550nm), pásmové propusti (Převzato z [7])



Obr. 36, 37 : Transmise úzkopásmového filtru a reflexe šedého filtru tvořeného dielektrickými vrstvami (Převzato z [7])

3. Spektroskopické měření použité v diplomové práci

Spektrometrie se zabývá vznikem a vlastnostmi spekter získaných interakcí elektromagnetického záření s látkou.

Spektra látek je možné měřit pomocí vědeckého přístroje nazývaného **spektrometr**. Princip spektrometru spočívá v měření intenzit měřeného záření v závislosti na vlnové délce. Spektrometr využíváme ke kontrole veličin popisujících spektrální vlastnosti optických materiálů (odrazivost a propustnost) nebo k zjištění spektrálních vlastností zdroje nebo detektoru.

Spektrometry používané pro měření v diplomové práci jsou dvoucestný spektrometr pro měření reflexe a transmise v UV, VIS a NIR oblasti (od firmy PerkinElmer - Kapitola 3. 2.) a jednocestný spektrometr s Michelsonovým interferometrem měřící v IR oblasti, který byl pro účely Meopty-optiky, s.r.o. doplněn o optické součásti pro měření VIS (od firmy Nicolet - Kapitola 3.3.).

Jako další způsob používaný ke kontrole veličin popisujících spektrální vlastnosti optických tenkých vrstev můžeme použít měření na optické lavici s laserovým zdrojem (Kapitola 3.4.).

3.1. Spektrometr

Jak už bylo řečeno spektrometr je přístroj pro měření propustnosti či odrazivosti materiálů, nebo k měření spektrálních vlastností zdrojů a detektorů. Spektrometr je složen ve většině případů ze:

Zdroje světla, který volíme takový, abychom dostali spojitě spektrum a aby byl vhodný pro danou oblast, v které chceme měřit.

Monochromátoru - k rozkladu světla se používají monochromátory hranolové nebo mřížkové. Pro měření do diplomové práce jsou použity spektrometry PerkinElmer s mřížkovými monochromátory (Kapitoly 1.5.4. a 1.5.5.). U spektrometru Nicolet je použit Michelsonův interferometr.

Pracovní oblastí je myšlena ta část spektrometru, kde při měření ukládáme měřený vzorek.

Detektoru, který zaznamenává intenzitu záření prošlého měřenou součástkou buď přímo, nebo přes integrační kouli spojenou s detektorem. Integrační čas je doba, po kterou

detektor snímá dopadající záření na dané vlnové délce.

Vyhodnocovací jednotky, tzn. počítače nebo notebooku s příslušným speciálním programem.

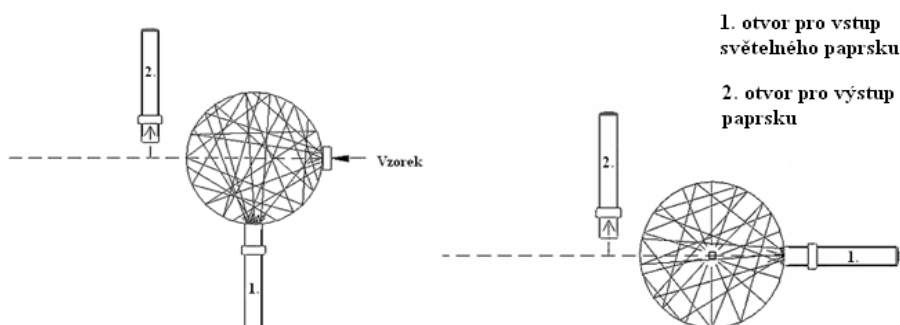
Sestavu spektrometru je možné podle potřeby ještě doplnit např. polarizátorem, otočným stolcem, který slouží ke správnému umístění měřeného kusu výškově, stranově a pod úhlem nebo různými optickými součástmi jako jsou čočky, zrcadla atd.

Měření s integrační koulí a detektorem

Integrační koule (Obr. 38 a 39) 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).

- **Výhody měření přímo s detektorem:** Detektory mají vyšší citlivost než integrační koule, protože v kouli se světlo rozptýlí a na detektor dopadá jen část světla, která do koule vstoupila. Docílíme většího poměru signálu a šumu. Proto měření přímo s detektorem umožňuje měření nízkých hodnot propustnosti.

- **Nevýhody měření přímo s detektorem:** Při měření detektorem nedostáváme vždy stejnou hodnotu, protože na středu detektoru nenaměříme stejnou hodnotu jako na jeho krajích, detektor je nehomogenní. Integrační koule je pro nás také výhodná při měření kusů, které mění průměr svazku (např. čočky...) ten je pak jiný při kalibraci a samotném měření. Při použití integrační koule používáme optickou lavici, na které lze zvolit měřicí metodu z většího výběru než v základní sestavě.



Obr. 38, 39: Integrační koule (Převzato z [29])

Rozdíl mezi měřením v UV a VIS oblasti:

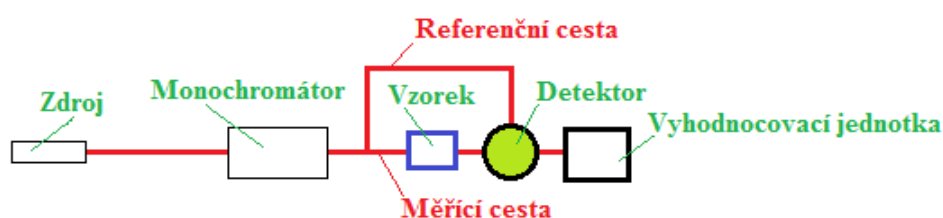
Pro ultrafialovou oblast musíme zvolit deuteriovou lampu jako zdroj záření a ne všechny optické prvky použité v dané měřicí sestavě propouštějí světlo v UV oblasti. Musíme tedy volit optické prvky (čochky jako kolimátory, optická vlákna atd.) z materiálu vhodného pro UV oblast (např.: Lithosil, Suprasil, 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.

3.2. Spektrometr PerkinElmer

Jde o dvoucestný spektrometr (Obr. 40). Jeden paprsek je srovnávací (referenční) a druhému se do cesty vkládá měřený vzorek. Základem tohoto spektrometru je disperzní mřížka (Kapitola 1.5.5.). Naměřené výsledky dostáváme v procentech v závislosti na vlnové délce. Měření na spektrometru PerkinElmer probíhá až několik minut. Měřený rozsah vlnových délek je měřen po nastaveném kroku např.: po 1,2 nebo 5nm a na každé měřené vlnové délce probíhá měření po dobu integračního času, který je také před měřením nastaven.

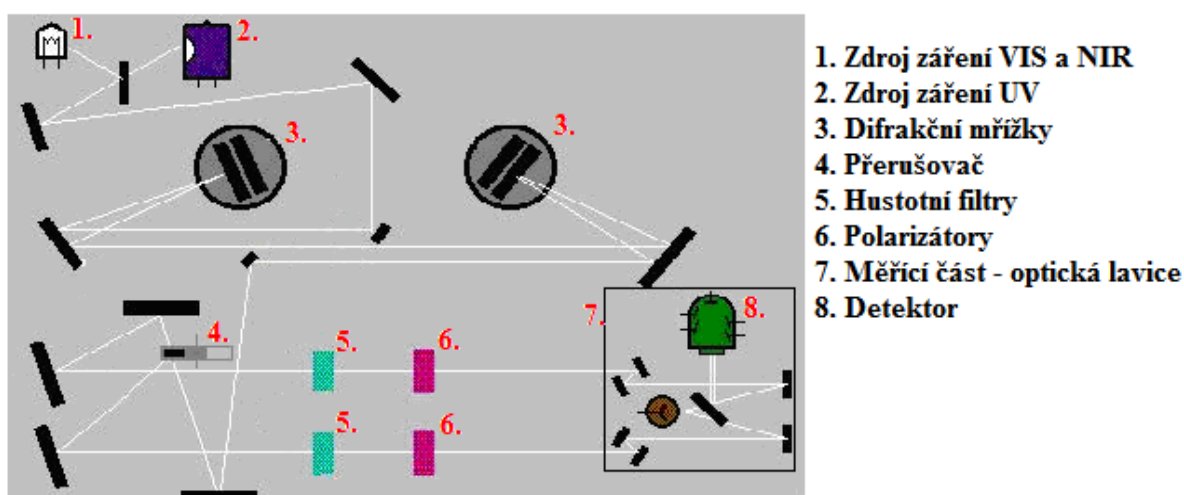
Spektrální parametry jsou v diplomové práci měřeny na spektrometrech PerkinElmer $\lambda 900$ a $\lambda 950$ (novější verze).



Obr. 40: Jednoduché schéma dvoucestného spektrometru

Spektrometr PerkinElmer se skládá (Obr. 41) ze **zdrojů záření** jde o dvě lampy (jedné wolframové pro vytvoření zdroje záření ve VIS a NIR oblasti a druhé deuteriové pro vytvoření UV oblasti), z **mřížkových monochromátorů**, které jsou dva pro VIS a IČ oblast a dva pro UV oblast (jsou po dvou kvůli kvalitnějšímu výběru vlnové délky neboli lepší spektrální citlivosti), ze **štěrbín** sloužících k úpravě velikost svazku, co se týče rozlohy. Jedna štěrbin je ve spektrometru umístěna pro výškovou úpravu svazku a druhá pro stranovou úpravu svazku a zároveň úpravu spektrální šířky (zlepšení monochromaticnosti světla). Dále se spektrometr skládá z **přerušovače**, který slouží k dělení svazku na odražený a prošlý a tím vznikají dvě

větve (referenční a měřicí), z **hustotních filtrů** (zeslabovače), které slouží k tomu, aby bylo možné nastavit, jaké množství světla bude vstupovat do spektrometru jak v referenční tak v měřicí větvi (100%, 10% nebo 1% záření). Hustotních filtrů využíváme například při měření nízkých propustností ($T = 1\%$), abychom dosáhli co nejlepší přesnosti - do integrační koule vstupují z referenční i měřicí větve světelné svazky s přibližně stejnými výkony. Proto hustotní filtr v referenční větvi nastavíme tak, aby v obou větvích mělo světlo stejný výkon. Spektrometr dále obsahuje **polarizátory**. U spektrometru PerkinElmer je využit Glanův-Thompsonův polarizační hranol umístěný v motorizovaných objímkách. Polarizátory jsou součástí spektrometru a jejich otáčení je řízeno softwarem. Jsou odnímatelné a to nám umožňuje měřit s nimi i bez nich (Kapitola 1.7.6.2.). **Měřicí část** u spektrometru PerkinElmer je možno měnit a to podle typu měření. Můžeme měřit na optické lavici, která je součástí spektrometru, bez optické lavice se světlem dopadajícím přímo na detektor (tzv. základní sestava spektrometru) nebo máme možnost měřit s přípravkem URA.



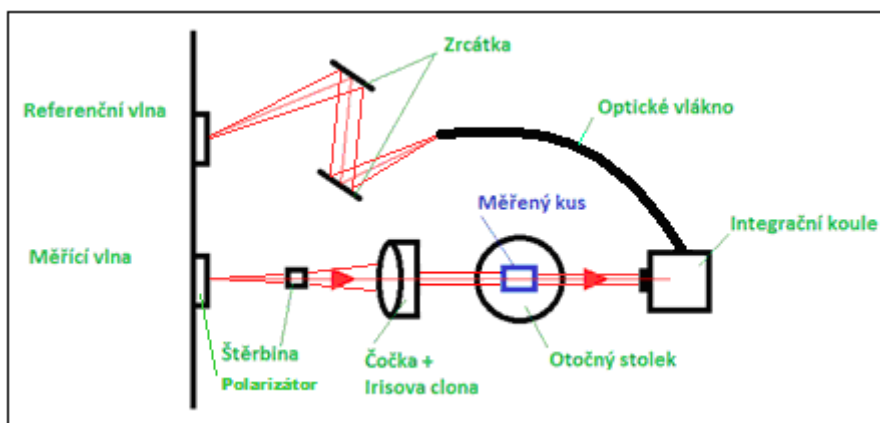
Obr. 41: Schéma spektrometru PerkinElmer

Výhodou měření na optické lavici je možnost sestavit pomocí různých optických prvků (čoček, zrcátek, světlovodu, atd.) optickou sestavu vhodnou právě pro daný měřený kus. V práci jsem použila sestavu s kolimovaným svazkem vytvořeným pomocí štěrbinu a kolimující spojné čočky. Optická lavice je vyměnitelnou součástí spektrometru. Výhodou optické lavice je možnost manipulace s integrační koulí.

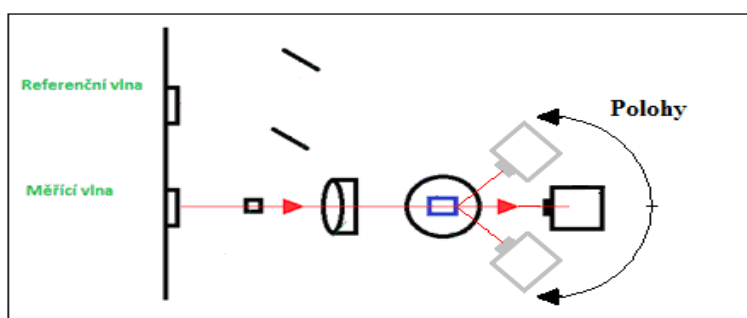
Sestava na optické lavici (Obr. 42) pro měřicí větve je složena ze **štěrbiny** (obvykle kruhový otvor o průměru 2mm), kterou umístíme do nejužšího místa svazku, kde je největší množství energie (štěrbinu pak považujeme za bodový zdroj), **kolimující spojné čočky**, kterou

umístíme tak aby v jejím předmětovém ohnisku byla štěrbinu (dostáváme přibližně kolimovaný svazek), **irisové clony** (umístěna na čočce), která se využívá pro změnu velikosti svazku většinou podle velikosti měřeného kusu, **otočného stolku** pro mechanické výškové a stranové nastavení (aby svazek procházel středem kusu) a nastavení úhlu dopadu světla, **integrační koule** (Kapitola 3.1.), **detektoru** a **vyhodnocovací jednotky** (počítač s vhodným programem pro úpravu naměřených dat).

Referenční (srovnávací) větev je složena ze **dvou zrcátek**, kde jedno ze zrcátek je sférické pro navedení svazku do vlákna (místo zrcátek bychom také mohli použít spojnou čočku), **optického vlnovodu**, které umožňuje manipulaci s koulí, a stejné **integrační koule** jako v měřicí větvi (Kapitola 3.1.2.).



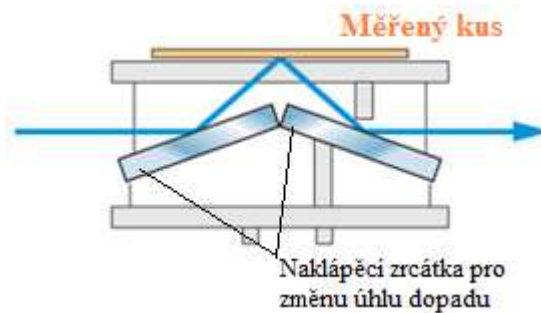
Obr. 42: Ukázka sestavy na optické lavici uvnitř spektrometru



Obr. 43: Manipulace s integrační koulí na optické lavici

Na optické lavici můžeme měřit i za pomoci **RC přípravku**, jde o měření relativní odrazivosti - *měření odrazivosti vůči referenčnímu vzorku. RC přípravek využívá referenčního vzorku z kalibračního skla pro danou spektrální oblast. Pro viditelnou oblast je použito na výrobu tohoto vzorku sklo BK7, které má přibližně odrazivost 4,2% , mírně se liší v závislosti na vlnové délce vlivem disperze (např. pro vlnovou délku $\lambda = 380nm$ je odrazivost

vzorku 4,4% a pro $\lambda = 780\text{nm}$ je odrazivost vzorku 4,14%). Při tomto měření kalibrujeme záření na tento kalibrační vzorek, a pak hodnota 100% odrazivosti odpovídá zmíněným 4,2% *. Software vypočítá automaticky skutečnou hodnotu. RC přípravek lze použít při kolmém dopadu, který je při měření v diplomové práci 6° , jelikož menší úhel nelze nastavit kvůli naklápění zrcátek.

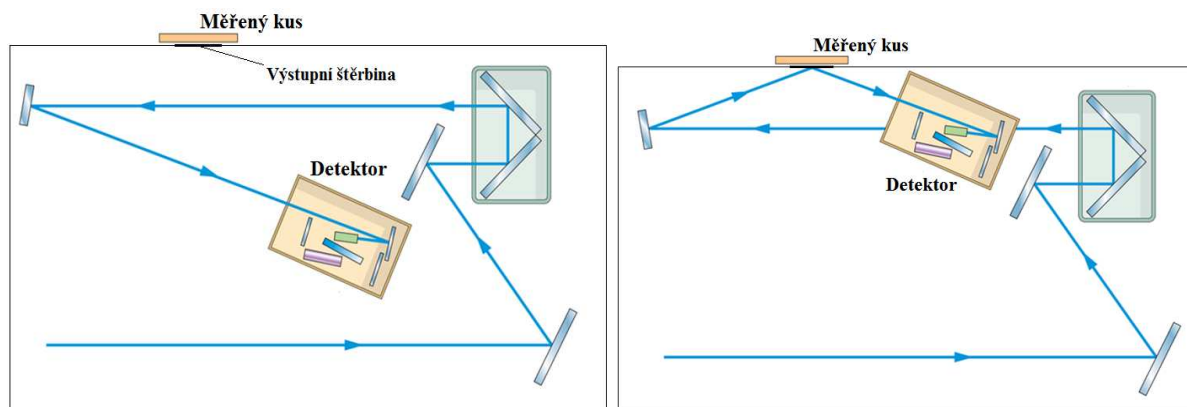


Obr. 44: Schéma RC přípravku (Převzato z [11])

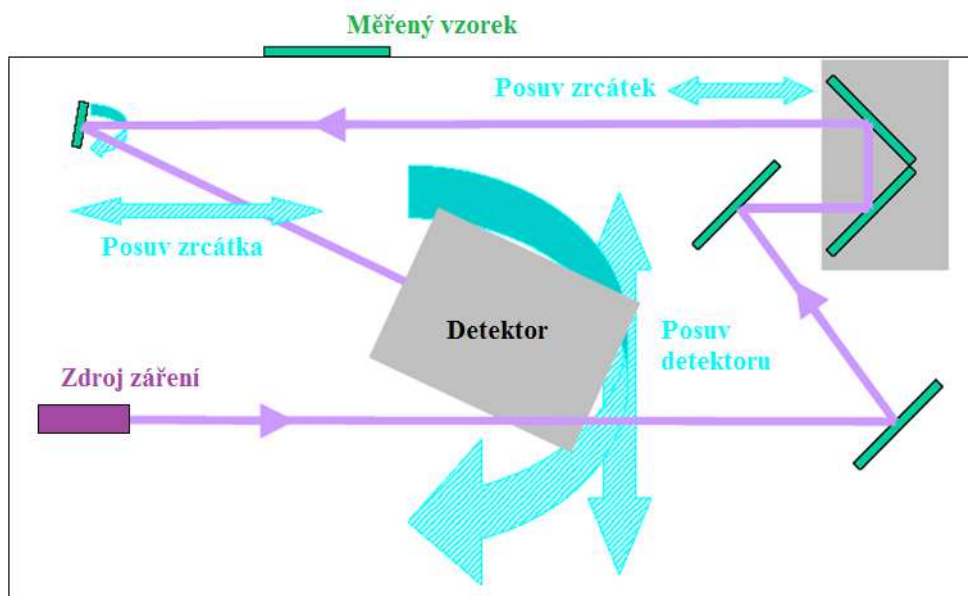
URA (Universal Reflectance Accessory - Obr. 45, 46) je univerzální přípravek na měření odrazivosti kusů s rovinnou plochou, s úhlem dopadu záření na měřený kus od 8° do 68° a spektrálním rozsahem záření od 190 do 3100nm. Menší úhel dopadu než je 8° nelze na přípravku URA nastavit kvůli naklápění zrcátek. Tímto přípravkem můžeme ve spektrometru nahradit optickou lavici. V diplomové práci využívám přípravku URA u spektrometrů Perkin Elmer $\lambda 950$.

URA obsahuje dva detektory. Jeden detektor pro IČ a VIS oblast a druhý detektor pro UV oblast. Dále obsahuje soustavu motorizovaných zrcátek usměrňujících svazek do štěrbinu na detektor. Zrcátka jsou ovládána softwarem.

Mezi hlavní výhody přípravku URA je to, že výstupní štěrbina, kterou prochází paprsek na měřený kus je umístěna na vrchu přípravku, což umožňuje měření zrcadel velkých rozměrů.



Obr. 45 a 46: Schéma intenzitní kalibrace přípravku URA a měření přípravkem URA (Převzato z [11])



Obr. 47: Schéma posuvů zrcátek a detektorů při změně dopadového úhlu v přípravku URA
(Převzato z [11])

Postup práce při měření na spektrometru PerkinElmer je následující: jestliže měříme na optické lavici, musíme **sestavit** sestavu pro měření daného kusu, která byla popsána výše (Obr. 49). Při měření s přípravkem URA tento krok odpadá. Dále si **nastavíme požadované parametry** v programu např.: rozsah vlnové délky, krok po kterém bude vlnová délka měřena (např. 5 nm), vybereme zdroje záření pro měření (UV nebo VIS+IČ), nastavení hustotních filtrů (100%, 10% nebo 1%) jak u měřené větve tak u srovnávací, popř. vlnové délky u které budou přepnuty lampy, vlnové délky u které budou přepnuty monochromátory, polarizační úhel (0° , 90° nebo střední polarizace 45°), velikost štěrbin, počet měření, při měření přípravkem URA úhel dopadu záření. Spustíme **intenzitní kalibraci** spektrometru, při které dojde k přiřazení hodnoty $T = 100\%$ výkonu měřeného svazku vytvořeného v dané optické soustavě bez měřeného kusu (spektrální kalibrace je provedena automaticky) Při měření nastavíme kus tak aby svazek procházel středem kusu a případně nastavíme i potřebný úhel dopadu světla. Integrační kouli nastavíme tak, aby do ní vstupoval paprsek procházející optickou součástí. Při měření na přípravku URA tento krok také odpadá. Po doměření vyhodnotíme naměřené hodnoty, zjistíme, zda odpovídají podmínkám uvedeným na technickém výkrese a popřípadě vytvoříme protokol o měření.

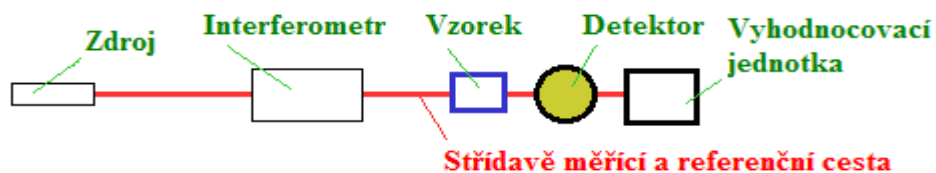
3.3. Spektrometr Nicolet

Jde o infračervený jednocestný spektrometr (Obr. 47) založený na Michelsonově interferometru (Kapitola 1.6.) využívající Fourierovy transformace (Kapitola 1.7.) Pro účely Meopty-optiky, s.r.o. byl doplněn o optické součásti pro měření ve viditelné oblasti.

U spektrometru PerkinElmer dostáváme rovnou měřené spektrum, ale u Nicoletu dostáváme jako výsledek interferogram, který následně na spektrum převádíme pomocí zmíněné Fourierovy transformace.

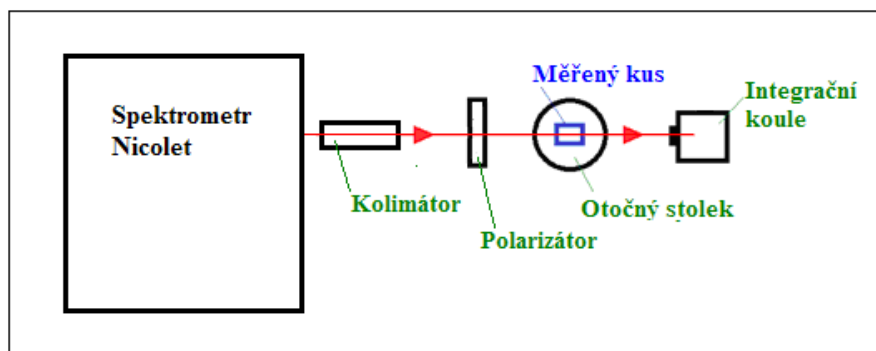
Měření i velkého spektrálního rozsahu na spektrometru Nicolet trvá jen několik sekund, je tedy rychlejší než měření na spektrometru PerkinElmer.

Pomocí vyměnitelných optických komponentů (zdroje záření, lasery, detektory, zrcadla atd.) můžeme spektrometr Nicolet využít ve vzdálené, střední, blízké infračervené oblasti a pro jejich kombinace. Spektrometr lze doplnit o řadu vzorkovacích nástavců. [11]

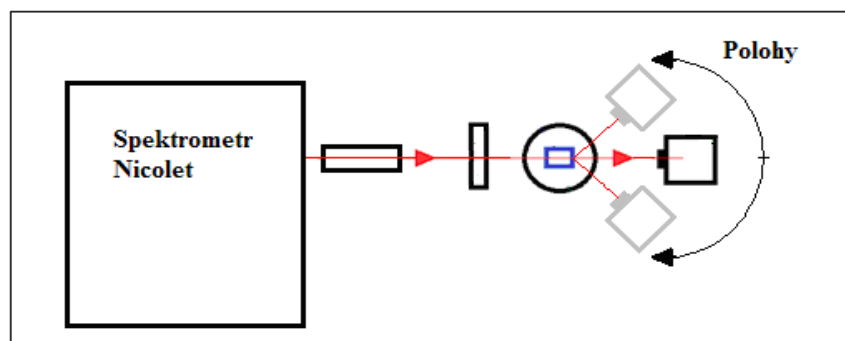


Obr. 48: Jednoduché schéma jednocestného spektrometru

Komponenty na optické lavici spektrometru Nicolet jako jsou zdroje záření, detektory, laser, zrcadla atd. jsou předjustovány výrobcem a v případě potřeby mohou být vyměněny přímo uživatelem bez účasti servisního technika. Měřicí prostor uvnitř spektrometru usnadňuje použití nejrůznějších měřících metod a lze využít možnosti vyvedení paprsku mimo spektrometr na optický stůl pomocí zrcátka uvnitř spektrometru pro složitější měření.



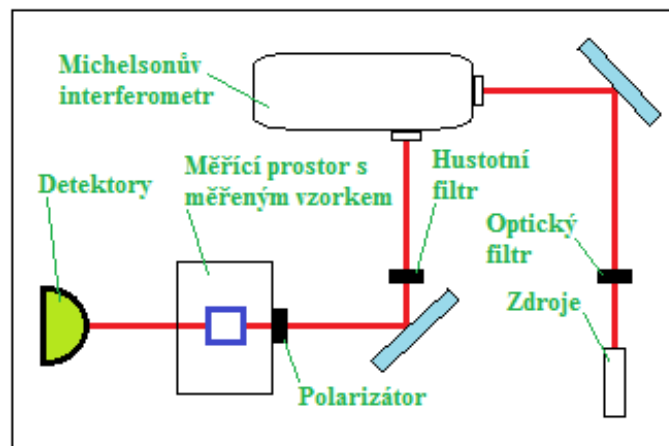
Obr. 49: Schéma sestavy na optické lavici při vedení svazku mimo spektrometr



Obr. 50: Manipulace s integrační koulí na optické lavici

Spektrometr Nicolet se skládá z (Obr. 50) **antivibrační základny** připravené pro předjustované optické komponenty, ze **zdroje infračerveného záření** (teplotně stabilní vysokoenergetický zdroj pro střední a vzdálenou infračervenou oblast vzduchem chlazený je výkonná keramická destička pro spektrální oblast $1-1000\mu m$), ze **zdroje pro viditelnou oblast** (wolframová žárovka), z **referenčního He-Ne laseru** (pracuje při vlnovku $633nm$, laserový paprsek neprochází středem děliče paprsku) s křemíkovým detektorem, z **optických filtrů** sloužících k odstínění zvolených spektrálních rozsahů, zejména ve VIS oblasti. Filtry lze do dráhy paprsku vkládat ručně (Kapitola 2.2.4.). Dále se skládá spektrometr Nicolet z **děliče paprsků**, které jsou optimalizovány pro zvolené spektrální rozsahy, všechny mají mimo osu umístěné okénko pro referenční He-Ne laser, pro maximalizaci infračerveného signálu. Každý dělič je automaticky rozpoznávaný elektronicky a optimální poloha zrcadel interferometru je pro každý dělič uložena v paměti spektrometru. Děliče používané pro měření diplomové práce jsou germánium nanesené na bromid draselném (Ge na KBr) s vlnovým rozsahem $\lambda = 1,28 - 28,57\mu m$ nebo Quartz (krystal křemene) s $\lambda = 0,37 - 3,57\mu m$. Také je ve spektrometru obsažen **Michelsonův interferometr** umožňující dosáhnout spektrálního rozlišení $0,09cm^{-1}$ (jde o rychle scanující interferometr, dynamicky nastavovaný) (Kapitola 1.6.), **hustotní filtr** (zejména u vysoce citlivých detektorů může dojít k přesycení, proto se do dráhy paprsku vkládá hustotní filtry), **motorizovaný polarizátor** (lze použít i manuální polarizátor), **měřící neboli volný prostor** o velikosti $21 \times 26 \times 18cm$ vyhrazen k měření, kde lze nastavovat vzorky pomocí různých přípravků. Jestliže tento měřící prostor nesplňuje požadované podmínky pro měření, můžeme využít možnosti vyvedení paprsku ze spektrometru na optickou lavici, **laserový detektor** využívaný pro měření v diplomové práci je Si (křemíková fotodioda) s vlnovým rozsahem $\lambda = 0,37 - 1,16\mu m$ pro VIS oblast, **infračervený detektor** použitý v diplomové práci je DLaTGS/KBr s vlnovým rozsahem $\lambda = 0,8 - 28,57\mu m$

pro IR oblast. Detektory jsou předjustovány a snadno vyměnitelné. Každý detektor má předzesilovač s nastavitelným zesílením, **další optické prvky** (zrcátka – volba mezi hliníkovým a zlatým provedením zrcadel. Pozlacená optika nabízí vyšší energetický zisk ve většině spektrálních oblastí s výjimkou oblasti kolem 500nm kde je menší odrazivost, což je dáno charakteristikou zlata, štěrbin, atd.). [11]



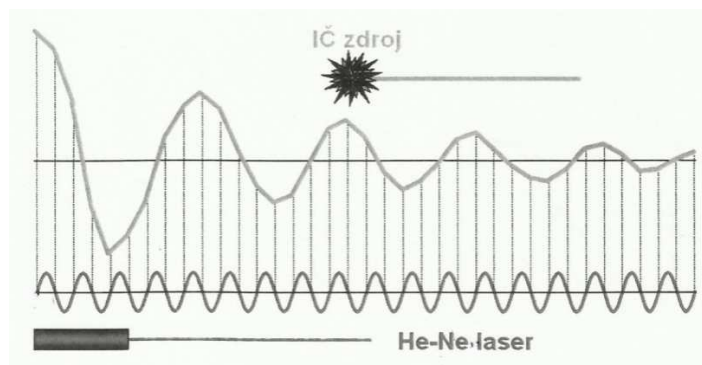
Obr. 51: Sestava spektrometru Nicolet

Měření na spektrometru Nicolet - vzdálenosti dvou bodů interferogramu se odvozuje od vlnové délky referenčního laseru ($\lambda = 633\text{nm}$). Referenční laser měří polohu pohyblivého zrcadla. Laserový signál je modulován stejným způsobem jako infračervené záření vycházející ze zdroje a pak snímán pomocí detektoru.

Signál na infračerveném detektoru je snímán tehdy, když sinusový signál na laserovém detektoru prochází nulou. Parametr, který říká, je-li infračerveným detektorem měřený signál snímán při každém, či jen při některém z průchodů laserového signálu nulou, se nazývá **vzorkovací frekvence**.

Analogový signál, který je zaznamenávaný pomocí infračerveného detektoru, je pomocí převodníku digitalizován a následně zpracován počítačem.

Všechny body digitalizovaného interferogramu jsou přepočteny na jednopaprskové spektrum pomocí Fourierovy transformace (Kapitola 1.7.). Jednopaprskové spektrum je závislost intenzity signálu na vlnočtu záření, vyjádřeno v reciprokových centimetrech cm^{-1} . [11]

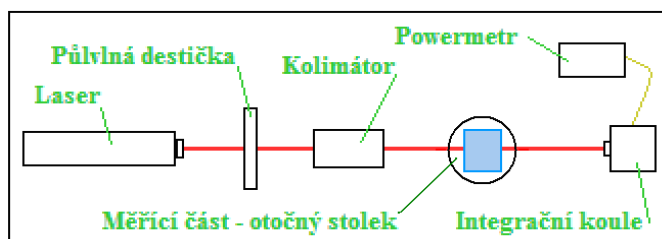


Obr. 52: Snímání IR signálu řízené modulovaným zářením laseru (Převzato z [11])

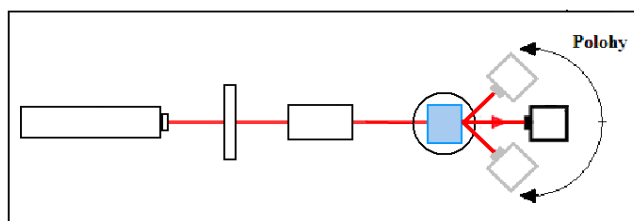
3.4. Měření s laserovým zdrojem

Měření s laserovým zdrojem je využíváno pro měření propustnosti a odrazivosti na jediné vlnové délce. Při měření s laserovým zdrojem je dosaženo většího poměru signálu k šumu a proto je výhodnější měřit laserovým zdrojem nízké propustnosti optických prvků. Laserový zdroj je výkonnější než zdroje záření u spektrometrů. Také je možné naměřené hodnoty laserovým zdrojem použít pro srovnání s naměřenými hodnotami na spektrometru.

Sestava pro měření s laserovým zdrojem je složena z **laseru** vlnové délky $\lambda = 633nm$ (He-Ne) - jde o lineárně polarizované záření, které umožňuje měření bez polarizátoru, z **půlvlné fázové destičky** (jde o planparalelní destičku vyrobenou s jednoosého krystalu, která slouží k natáčení roviny polarizace procházející vlny), z **objektivu jako kolimátoru**, který je spojnou soustavou vytvářející rovnoběžné světelné svazky, z **irisové clony**, pomocí které určujeme průměr světelného svazku, z **otočného stolu**, který má při měření laserem stejnou funkci jako při měření spektrometrem a to stranové, výškové a úhlové nastavení měřeného kusu, z **integrační koule**, kterou využíváme při měření na laseru stejně jako při měření spektrometrem (Kapitola 3.1.2.) a z **měřiče výkonu** napojeného na **detektor**, udávající naměřené hodnoty, které jsou potřeba následně zpracovat.



Obr. 53: Sestava pro měření laserem



Obr. 54: Manipulace s integrační koulí

K měření laserovým zdrojem je podobně jako při měření spektrometrem Perkin Elmer na optické lavici potřeba sestavení sestavy pro měření daného vzorku jak bylo popsáno výše, dále nastavení polarizace. Následuje měření a zapsání naměřené hodnoty bez měřeného vzorku pro zjištění 100% záření tzv. kalibrace, pak můžeme mechanicky ustavit vzorek stejně jako při měření na spektrometru PerkinElmer s optickou lavicí tzv. výškové, stranové nastavení (aby svazek procházel středem kusu) a nastavení úhlu dopadu světla. Integrační kouli nastavíme tak, aby do ní vstupoval paprsek procházející optickou součástí. Hned po ustavení měřeného vzorku zapíšeme naměřenou hodnotu a ze 100% záření vypočteme výsledky propustnosti či odrazivosti. Následně zkontrolujeme, zda neměřené výsledky odpovídají podmínkám vedeným v technickém výkresu a popřípadě vypracujeme protokol.

4. Požadované parametry měřených součástí

Na tenkou vrstvu jsou kladeny určité požadavky uvedené ve výkresu, např.: jaká má být propustnost T dané vrstvy, její odrazivost R , apod. Podle nich je pak určeno, o jaký typ vrstvy se jedná (Kapitola 2.1.). Ještě před samotnou výrobou tenké vrstvy je proto nutné stanovit teoretický model vrstvy.

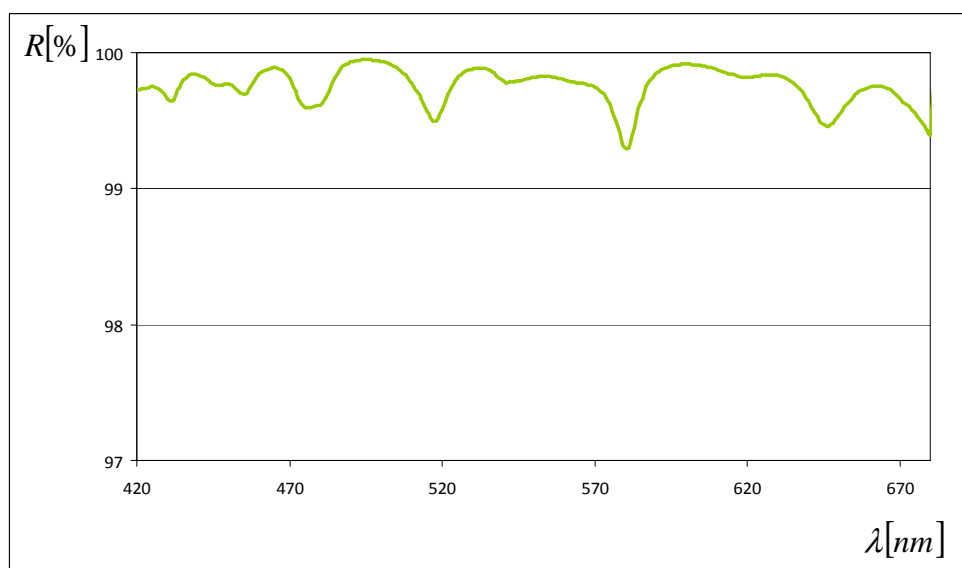
4.1. Požadované parametry zrcátka

Předpokládám, že na zrcátku musí být napařena odrazná tenká vrstva mající střední hodnotu odrazivosti $R_s \geq 98\%$ jak udává technický výkres (Obr. 71- Příloha A). Teoretický předpoklad je $R_s = 99,76\%$. Většina záření dopadajícího na zrcátko by měla být odražena.

Střední hodnota odrazivosti R_s je průměrná hodnota přes všechny vlnové délky měřeného spektra. Střední hodnota odrazivosti R_s u tohoto zrcátka je přes vlnové délky $\lambda = 420-680\text{nm}$.

$\lambda[\text{nm}]$	420	550	630	635	680	Střední hodnota $R_s[\%]$
$R[\%]$	99,73	99,82	99,84	99,78	99,40	99,76

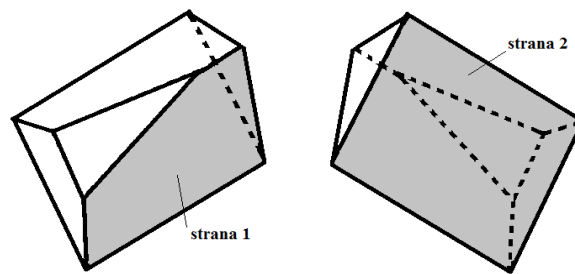
Tab. 1: Teoretické výsledky odrazivosti R zrcátka



Obr. 55: Teoretické výsledky odrazivosti R zrcátka

4.2. Požadované parametry hranolu

Na hranolu musí být napařeny antireflexní neboli protiodrazné vrstvy. Na první straně hranolu, kam záření dopadá pod úhlem 57° , antireflexní vrstva není. Odrazivost skla BK7 bez vrstvy je uvedena pro vybrané vlnové délky v tabulce 2. Na druhé straně hranolu, kam záření dopadá kolmo, by měla být střední hodnota odrazivosti $R_s \leq 0,5\%$ pro vlnové délky $\lambda = 420 - 670\text{nm}$ jak říká technický výkres hranolu (Obr. 72 - Příloha A). V tabulce teoretických výsledků je pro tuto stranu hranolu uvedena střední hodnota odrazivosti $R_s = 1,02\%$ přes celé měřené spektrum $\lambda = 380 - 780\text{nm}$, ale z praktického hlediska se využívá pouze interval vlnové délky $\lambda = 430 - 730\text{nm}$ kde je střední hodnota odrazivosti $R_s = 0,15\%$ a pak jsou splněny podmínky uvedené na technickém výkrese. Většina dopadajícího záření by tedy měla hranolem projít a jen jeho malá část se odrazit. Pro zvýšení propustnosti hranolu je možné nanést antireflexní vrstvu i na jeho první stranu.

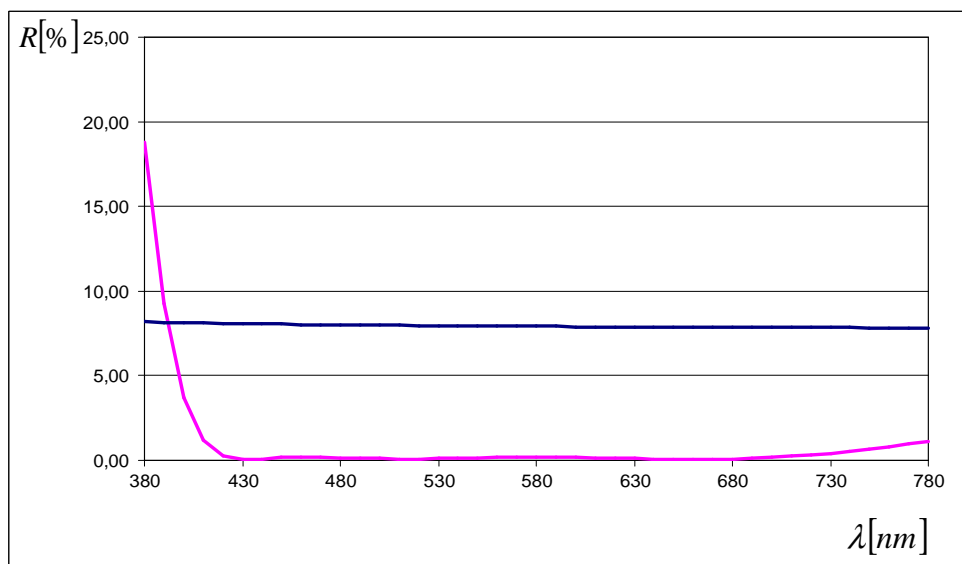


Obr. 56: Schéma měřeného hranolu (Fotografie Obr. 78 a 79 - Příloha B)

Střední hodnota odrazivosti R_s je průměrná hodnota přes všechny vlnové délky měřeného spektra. Střední hodnota odrazivosti R_s u hranolu je přes vlnové délky $\lambda = 380 - 780\text{nm}$.

$\lambda[\text{nm}]$	380	550	630	640	780	Střední hodnota $R_s [\%]$
$R[\%]$ na 1. str. (57°)	8,18	7,94	7,88	7,88	7,83	7,94
$R[\%]$ na 2. str. (0°)	18,75	0,15	0,11	0,09	1,16	1,02

Tab. 2: Teoretické výsledky odrazivosti R hranolu

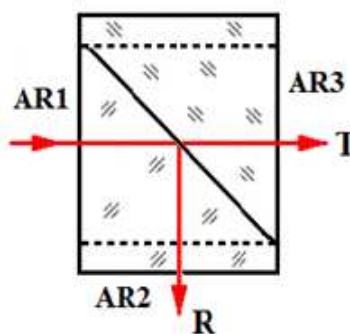


Obr. 57: Teoretické výsledky odrazivosti R hranolu (pod úhlem 57° -**modrá**, pod úhlem 0° -**růžová**)

4.3. Požadované parametry dělicí kostky

Dělicí kostka je vyrobena ze dvou pravouhlých hranolů, které jsou k sobě přeponami přitmeleny. Jeden z těchto hranolů má na své přeponě napařenou dělicí vrstvu. Tento dělič slouží k tomu, aby polovina záření, která do dělicí kostky vstoupí, prošla a druhá polovina byla odkloněna. Požadavky na vrstvy jsou uvedeny na výkresu (Obr. 73, 74, 75 - Příloha A).

Na vstupní straně a obou výstupních stranách dělicí kostky jsou nanесeny stejné antireflexní vrstvy se střední hodnotou $AR_s = 0,05\%$, proto platí $AR = AR1 = AR2 = AR3[\%]$ a na jednotlivých vrstvách by měli být naměřeny stejné výsledky.

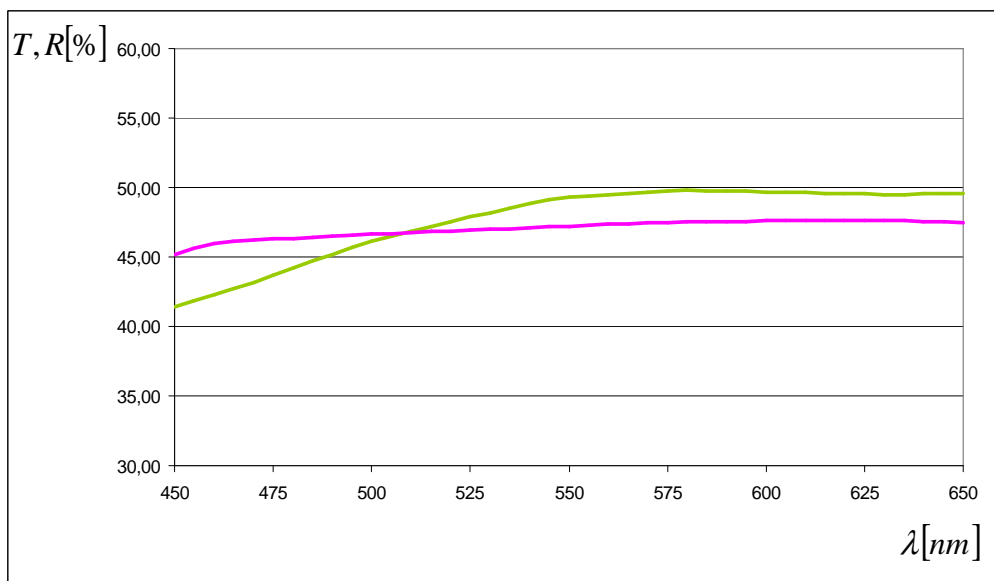


Obr. 58: Průchod paprsku dělicí kostkou (Fotografie Obr. 80 a 81 - Příloha B)

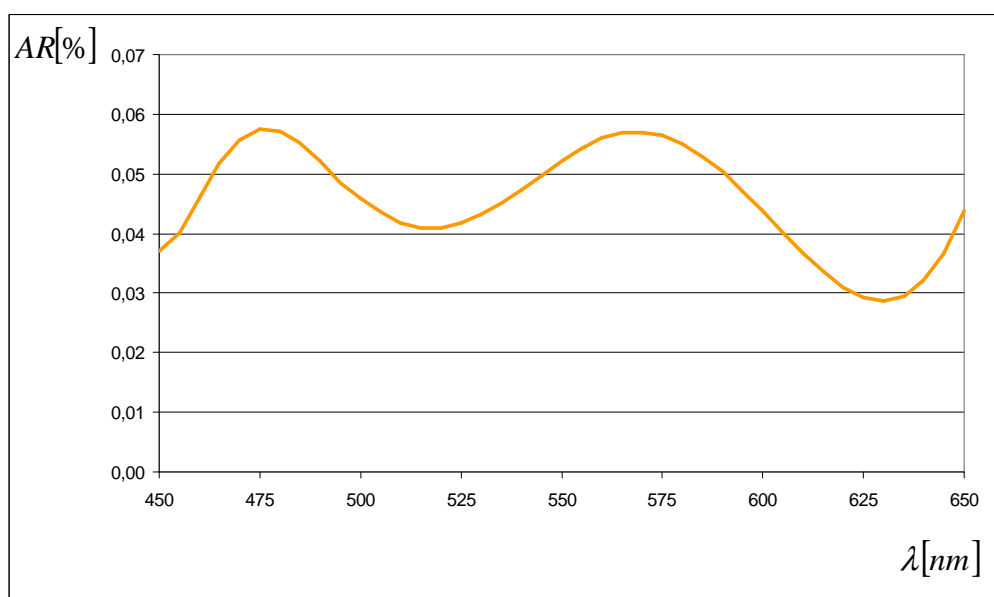
Střední hodnota odrazivosti R_s je průměrná hodnota přes všechny vlnové délky měřeného spektra. Střední hodnota odrazivosti R_s u dělicí kostky je přes vlnové délky $\lambda = 420-650\text{nm}$.

$\lambda[nm]$	420	550	630	635	650	Střední hodnota [%]
$T[\%]$	41,38	49,27	49,51	49,51	49,57	47,63
$R[\%]$	45,16	47,24	47,63	47,61	47,48	47,03
$AR[\%]$	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,05

Tab. 3: Teoretické výsledky dělicí kostky



Obr. 59: Teoretické výsledky propustnosti T (zelená) a odrazivosti R (růžová) dělicí kostky



Obr. 60: Teoretické výsledky antireflexe AR dělicí kostky

5. Naměřená data

V této části srovnávám výsledky měření na jednotlivých přístrojích s teoretickými předpoklady. Rozdíly mezi změřenými a teoretickými hodnotami mohou být způsobeny buď systematickou chybou měření, nebo nedokonalostmi při výrobě tenkých vrstev.

Měření bylo na každé měřené součástce, při každé metodě měření provedeno pětkrát a následně byla vypočtena chyba měření.

5.1. Naměřená data odrazivosti zrcátka

Odrazivost R zrcátka byla měřena na:

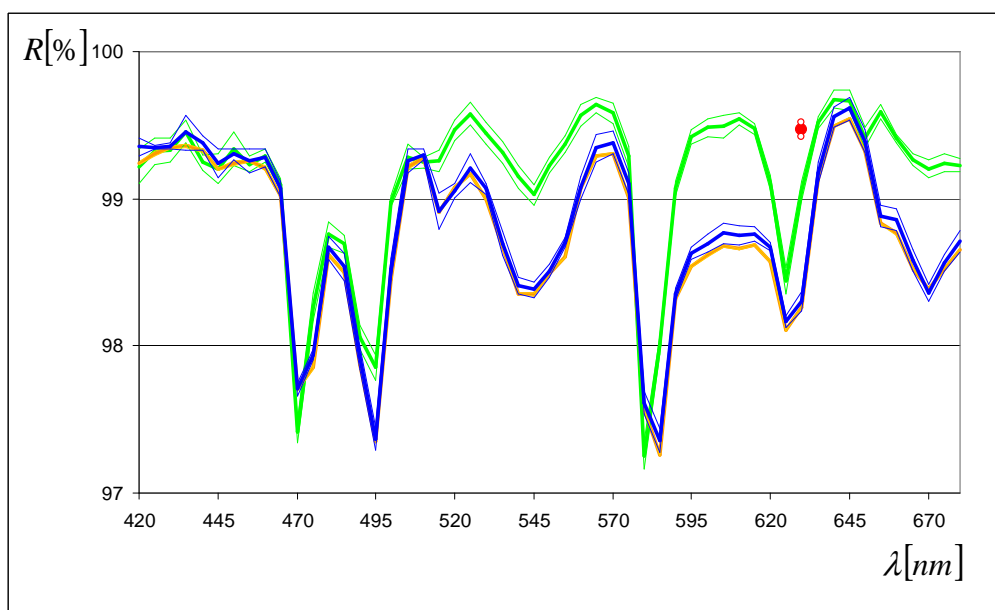
- spektrometru PerkinElmer $\lambda 900$ s optickou lavicí
- spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s přípravkem URA
- spektrometru Nicolet
- laserovým zdrojem

Název měřeného kusu	Zrcátko Barco 12416	
Měření	Odrazivosti R	
Technické parametry měřeného kusu	viz. technický výkres měřeného kusu (Obr. 71 - Příloha A)	
Nastavení v programu	Rozsah vlnových délek Krok Lampa Polarizace Úhel dopadu záření Hustotní filtr – refer. vl. Integrační čas	420 - 680 nm (laser 633nm) po 5 nm (u laseru se nenastavuje) VIS střední 45° 45° 100% záření (u laseru se nenastavuje) 0,60 s (u laseru se nenastavuje)

Tab. 4: Zadání pro měření zrcátka

$\lambda [nm]$	420	550	630	635	680	Střední hodnota $R_s [\%]$
R[%]						
Op. lavice	99,22 ± 0,12	99,23 ± 0,06	99,05 ± 0,07	99,52 ± 0,04	99,23 ± 0,04	99,13 ± 0,07
URA	99,24 ± 0,01	98,49 ± 0,01	98,26 ± 0,01	99,14 ± 0,01	98,66 ± 0,01	98,74 ± 0,01
Nicolet	99,35 ± 0,06	98,51 ± 0,04	98,30 ± 0,06	99,18 ± 0,07	98,71 ± 0,07	98,79 ± 0,06
Laser	pro $\lambda = 633nm$ naměřeno $R = 99,47 \pm 0,05\%$					

Tab. 5: Výsledky měření odrazivosti zrcátka



Obr. 61: Naměřené hodnoty odrazivosti R zrcátka se směrodatnými odchylkami na PE λ 900_s optickou lavicí (zelená), na PE λ 950 URA (oranžová), na Nicoletu (modrá), laserem (červená)

Technický výkres udává, že by odrazivost zrcátka měla být $R_s \geq 98\%$.

Teoretické předpoklady zrcátka (Kapitola 4.1.) udávají střední hodnotu odrazivosti $R_s = 99,76\%$. Střední hodnota odrazivosti R_s je průměrná hodnota přes všechny vlnové délky měřeného spektra. Střední hodnota odrazivosti R_s u tohoto zrcátka je přes vlnové délky $\lambda = 420-680\text{nm}$. Pak by podmínky dané výkresem byly splněny. Při měření jsem se tomuto výsledku dostala nejbližší na spektrometru PerkinElmer λ 900 s optickou lavicí, kde bylo dosaženo střední hodnoty odrazivosti $R_s = 99,13\%$ a ještě bližší hodnota byla při měření s laserovým zdrojem vlnové délky $\lambda = 633\text{nm}$ a to $R = 99,47\%$. Na dalších spektrometrech, které byly použity k měření zrcátka, také nedošlo k příliš velkým rozdílům mezi teoretickou a naměřenou hodnotou propustnosti.

Podle naměřených výsledků lze říci, že relativní chyba vznikala nejmenší na spektrometru PerkinElmer λ 950_s přípravkem URA, tato skutečnost je dána jednodušším uložením měřeného vzorku a to na výstupní šterbinu a mechanickým nastavením optické soustavy (Kapitola 3.2.). Tedy ze všech pěti měření, které byli provedeny za zrcátka vždy stejnou metodou vycházeli naměřené výsledky téměř stejné. Podobně je tomu i tak při měření s RC přípravkem (Kapitola 3.2.). Na rozdíl od měření na spektrometru Nicolet, PerkinElmer

$\lambda 900$ s optickou lavicí a laserovým zdrojem kde je měřený kus potřeba výškově, stranově a úhlově ustavit v měřeném prostoru. Záření by mělo dopadat na střed zrcátka pod úhlem dopadu, který je dán technickým výkresem. Sestava pro měření je v těchto případech na optické lavici nastavena ručně.

Naměřené výsledky na spektrometru Nicolet byli velmi podobné výsledkům se spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s přípravkem URA. Rozdíl mezi naměřenými hodnotami je dán rozdílným uložením měřeného vzorku.

Největší systematická chyba vznikla při měření na spektrometru PerkinElmer $\lambda 900$ s optickou lavicí a při měření s laserovým zdrojem.

Podmínky dané technickým výkresem byly tedy splněny ve všech případech.

Tyto výsledky jsou zobrazeny v grafu 5.

5.2. Naměřená data odrazivosti a propustnosti hranolu

Propustnost T hranolu byla měřena na:

- a. spektrometru PerkinElmer $\lambda 900$ s optickou lavicí
- b. spektrometru Nicolet
- c. laserovým zdrojem

Odrazivost R hranolu na jeho 1. straně (úhel dopadu 57°) byla měřena na (Obr. 58):

- a. spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s přípravkem URA
- a. spektrometru Nicolet
- b. laserovým zdrojem

Odrazivost R hranolu na jeho 2. straně (úhel dopadu 0°) byla měřena na (Obr. 58):

- a. spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s optickou lavicí a RC přípravkem
- b. spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s přípravkem URA
- c. laserovým zdrojem

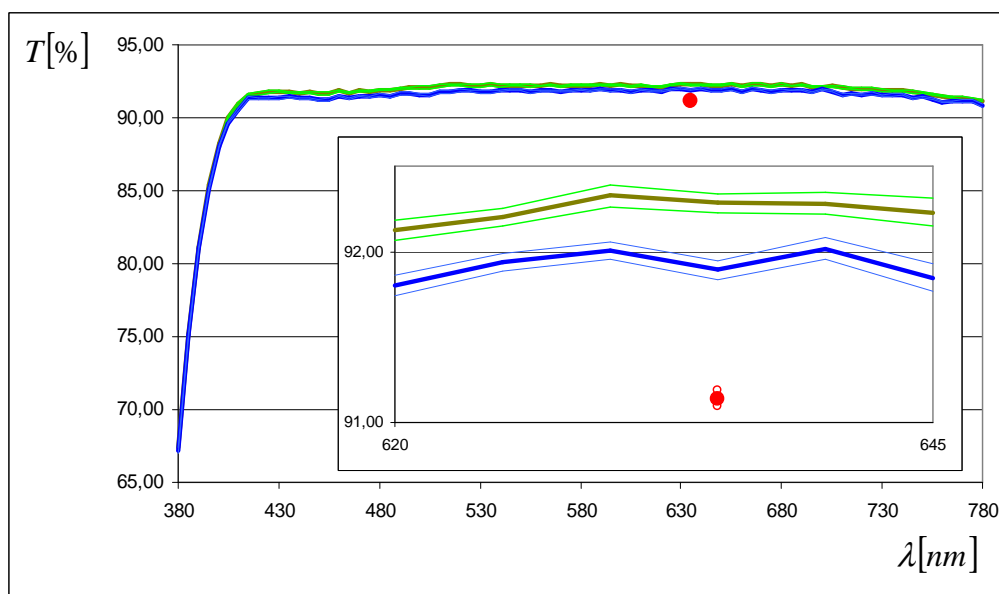
Název měřeného kusu	Hranol blizzard	
Měřeno (R, T...)	Měření propustnosti T a odrazivosti R	
Technické parametry měřeného kusu	viz. technický výkres měřeného kusu (Obr. 72 - Příloha A)	
Nastavení v programu	Rozsah vlnových délek	380 - 780 nm (laser 633nm)
	Krok	po 5 nm (s RC přípravkem po 2 nm, u laseru se nenastavuje)
	Lampa	VIS
	Polarizace	střední 45°
	Úhel dopadu záření	57° na 1 stranu, 0° * na 2 stranu
	Hustotní filtr – refer. vl.	10% záření (na op. lavici 100% záření, u laseru se nenastavuje)
	Integrační čas	0,52 s (na op. lavici 0,60 s, u laseru se nenastavuje)

Tab. 6: Zadání pro měření hranolu

*ve skutečnosti 8° na PE $\lambda 950$ URA a 6° při měření s laserovým zdrojem, protože menší úhel nelze nastavit.

$\lambda [nm]$	380	550	630	635	780	Střední hodnota $T_s [%]$
Op. lavice	67,38 ± 0,17	92,23 ± 0,05	92,33 ± 0,06	92,28 ± 0,06	91,17 ± 0,06	91,20 ± 0,07
Nicolet	67,17 ± 0,19	91,89 ± 0,04	92,01 ± 0,05	92,89 ± 0,06	90,85 ± 0,07	90,85 ± 0,07
Laser	pro $\lambda = 633nm$ naměřeno $T = 91,14 \pm 0,05\%$					

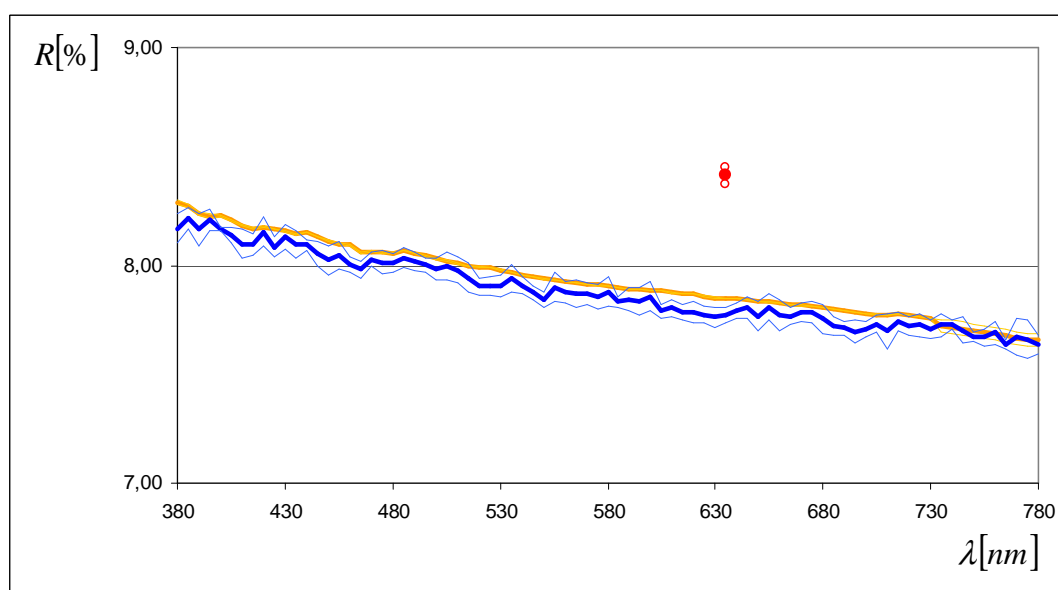
Tab. 7: Výsledky měření propustnosti hranolu



Obr. 62: Naměřené hodnoty propustnosti T hranolu se směrodatnými odchylkami na PE $\lambda 900$ s optické lavici (zelená), na Nicoletu (modrá), laserem (červená)

$\lambda[nm]$						Střední hodnota R_s [%]
R [%]	380	550	630	635	780	
URA	$8,29 \pm 0,01$	$7,90 \pm 0,00$	$7,85 \pm 0,01$	$7,85 \pm 0,00$	$7,65 \pm 0,03$	$7,93 \pm 0,01$
Nicolet	$8,17 \pm 0,07$	$7,84 \pm 0,03$	$7,76 \pm 0,04$	$7,77 \pm 0,04$	$7,64 \pm 0,04$	$7,88 \pm 0,05$
Laser	pro $\lambda = 633nm$ naměřeno $R = 8,41 \pm 0,04\%$					

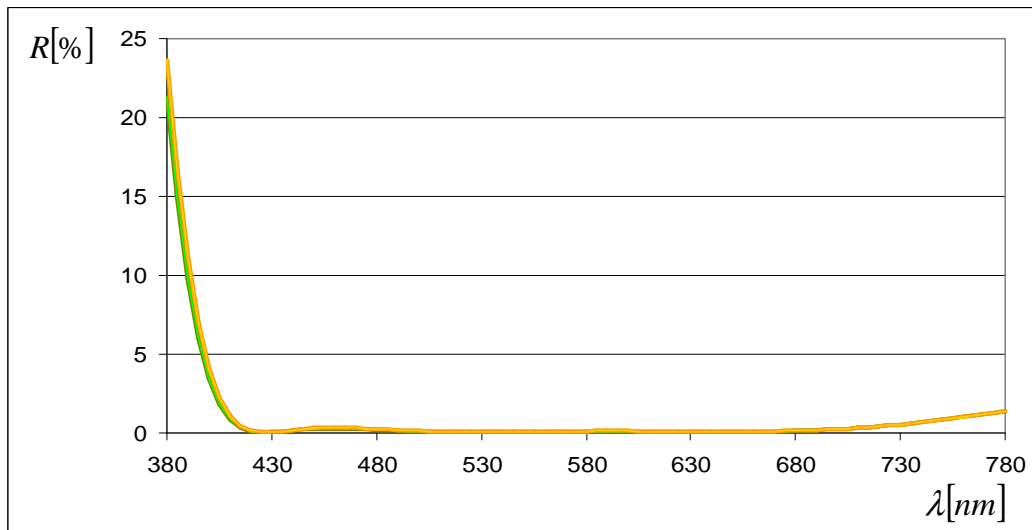
Tab. 8: Výsledky měření odrazivosti hranolu na 1. straně (57°)



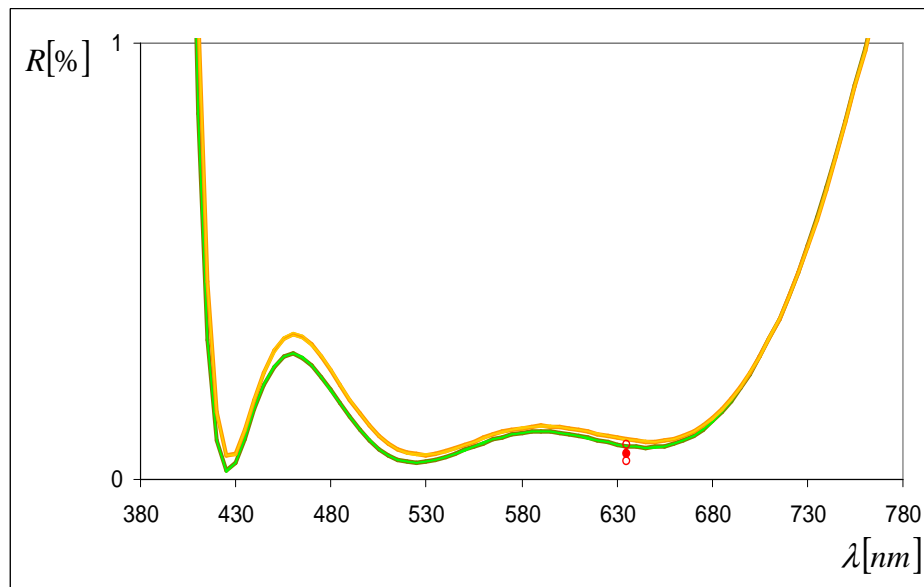
Obr. 63: Naměřené hodnoty odrazivosti R hranolu na 1. straně (57°) se směrodatnými odchylkami na PE $\lambda 950$ URA (oranžová), na Nicoletu (modrá), laserem (červená)

$\lambda[nm]$						Střední hodnota R_s [%]
R [%]	380	550	630	635	780	
RC	$23,60 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,00$	$0,11 \pm 0,00$	$0,10 \pm 0,00$	$1,38 \pm 0,00$	$1,08 \pm 0,01$
URA	$21,27 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$1,39 \pm 0,00$	$0,96 \pm 0,00$
Laser	pro $\lambda = 633nm$ naměřeno $R = 0,07 \pm 0,02\%$					

Tab. 9: Výsledky měření odrazivosti hranolu na 2. straně (0°)



Obr. 64: Naměřené hodnoty odrazivosti R hranolu na 2. straně (0°) se směrodatnými odchylkami na PE $\lambda 900$ s optické lavici (**zelená**), PE $\lambda 950$ URA (**oranžová**)



Obr. 65: Naměřené hodnoty odrazivosti R hranolu na 2. straně (0°) se směrodatnými odchylkami na PE $\lambda 900$ s optické lavici (**zelená**), PE $\lambda 950$ URA (**oranžová**) ve větším rozlišení

Střední hodnota odrazivosti R_s je průměrná hodnota přes všechny vlnové délky měřeného spektra. Střední hodnota odrazivosti R_s u hranolu je přes vlnové délky $\lambda = 380-780\text{nm}$.

Propustnost hranolu není na výkrese uvedena, ale předpokládáme, že by měla být co největší. Největší střední hodnota propustnosti $T_s = 91,20\%$ byla naměřena na spektrometru

Nicolet zatím co nejmenší na spektrometru PerkinElmer $\lambda 900$ s optickou lavicí $T_s = 90,85\%$.

Na první straně hranolu pod úhlem dopadu 57° byla měřená odrazivost skla BK7. Předpokládala jsem, že v rozmezí vlnových délek $\lambda = 380 - 780\text{nm}$ bude tato odrazivost kolem 8% (viz. Tab. 2). Ve skutečnosti jsem naměřila na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s přípravkem URA kde bylo měření nejbližší teoretické hodnotě střední hodnotu odrazivosti $R_s = 7,93\%$.

Druhá strana hranolu byla opatřena antireflexní vrstvou a úhel dopadu při měření byl 0° . Technický výkres udává podmínku pro střední hodnotu odrazivosti $R_s \leq 0,5\%$ při vlnových délkách $\lambda = 420 - 670\text{nm}$. Teoretický předpoklad (Kapitola 4.2.) střední hodnoty odrazivosti byl $R_s = 1,02\%$, ale z praktického hlediska se využívá pouze interval vlnové délky $\lambda = 430 - 730\text{nm}$ kde je střední hodnota odrazivosti $R_s = 0,15\%$. Je tedy téměř rovna 0%. Tato odrazivost byla měřena na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s optickou lavicí a RC přípravkem kde střední hodnota odrazivosti přes celé měřené spektrum vyšla $R_s = 1,08\%$ (pro interval $\lambda = 430 - 730\text{nm}$ vyšla střední hodnota odrazivosti ($R_s = 0,16\%$)) a na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s přípravkem URA kde vyšla $R_s = 0,96\%$ (pro interval $\lambda = 430 - 730\text{nm}$ vyšla střední hodnota odrazivosti $R_s = 0,17\%$). Při těchto měřeních bylo dosaženo nízké relativní chyby. Odrazivost $R = 0,07\%$ byla také měřena laserovým zdrojem vlnové délky $\lambda = 633\text{nm}$, který vykazoval vysokou systematickou chybu.

Podmínky dané technickým výkresem byli tedy splněny pouze pro interval vlnových délek $\lambda = 430 - 730\text{nm}$. Naměřená data souhlasili s předpokládanými hodnotami.

Tyto výsledky jsou zobrazeny v grafu 6 až 9.

5.3. Naměřená data odrazivosti a propustnosti dělicí kostky

Propustnost T dělicí kostky byla měřena na:

- spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s optickou lavicí
- spektrometru Nicolet
- laserovým zdrojem

Odrazivost R dělicí kostky byla měřena na:

- spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s optickou lavicí
- spektrometru Nicolet
- laserovým zdrojem

Antireflexe AR jednotlivých ploch byli měřeny na (Obr. 59):

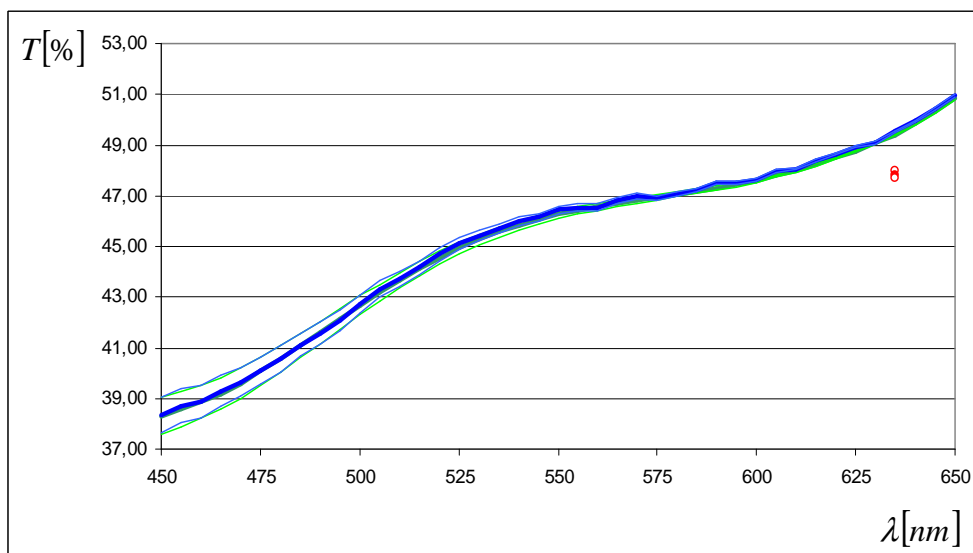
- spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s optickou lavicí a RC přípravkem
- spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s přípravkem URA
- laserovým zdrojem

Název měřeného kusu															
Měřeno (R, T...)	Měření propustnosti T, odrazivosti R a antireflexe jednotlivých vrstev														
Technické parametry měřeného kusu	viz. technický výkres měřeného kusu (Obr. 73,74,75 - Příloha A)														
Nastavení v programu	<table border="1"> <tr> <td>Rozsah vlnových délek</td> <td>450 - 650 nm (laser 633nm)</td> </tr> <tr> <td>Krok</td> <td>po 5 nm (u laseru se nenastavuje)</td> </tr> <tr> <td>Lampa</td> <td>VIS</td> </tr> <tr> <td>Polarizace</td> <td>střední 45°</td> </tr> <tr> <td>Úhel dopadu záření</td> <td>0° (při měření antireflexe na laseru 6°)</td> </tr> <tr> <td>Hustotní filtr – refer. vl.</td> <td>10% záření (u laseru se nenastavuje)</td> </tr> <tr> <td>Integrační čas</td> <td>1 s (u laseru se nenastavuje)</td> </tr> </table>	Rozsah vlnových délek	450 - 650 nm (laser 633nm)	Krok	po 5 nm (u laseru se nenastavuje)	Lampa	VIS	Polarizace	střední 45°	Úhel dopadu záření	0° (při měření antireflexe na laseru 6°)	Hustotní filtr – refer. vl.	10% záření (u laseru se nenastavuje)	Integrační čas	1 s (u laseru se nenastavuje)
Rozsah vlnových délek	450 - 650 nm (laser 633nm)														
Krok	po 5 nm (u laseru se nenastavuje)														
Lampa	VIS														
Polarizace	střední 45°														
Úhel dopadu záření	0° (při měření antireflexe na laseru 6°)														
Hustotní filtr – refer. vl.	10% záření (u laseru se nenastavuje)														
Integrační čas	1 s (u laseru se nenastavuje)														

Tab. 10: Zadání pro měření dělicí kostky

$\lambda [nm]$	450	550	630	635	650	Střední hodnota $T_s [%]$
Op. lavice	$38,31 \pm 0,73$	$46,26 \pm 0,15$	$49,08 \pm 0,04$	$49,41 \pm 0,04$	$50,86 \pm 0,06$	$45,19 \pm 0,24$
Nicolet	$38,35 \pm 0,69$	$46,45 \pm 0,15$	$49,07 \pm 0,04$	$49,53 \pm 0,03$	$50,98 \pm 0,06$	$45,28 \pm 0,22$
Laser	pro $\lambda = 633nm$ naměřeno $T = 47,81 \pm 0,15\%$					

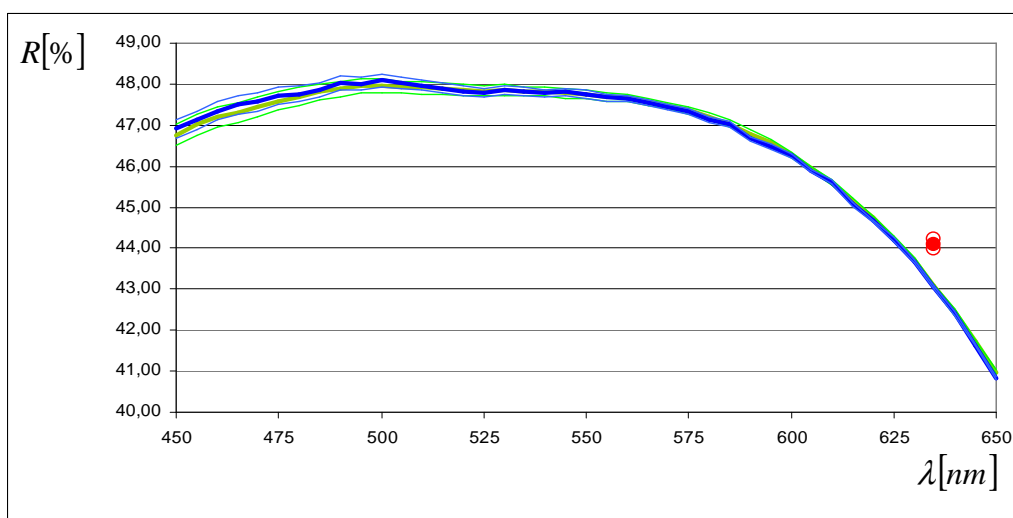
Tab. 11: Výsledky měření propustnosti T dělicí kostky



Obr. 66: Naměřené hodnoty propustnosti T dělicí kostky se směrodatnými odchylkami na PE $\lambda 900$ s optické lavici (**zelená**), na Nicoletu (**modrá**), laserem (**červená**):

$\lambda [nm]$						Sřední hodnota $R_s [%]$
$R [%]$	450	550	630	635	650	
Op. lavice	$46,76 \pm 0,25$	$47,75 \pm 0,10$	$43,71 \pm 0,05$	$43,07 \pm 0,06$	$40,98 \pm 0,05$	$46,59 \pm 0,12$
Nicolet	$46,91 \pm 0,23$	$47,76 \pm 0,09$	$43,66 \pm 0,03$	$43,03 \pm 0,04$	$40,82 \pm 0,03$	$46,60 \pm 0,11$
Laser	pro $\lambda = 633nm$ naměřeno $R = 44,09 \pm 0,12\%$					

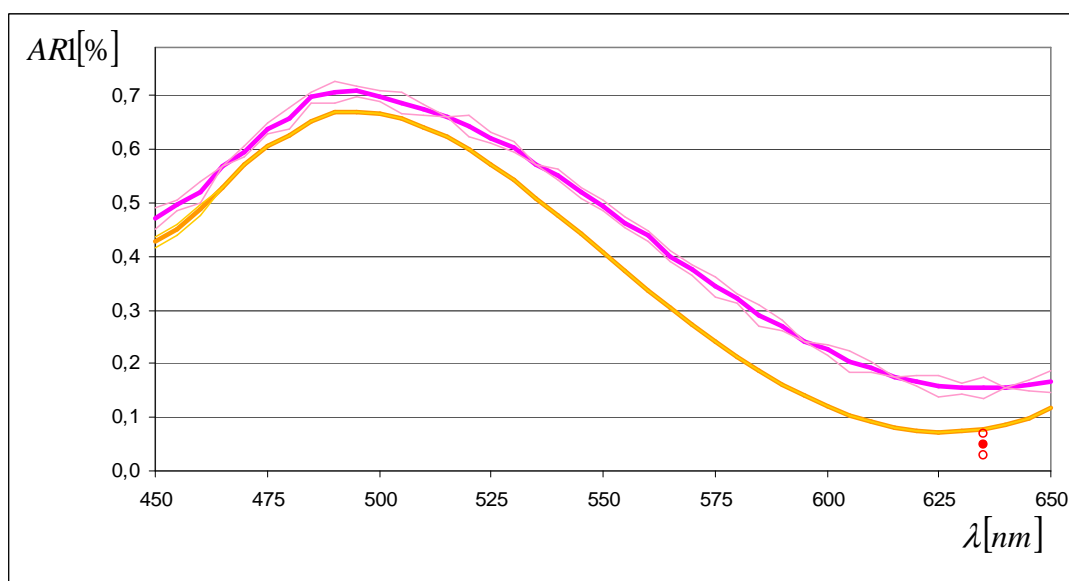
Tab. 12: Výsledky měření odrazivosti R dělicí kostky



Obr. 67: Naměřené hodnoty odrazivosti R dělicí kostky se směrodatnými odchylkami na PE $\lambda 900$ s optické lavici (**zelená**), na Nicoletu (**modrá**), laserem (**červená**):

$\lambda[nm]$						Sřední hodnota $AR1_s$ [%]
$AR1$ [%]	450	550	630	635	650	
RC	$0,48 \pm 0,02$	$0,50 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,02$	$0,18 \pm 0,02$	$0,45 \pm 0,01$
URA	$0,44 \pm 0,01$	$0,42 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,09 \pm 0,00$	$0,13 \pm 0,00$	$0,38 \pm 0,00$
Laser	pro $\lambda = 633nm$ naměřeno $AR1 = 0,06 \pm 0,02\%$					

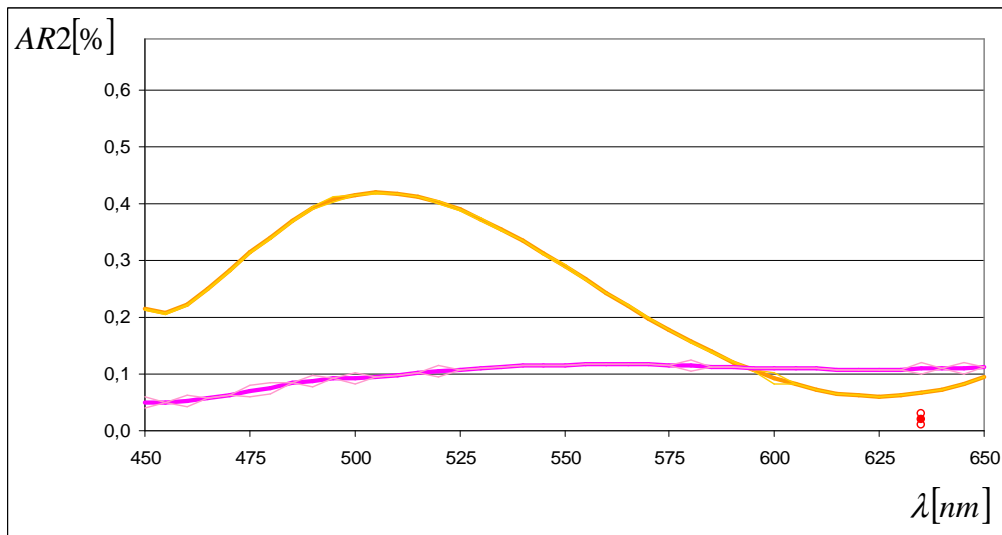
Tab. 13: Výsledky měření antireflexe AR1 dělicí kostky



Obr. 68: Naměřené hodnoty antireflexe AR1 se směrodatnými odchylkami na PE $\lambda 900$ s optické lavici a RC přípravkem (růžová), PE $\lambda 950$ URA (oranžová), laserem (červená)

$\lambda[nm]$						Sřední hodnota $AR2_s$ [%]
$AR2$ [%]	450	550	630	635	650	
RC	$0,06 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,00$	$0,12 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,00$	$0,11 \pm 0,00$
URA	$0,22 \pm 0,00$	$0,30 \pm 0,00$	$0,07 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,00$	$0,11 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,00$
Laser	pro $\lambda = 633nm$ naměřeno $AR2 = 0,03 \pm 0,01\%$					

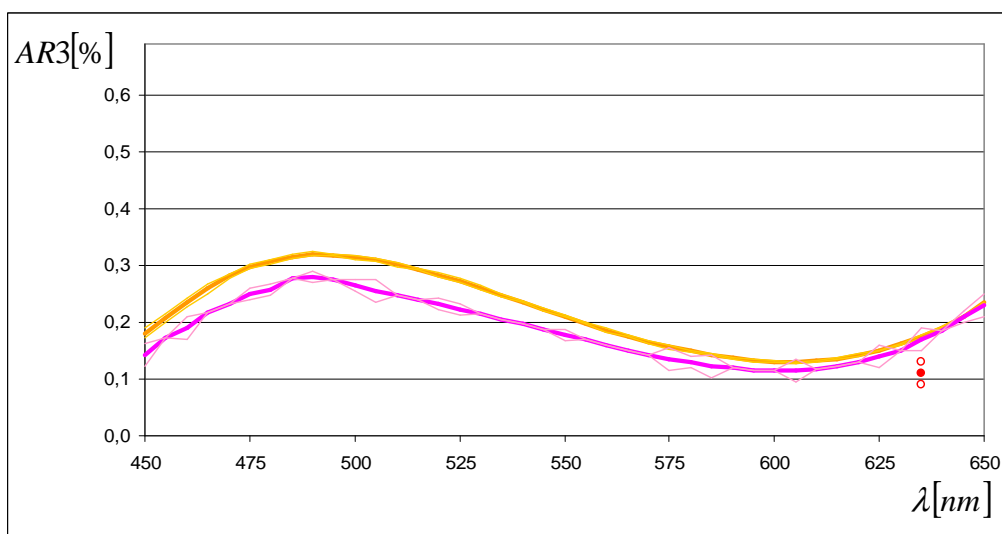
Tab. 14: Výsledky měření antireflexe AR2 dělicí kostky



Obr. 69: Naměřené hodnoty antireflexe AR2 se směrodatnými odchylkami na PE $\lambda 900$ s optické lavici a RC přípravkem (růžová), PE $\lambda 950$ URA (oranžová), laserem (červená)

$\lambda [nm]$	$\lambda [nm]$					Střední hodnota $AR3_s [%]$
$AR3 [%]$	450	550	630	635	650	
RC	$0,15 \pm 0,00$	$0,19 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,00$	$0,17 \pm 0,02$	$0,24 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,01$
URA	$0,19 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,00$	$0,17 \pm 0,00$	$0,19 \pm 0,00$	$0,24 \pm 0,00$	$0,23 \pm 0,00$
Laser	pro $\lambda = 633nm$ naměřeno $AR3 = 0,12 \pm 0,02\%$					

Tab. 15: Výsledky měření antireflexe AR3 dělicí kostky



Obr. 70: Naměřené hodnoty antireflexe AR3 se směrodatnými odchylkami na PE $\lambda 900$ s optické lavici a RC přípravkem (růžová), PE $\lambda 950$ URA (oranžová), laserem (červená)

Při průchodu záření dělicí kostkou by měla jedna část záření projít a druhá část být odkloněna, ale v praxi dochází navíc ke ztrátám záření na všech površích měřené součástky a k absorpci materiálu.

Podle technického výkresu by mělo při vlnové délce $\lambda = 550nm$ projít neboli být propuštěno $T \geq 39,5\%$ a být odkloněno neboli odraženo $R \geq 45,0\%$. Z teoretických předpokladů (Kapitola 4.3.) je známo, že střední hodnota propustnosti by měla být $T_s = 47,63\%$ a propustnost na vlnové délce $\lambda = 550nm$ by měla být $T \geq 49,27\%$. Nejnižší relativní chybu mělo v tomto případě měření laserovým zdrojem $\lambda = 633nm$ kde vyšlo $T = 47,81\%$ (teoretický předpoklad pro vlnovou délku $\lambda = 633nm$ byl $T = 49,51\%$), ale zároveň toto měření vykazovalo největší systematickou chybu. Při měření na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950s$ optickou lavicí vyšla střední hodnota propustnosti $T_s = 45,19\%$ (pro vlnovou délku $\lambda = 550nm$ vyšla odrazivost $T = 47,81\%$) a na spektrometru Nicolet vyšla $T_s = 45,28\%$ (pro $\lambda = 550nm$ vyšla $T = 46,45\%$). Teoretickým předpokladům bylo bližší měření na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950s$ optickou lavicí. Požadavky dané technickým výkresem byly splněny na obou spektrometrech.

Podle teoretických předpokladů vychází střední hodnota odrazivosti $R_s = 47,03\%$ a odrazivost na vlnové délce $\lambda = 550nm$ $R \geq 47,24\%$. Všechny naměřené výsledky odrazivosti měli v tomto případě stejnou relativní chybu. Na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950s$ optickou lavicí byla naměřena střední hodnota odrazivosti $R_s = 46,59\%$ (pro $\lambda = 550nm$ byla naměřena odrazivost $R = 47,75\%$), na spektrometru Nicolet byla střední hodnota odrazivosti $R_s = 46,60\%$ (pro $\lambda = 550nm$ byla odrazivost $T = 47,76\%$) a při měření s laserovým zdrojem vlnové délky $\lambda = 633nm$ byla odrazivost naměřena $T = 44,09\%$ (nejbližší známý teoretický předpoklad měřené hodnotě je pro vlnovou délku $\lambda = 635nm$ byl $T = 47,61\%$). Od teoretického předpokladu nebylo daleko ani jedno měření na spektrometrech a podmínky dané technickým výkresem byli také splněny. Měření na optické lavici s laserovým zdrojem opět vykazovalo systematickou chybu.

Antireflexe na jednotlivých vstupních a výstupních plochách by měla podle teoretických předpokladů vycházet stejně a to jejich střední hodnota přes interval vlnových délek $\lambda = 450 - 650nm$ $AR_s = 0,05\%$ a pro $\lambda = 633nm$ $AR_1 = 0,03\%$. Podle technického výkresu by všechny antireflexní vrstvy měli mít v intervalu vlnových délek $\lambda = 450 - 650nm$ odrazivost $AR_s \leq 0,5\%$. Měření všech tří ploch vykazovalo nízkou relativní chybu.

Při měření antireflexe AR1 vstupní plochy jsem naměřila na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s optickou lavicí a RC přípravkem střední hodnotu přes interval vlnových délek $\lambda = 450 - 650 \text{ nm}$ $AR1_s = 0,45\%$, na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950s$ přípravkem URA $AR1_s = 0,38\%$. Měření laserovým zdrojem mělo horší přesnost než měření pomocí spektrometrů. Při měření laserovým zdrojem $\lambda = 633 \text{ nm}$ jsem naměřila $AR1 = 0,06\%$. Požadavky technického výkresu jsou splněny.

Měření antireflexe AR2 na výstupní ploše odkloněné části světelného záření jsem naměřila na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s optickou lavicí a RC přípravkem střední hodnotu přes interval vlnových délek $\lambda = 450 - 650 \text{ nm}$ $AR2_s = 0,11\%$, na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950s$ přípravkem URA $AR2_s = 0,24\%$. Při měření laserovým zdrojem $\lambda = 633 \text{ nm}$ odrazivost vyšla $AR2 = 0,03\%$. Podmínky technického výkresu také splněny. Technické předpoklady pro $\lambda = 633 \text{ nm}$ byly stejné jako naměřené výsledky a naměřené výsledky na spektrometrech se přibližovali teoretickým předpokladům více než v případě měření antireflexe AR1. Při měření na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s optickou lavicí a RC přípravkem došlo k systematické chybě měření, jelikož křivka naměřených hodnot neodpovídá teoretické křivce ani není podobná ostatním křivkám naměřených hodnot.

Antireflexe AR3 na výstupní ploše procházející části světelného záření vyšla na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950$ s optickou lavicí a RC přípravkem $AR2_s = 0,20\%$ a na spektrometru PerkinElmer $\lambda 950s$ přípravkem URA $AR1_s = 0,23\%$. Přesnost při měření laserovým zdrojem $\lambda = 633 \text{ nm}$ byla horší a odrazivost vyšla $AR3 = 0,12\%$. Naměřené výsledky se v tomto případě také přibližují teoretickým předpokladům více, než se přibližovaly naměřené výsledky antireflexe AR1 a podmínky technického výkresu byly také splněny.

Tyto výsledky můžeme pozorovat v grafu 10 až 14.

Závěr:

Optické sestavy (dalekohledy, noktovizory, barvodělicí sestavy, apod.) se v praxi používají k nejrůznějším účelům. Proto na ně z hlediska spektrálních vlastností existují nejrůznější požadavky, ať už se to týká hodnot spektrálních parametrů (např. odrazivost může být vysoká – zrcadla, nebo nízká – antireflexní vrstvy), nebo spektrálního rozsahu, v němž nacházejí uplatnění (dalekohledy – viditelná oblast, noktovizory – blízká infračervená oblast). Vhodně nastavené spektrální parametry optických sestav tak mají velký vliv na jejich funkčnost a uplatnění v praxi.

V diplomové práci na téma „Měření spektrálních vlastností optických součástí v oblasti VIS a NIR na spektrometrech PerkinElmer a Nicolet“ lze najít popis různých typů tenkých vrstev. Za tenkou optickou vrstvou je považována vrstva dielektrického, kovového nebo polovodičového materiálu o tloušťce srovnatelné s vlnovou délkou světla (antireflexní vrstva, optický dělič, vysoce reflexní vrstvy, filtry – barevné či úzkopásmové).

Dále v diplomové práci najdeme kapitolu s názvem spektroskopická měření, která obsahuje popis spektrometrů využitých pro měření v této práci, jejich výhody a nevýhody, postup měření s těmito spektrometry a také postup měření s laserovým zdrojem na optické lavici. Spektrometry jsou měřicí přístroje používané ke kontrole spektrálních vlastností optických tenkých vrstev napařených na optickou součást. Sestava s laserovým zdrojem doplněná o otočný stolek a detektor napojený na přístroj k měření výkonu slouží k rychlé kontrole.

V diplomové práci se zabývám metodami měření používaných v Meoptě – optika s.r.o. pro měření spektrálních vlastností a to transmise (propustnosti) a reflexe (odrazivosti) tenkých vrstev na daných optických součástech (zrcátka, hranolu a dělicí kostce). Dále je také diplomová práce zaměřena na porovnání naměřených výsledků jednotlivých metod měření mezi sebou, s teoretickými předpoklady a s podmínkami uvedenými na technických výkresech jednotlivých měřených součástí.

Měření spektrálních vlastností v diplomové práci je realizováno na dvoucestném spektrometru pro měření reflexe a transmise v UV, VIS a NIR oblasti (od firmy PerkinElmer) a jednocestném spektrometru s Michelsonovým interferometrem měřícím v IR oblasti, který byl pro účely Meopty-optiky, s.r.o. doplněn o optické součásti pro měření VIS (od firmy Nicolet).

Jako další způsob používaný ke kontrole veličin popisujících spektrální vlastnosti optických tenkých vrstev v diplomové práci je použito měření na optické lavici s laserovým

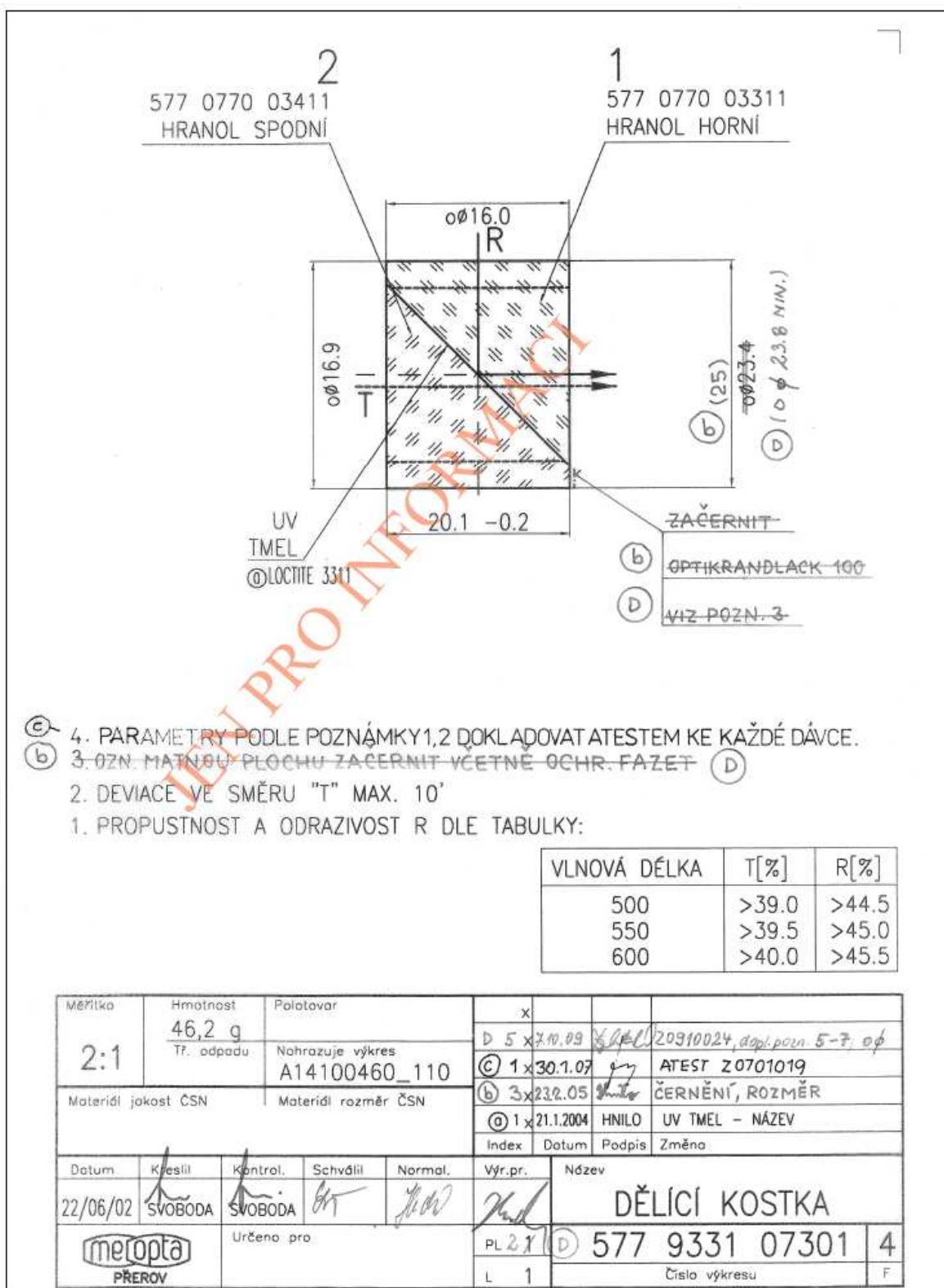
zdrojem.

Výsledky z jednotlivých metod měření jsem porovnávala a zjistila jsem, že nejmenší relativní chyba vznikala na spektrometru PerkinElmer λ 950s přípravkem URA. Tedy všech pět měření provedených na stejném kuse, za stejných podmínek mělo přibližně stejné naměřené hodnoty. Tato skutečnost je dána jednodušším uložením měřeného vzorku a to na výstupní štěrbinu a mechanickým nastavením optické soustavy. Podobně je tomu i při měření s RC přípravkem. Na rozdíl od měření na spektrometru Nicolet, PerkinElmer λ 900 s optickou lavicí a laserovým zdrojem kde je měřený kus potřeba výškově, stranově a úhlově nastavit v měřícím prostoru.

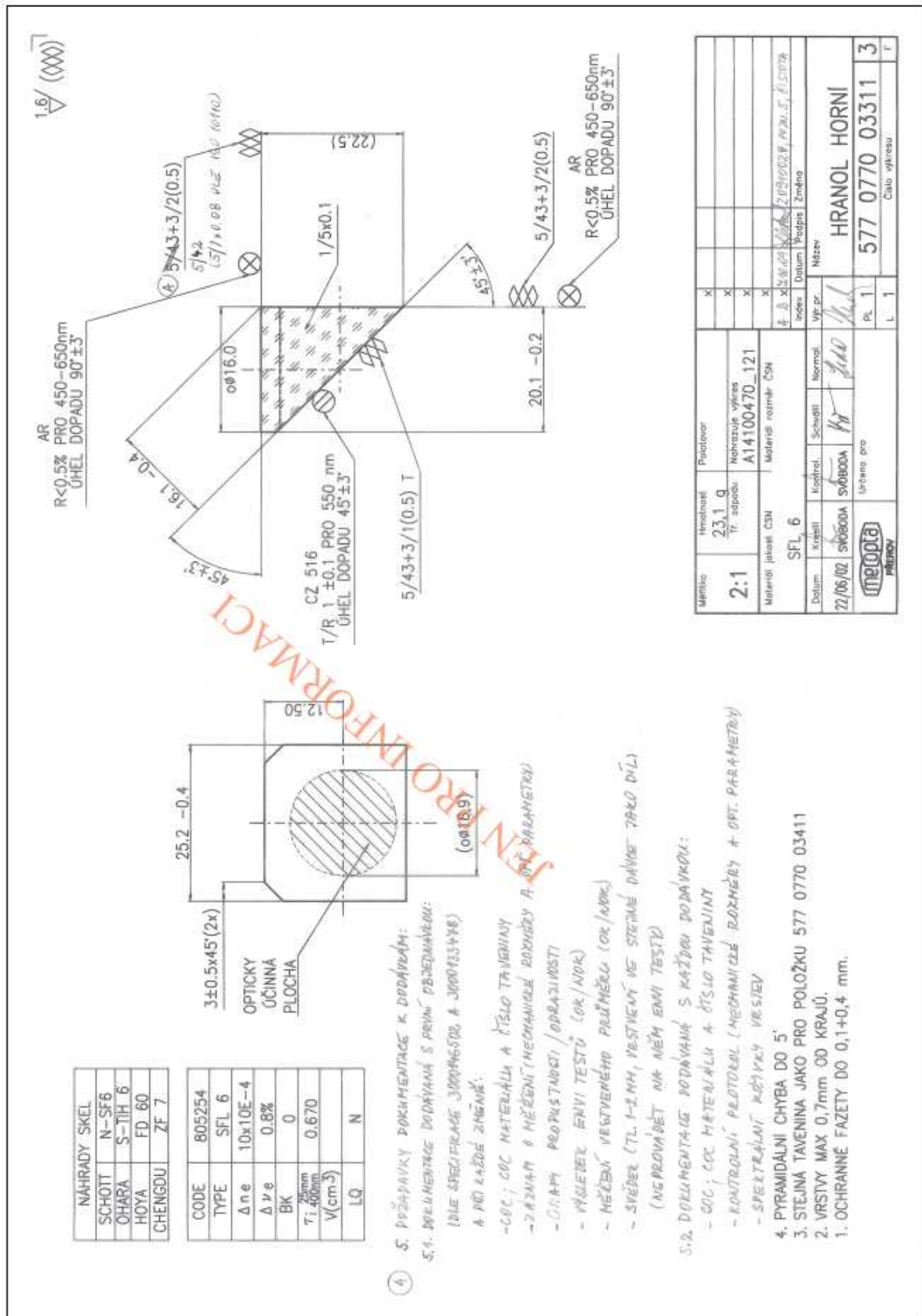
Systematická chyba se nejvíce projevovala při měření na optické lavici s laserovým zdrojem.

Naměřené výsledky téměř odpovídali teoretickým předpokladům až na výjimku měření antireflexe na jednotlivých vrstvách dělicí kostky, např. při měření antireflexe na vstupní ploše dělicí kostky byli naměřené výsledky na spektrometrech několikrát větší než teoretické výsledky.

Podmínky dané technickým výkresem byly splněny ve všech případech měření až na hranol kde jen v určitém intervalu vlnových délek naměřená hodnota odpovídala technickému výkresu.

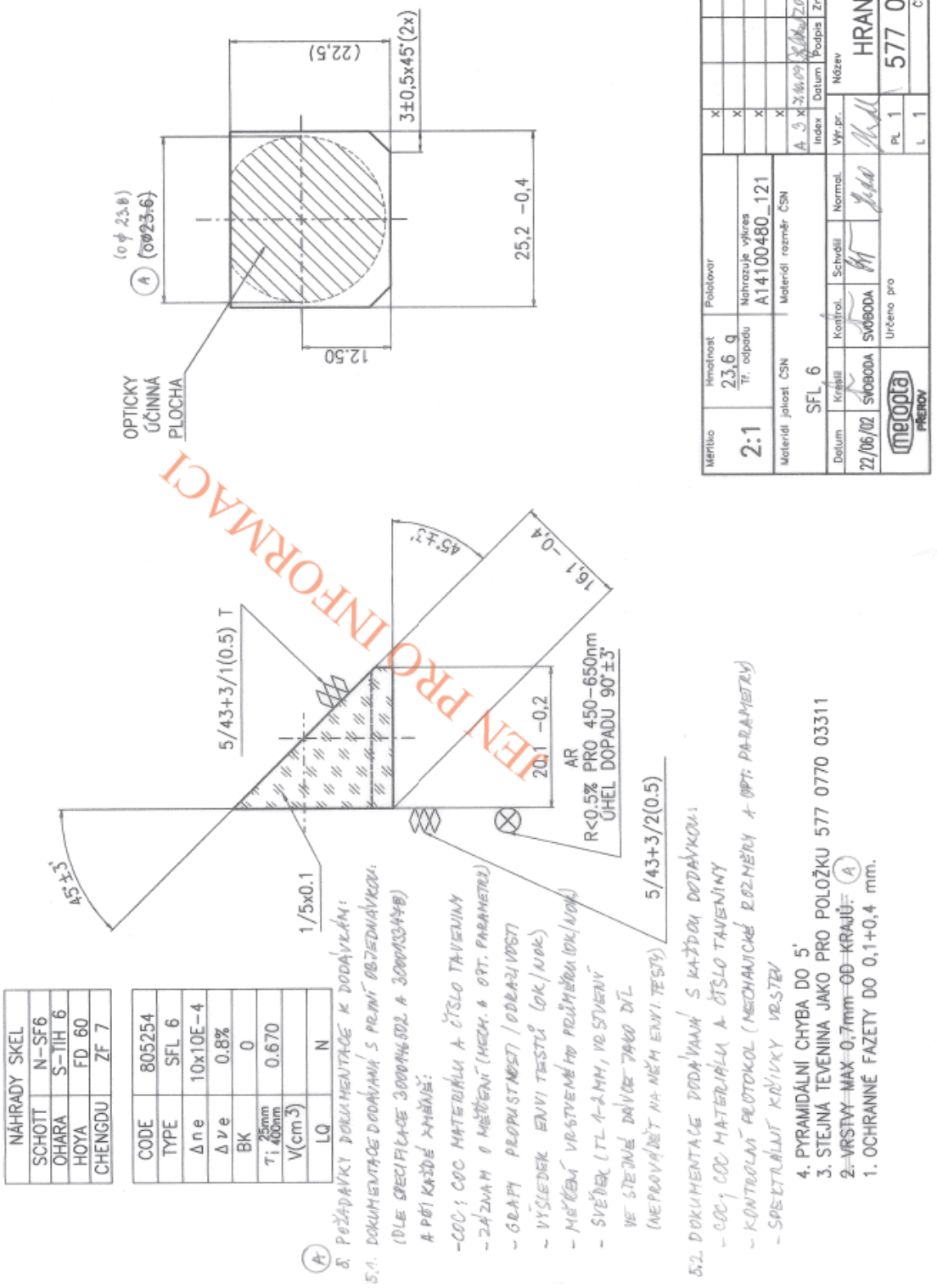


Obr. 73: Technický výkres děličí kostky – sestava



Obr. 74: Technický výkres dělící kostky – část 1

1.6/ (XXX)



NÁHRADY SKEL	
SCHOTT	N-SF6
OHARA	S-TIH 6
HOYA	FD 60
CHENGDU	ZF 7

CODE	805254
TYPE	SFL 6
Δne	10x10E-4
Δve	0.8%
BK	0
$T_{1, 400nm}^{25mm}$	0.670
V(cm ³)	
LQ	N

- 5.1. POŽADAVKY DOKUMENTACE K DODÁVKĚM:
 5.1.1. DOKUMENTACE DODÁVANÁ S PRVNÍ OBDOBŔNÁVKOU:
 (DLE SPECIFIKACE 300046502 A 300053448)
 A PŔI KAŽDĚ ZMĚNĚ:
 - COC; COC MATERIÁLU A ČÍSLO TAVENINY
 - ZÁZNAM O MĚŘENÍ (MECH. A OPT. PARAMETRY)
 - GRAFY PROPUSTNOSTI / ODRÁŽIVOSTI
 - VÝSLEDKŔ ENVI TESTŔ (OK/NOK)
 - MĚŘENÍ VĚSTVNĚHO PRŔJMĚRU (OK/NOK)
 - SVĚTEL (TL A-2MM, VE STVNĚNĚ
 VE STEJNĚ DÁVCE JAKO DĚL
 (NEPROVÁŘĚT NA MĚM ENVI TESTĚ) 5/43+3/2(0.5)

- 5.2. DOKUMENTACE DODÁVANÁ S KAŽDOU DODÁVKOU:
 - COC; COC MATERIÁLU A ČÍSLO TAVENINY
 - KONTROLNÍ PROTOKOL (MECHANICKĚ ROZMĚRY A OPT. PARAMETRY)
 - SPEKTÁLNÍ KŘÍVKY Vrstev
 4. PYRAMIDÁLNÍ CHYBA DO 5'
 3. STEJNÁ TEVENINA JAKO PRO POLOŽKU 577 0770 03311
 2. Vrstvy - MAX 0.7mm - OB - KRAJŔ: (A)
 1. OCHRANNĚ FAZETY DO 0,1+0,4 mm.

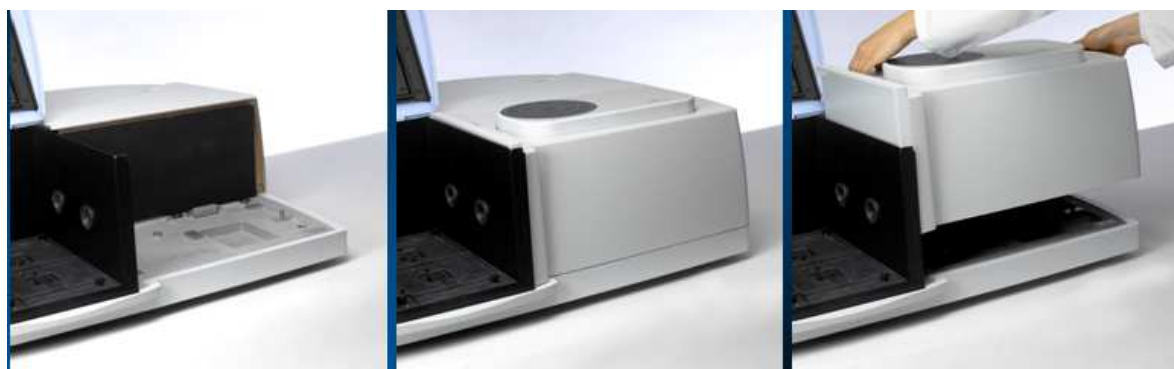
MĚŘÍTKO	Hmotnost	Podlevoř	X
2:1	23,6 g	Náhraduje výkres	X
	Tř. odpadu	A14100480_121	X
	Materiál jistost CSN	Materiál rozměr CSN	X
	SFL 6		X
Datum	Křesit	Kontrol.	Index
22/06/02	SVOBODA	SVOBODA	A 3 X 2 26/09 2006 20910029; pozv. 5. z. z.
	Určeno pro	Normal.	Podpis
			Změna
			Název
			PL 1
			L 1
			577 0770 03411
			HRANOL SPODNÍ
			Číslo výkresu
			F

Obr. 75: Technický výkres dělicí kostky – část 2

B. Fotografie a obrázky



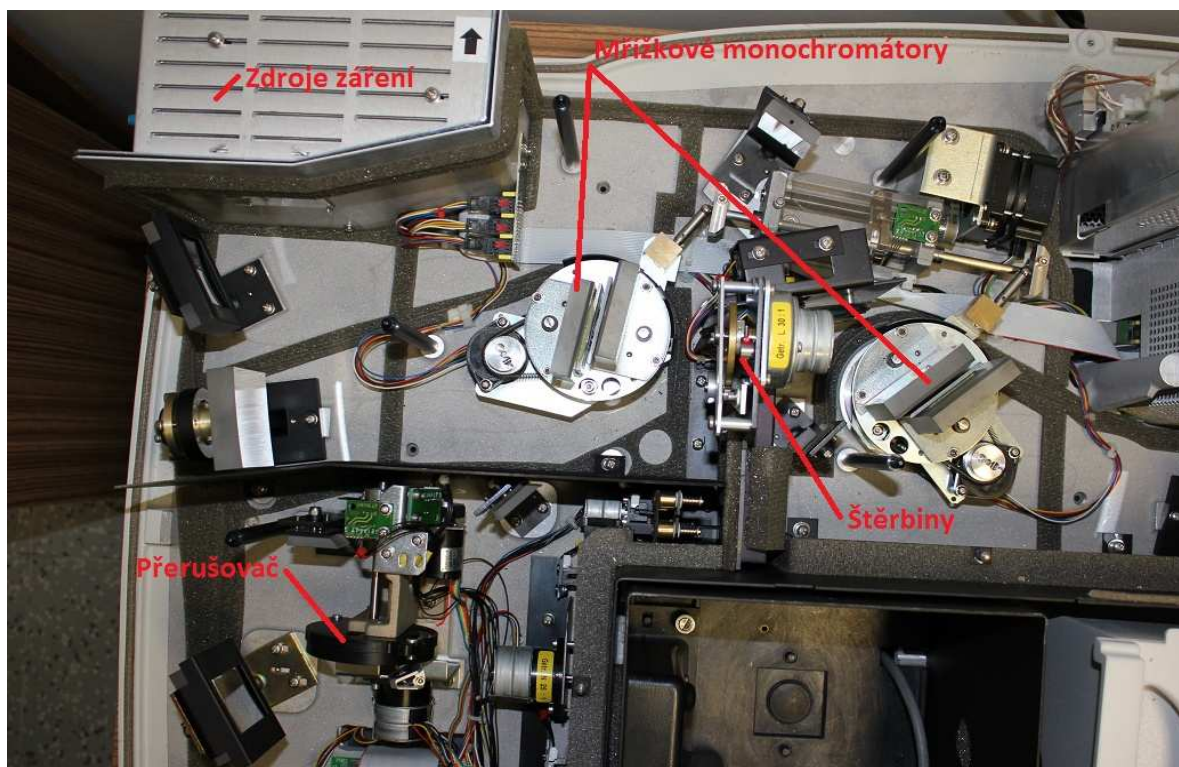
Obr. 76: Spektrometr PerkinElmer λ 950 URA používaný v Meoptě-optika, s.r.o.



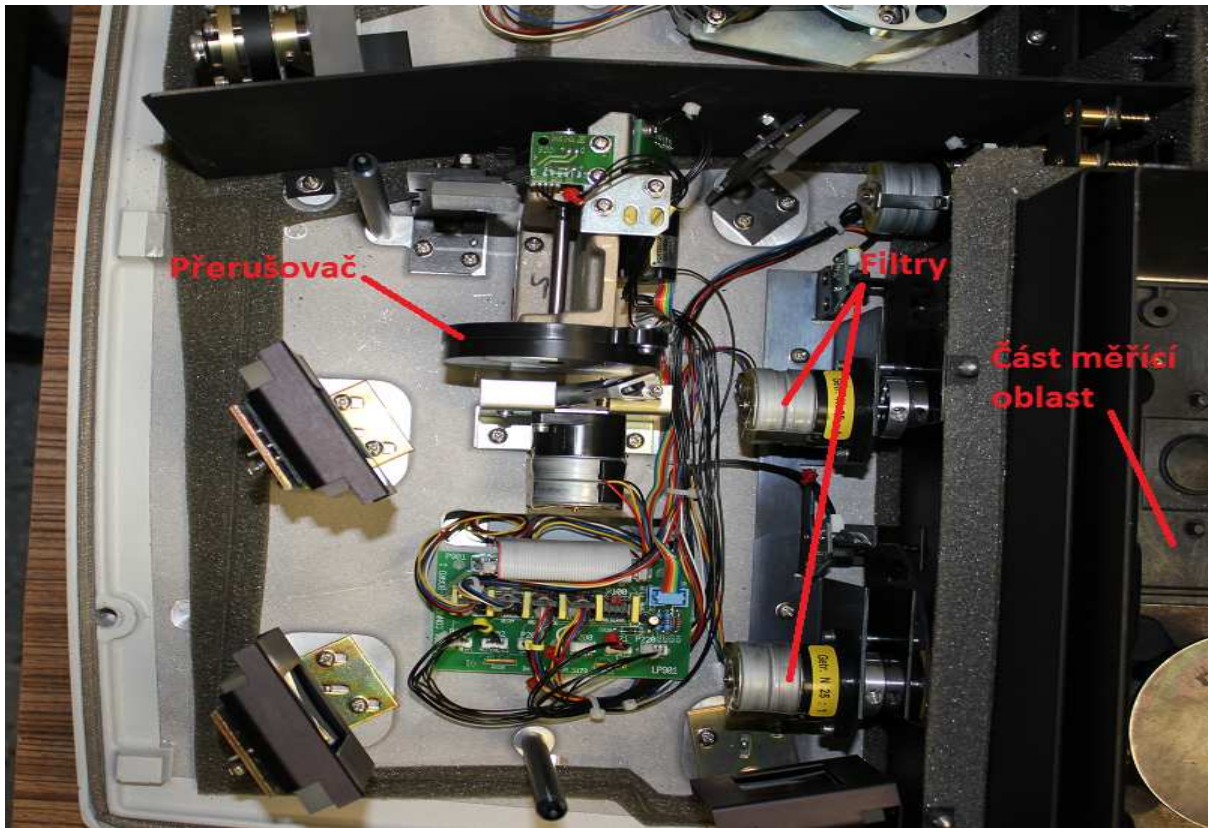
Obr. 77: Montáž přípravku URA (Převzato z [11])



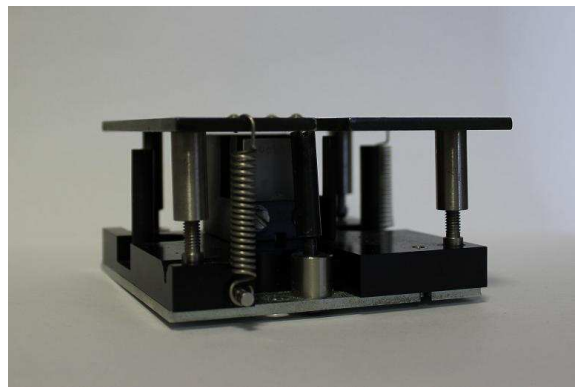
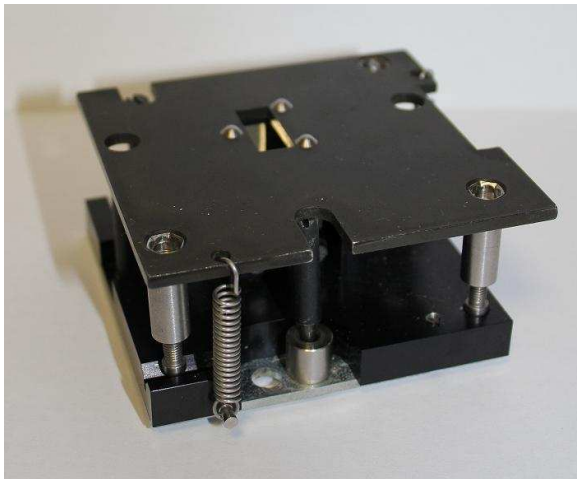
Obr. 78: Optická lavice uvnitř spektrometru PerkinElmer λ 950 používaný v Meoptě-optika, s.r.o.



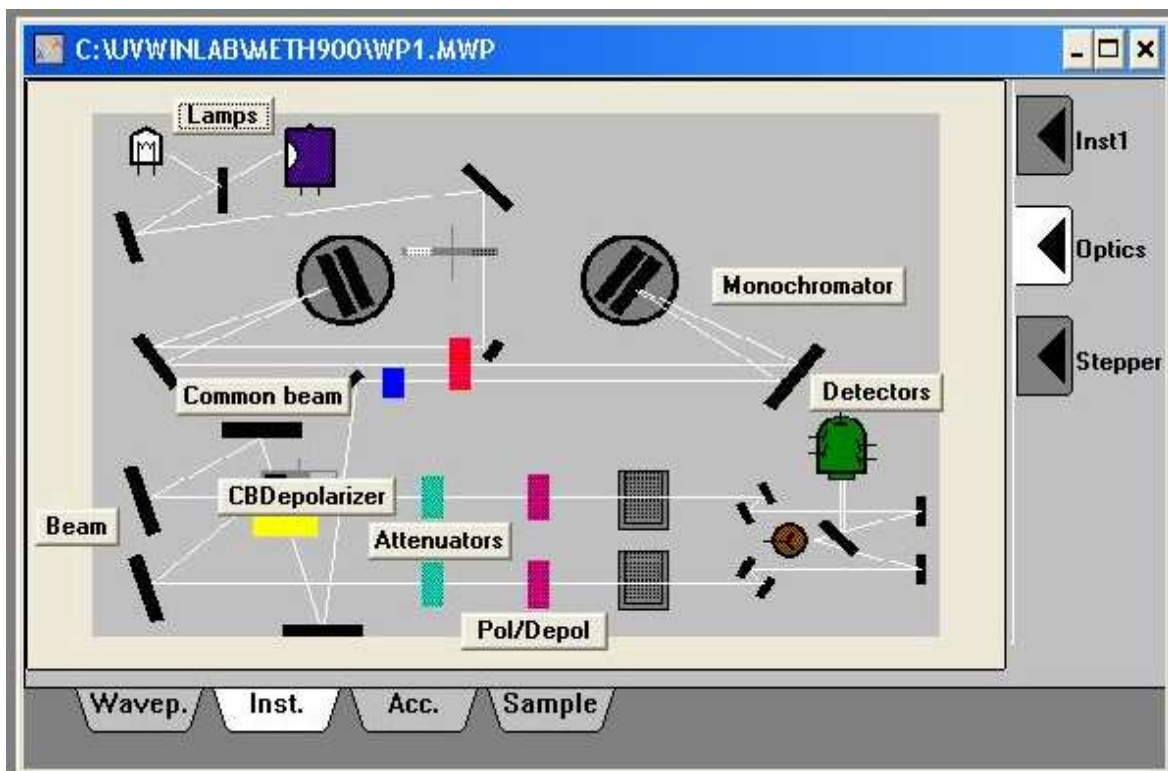
Obr. 79: Spektrometr PerkinElmer λ 950 URA ze vnitř první část používaný v Meoptě-optika, s.r.o.



Obr. 80: Spektrometr PerkinElmer λ 950 URA ze vnitř druhá část používaný v Meoptě-optika, s.r.o.



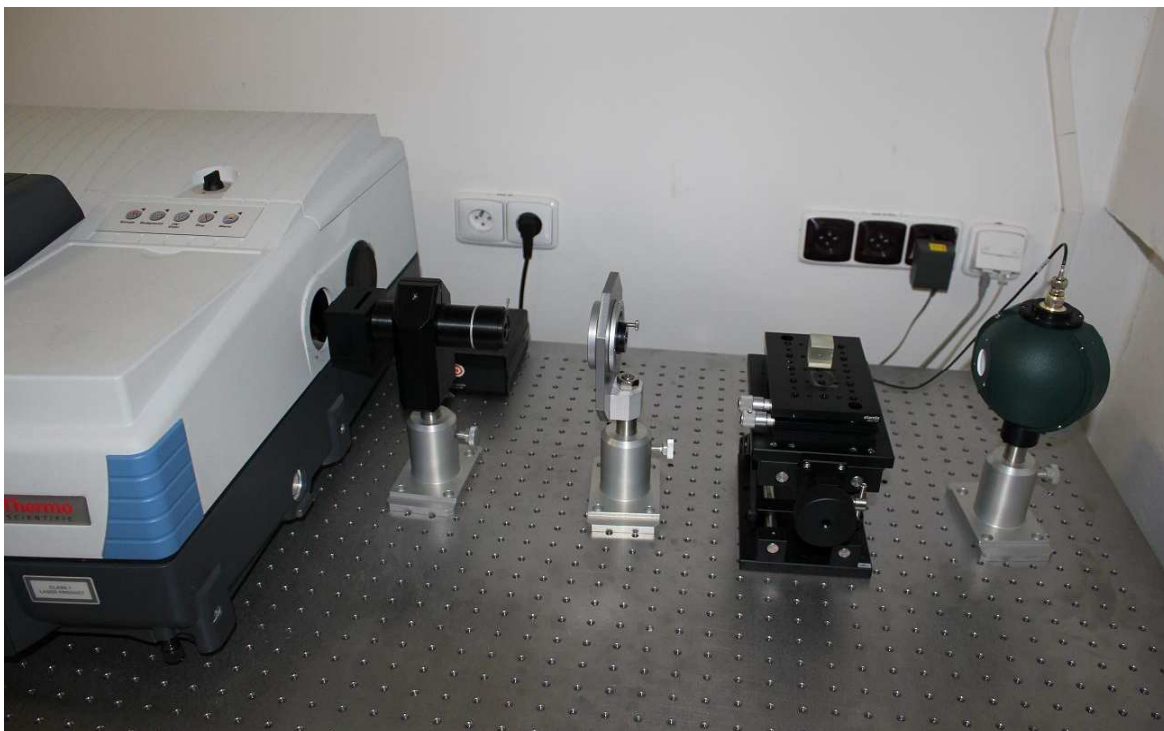
Obr. 81 a 82: RC přípravek používaný v Meoptě-optika, s.r.o.



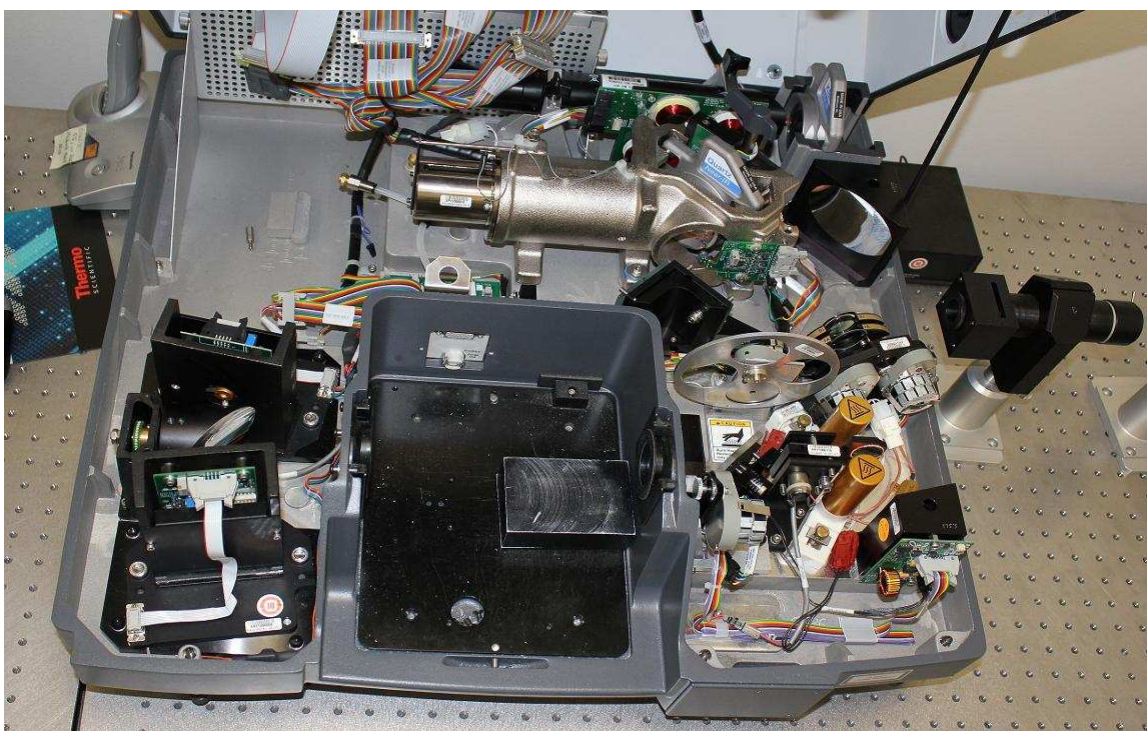
Obr. 83: Ukázka programu používaného při měření na spektrometru PerkinElmer λ 950 v Meoptě-optika, s.r.o.



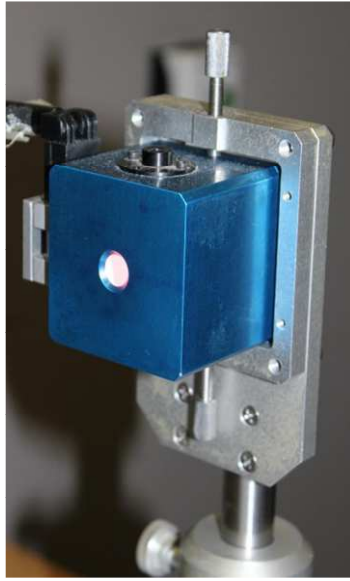
Obr. 84: Spektrometr Nicolet používaný v Meoptě-optika, s.r.o.



Obr. 85: Spektrometr Nicolet s vyvedeným svazkem na optickou lavici používaný v Meoptě-optika, s.r.o.



Obr. 86: Spektrometr Nicolet ze vnitř používaný v Meoptě-optika, s.r.o.



Obr. 87, 88, 89: Integrovní koule a polarizátor používaný v Meoptě-optika, s.r.o.



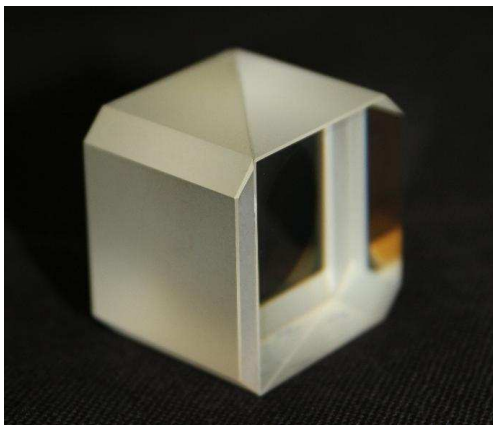
Obr. 90: Sestava pro měření laserem



Obr. 91: Měřené zrcátko



Obr. 92 a 93: Měřený hranol



Obr. 94 a 95: Měřená dělicí kostka

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.: *Optické přístroje*, Olomouc 2011
- [4] Nováková, M.: *Napařování a měření tenkých vrstev v UV oblasti* – Bakalářská práce, PŘF UP Olomouc 2010
- [5] Sochor, V.: *Lasery a koherentní svazky*, Praha 1990
- [6] Saleh, B. E. A., Teich, M. C.: *Základy fotoniky*, Matfyzpress, Praha 1994
- [7] Křepelka, J.: *Optika tenkých vrstev*, Olomouc 1993
- [8] Vrbová, M. a kolektiv, Oborová encyklopedie, *Lasery a moderní optika*, Praha 1997
- [9] Bouchal, Z.: *Optika část I* – učební pomůcka pro studenty oborů, Olomouc
- [10] Materiály dodané k spektrometru Nicolet 6700
- [11] *Lambda UV/Vis/NIR and UV/Vis Spectrophotometers* - materiály k PerkinElmer

Internet:

- [12] http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum (27. 01. 2011)
- [13] http://polar-peza.euweb.cz/zpusoby_polarizace.html (12. 09. 2011)
- [14] http://www.sci.muni.cz/mineralogie/kap_4_3_optika/polarizace.htm (15. 09. 2011)
- [15] http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_u323.pdf (15. 09. 2011)
- [16] <http://artemis.osu.cz/voptp/skriptum/kap07.pdf> (30. 03. 2012)

Internetové zdroje obrázků použitých v diplomové práci:

- [17] http://cs.wikipedia.org/wiki/Absolutn%C4%9B_%C4%8Dern%C3%A9_t%C4%9Bleso - Obr. 2 (08. 02. 2011)
- [18] http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum - Obr. 3 (27. 01. 2011)
- [19] <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Absorbance> - Obr. 5 (19. 02. 2012)
- [20] <http://www.jiast.cz/clanky/svetlo-iv-interference-vlneni> - Obr. 6, 7, 8 (01. 09. 2011)
- [21] http://cs.wikipedia.org/wiki/Rozklad_sv%C4%9Btla - Obr. 9 (05. 03. 2009)
- [22] <http://www.jiast.cz/clanky/svetlo-vi-difrakce-svetla> - Obr. 11, 12 (01. 09. 2011)
- [23] <http://forum.matweb.cz/viewtopic.php?pid=95600> - Obr. 14 (28. 06. 2012)
- [24] http://technet.idnes.cz/tec_foto.aspx?c=A071025_103506_tec_foto_jlb – Obr. 15 až 18 (31. 03. 2012)

- [25] http://polar-peza.euweb.cz/zpusoby_polarizace.html - Obr. 19, 20, 21 (01. 09. 2011)
- [26] http://en.wikipedia.org/wiki/Nicol_prism - Obr. 22 (15. 09. 2011)
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Glan%E2%80%93Thompson_prism - Obr. 23
(15. 09. 2011)
- [28] http://en.wikipedia.org/wiki/Wollaston_prism - Obr. 24 (15. 09. 2011)
- [29] <http://olisweb.com/products/accessories/integratingsphere.php> - Obr. 38, 39
(06. 03. 2009)