

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA OPTIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření reflexe a antireflexe na spektrofotometrech PerkinElmer
Lambda 950 a Nicolet 6700 FT-IR.



Vypracoval:	Daniel Hroch
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	1701R029 Optika a optoelektronika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí bakalářské práce:	RNDr. Ing. Jan Podloucký
Termín odevzdání práce:	květen 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Měření reflexe a antireflexe na spektrofotometrech PerkinElmer Lambda 950 a Nicolet 6700 FT-IR.“ vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Ing. Jana Podlouckého a konzultanta Mgr. Jiřího Kyvalského, s použitím uvedené literatury.

V Olomouci dne 20. května 2013

.....
Daniel Hroch

Poděkování:

Mé poděkování patří především vedoucímu bakalářské práce RNDr. Ing. Janu Podlouckému, za odborné vedení práce, trpělivost a ochotu vyjít mi vstříc. Dále pak děkuji konzultantovi Mgr. Jiřímu Kyvalskému za podporu a vytváření příjemné atmosféry na pracovišti ve firmě Meopta – optika, s.r.o. a za jeho věcné konstruktivní komentáře při vypracovávání práce. V neposlední řadě děkuji firmě Meopta – optika, s.r.o. za umožnění vypracovat bakalářskou práci právě zde.

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora: Daniel Hroch
Název práce: Měření reflexe a antireflexe na spektrofotometrech PerkinElmer Lambda 950 a Nicolet 6700 FT-IR.
Typ práce: Bakalářská
Pracoviště: Meopta – optika, s.r.o.
Vedoucí práce: RNDr. Ing. Jan Podloucký
Konzultant práce: Mgr. Jiří Kyvalský
Rok obhajoby práce: 2013
Abstrakt: V práci je popsán princip měření na spektrofotometru Nicolet 6700 FT-IR. Byly změřeny vlastnosti vybraných optických prvků a výsledky byly zhodnoceny a porovnány s výsledky naměřenými na spektrofotometru PerkinElmer Lambda 950. K měření jsem využil přípravky RC a URA (Universal Reflectance Accessory) a všechna měření proběhla pro téměř kolmý dopad (8°) pro světlo polarizované v rovině svírající úhel 45° s rovinou dopadu. Měření jsem prováděl na spektrofotometrech ve společnosti Meopta - optika, s.r.o.
Klíčová slova: spektrum, spektrofotometr, Fourierova transformace, PerkinElmer, Nicolet, přípravek URA, VW, RC, absolutní, relativní odrazivost, propustnost, Michelsonův interferometr, monochromátor, infračervená oblast
Počet stran: 40
Jazyk: český

Bibliographical identification:

Author's first name and surname: Daniel Hroch
Title: Measurement of reflection and antireflection with spectrophotometer PerkinElmer Lambda 950 and Nicolet 6700 FT-IR.

Type of thesis: Bachelor
Department: Meopta – optika, s.r.o.
Supervisor: RNDr. Ing. Jan Podloucký
Consultant: Mgr. Jiří Kyvalský
The year of presentation: 2013
Abstract: The work describes the measurement principle of the spectrophotometer Nicolet 6700 FT-IR. There were measured optical elements and the results were evaluated and compared with results from spectrophotometer PerkinElmer 950. We used special accessories to measure reflectance namely RC and URA (Universal Reflectance Accessory). All measurements were made for normal incidence (8°) and for light polarized in the plane at angle of 45° with the plane of incidence. Measurements were made in the company Meopta - optika, s.r.o.

Keywords: spectrum, spectrophotometer, Fourier transform, PerkinElmer, Nicolet, accessory URA, VW, RC, absolute and relative reflectance, transmittance, Michelson interferometer, monochromator, infrared spectrum.

Number of pages: 40
Language: Czech

Obsah

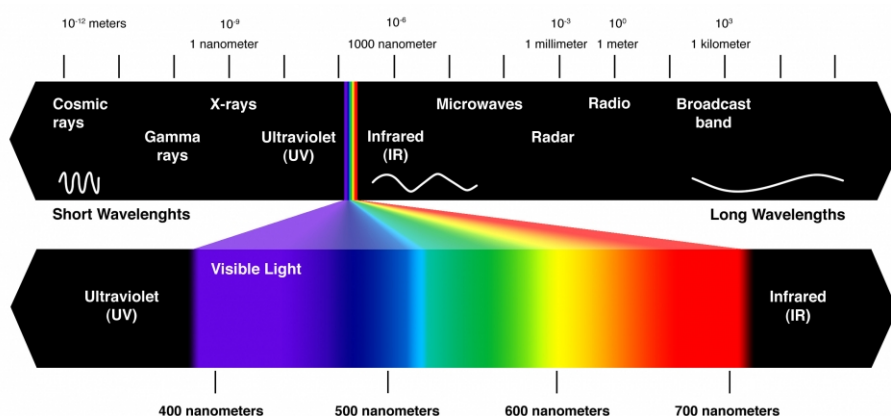
Úvod	7
1 Vlastnosti elektromagnetického záření	8
1.1 Charakteristické veličiny	8
1.2 Spektra	9
1.3 Černé těleso	10
2 Parametry spektra	12
3 Spektrofotometry	16
3.1 PerkinElmer Lambda 950	16
3.1.1 Konstrukce	16
3.2 Princip Fourierovského spektrofotometru	19
3.3 Nicolet 6700 FT-IR	20
3.3.1 Konstrukce	20
3.4 Fourierova transformace	23
4 Absolutní a relativní měření odrazivosti	24
4.1 RC přípravek	24
4.2 V-W přípravek	25
4.3 URA – Universal Reflectance Accessory	25
5 Software	28
6 Praktická část	30
6.1 Měřené vzorky	30
6.2 Průběh měření	30
6.3 Výsledky měření	32
6.4 Závěr	37
Reference	40

Úvod

Spektroskopie je věda zabývající se absorpcí a emisí světla v závislosti na vlnové délce záření. Termín optická spektroskopie může být přiřazen k jakémukoli druhu interakce fotonu s hmotou [13]. Spektroskopie se využívá ke studiu biologických tkání či ke studiu chemického složení a koncentrace roztoků. V oblasti optiky můžeme pomocí spektroskopie zkoumat vlastnosti optických prvků jako například odrazivost a propustnost. Spektrální měření je nedílnou součástí vývoje nových tenkých vrstev s požadovanými vlastnostmi. Díky spektroskopii můžeme zkoumat strukturu a uspořádání molekul nebo identifikovat neznámé materiály.

Spektrum představuje soubor hodnot reprezentujících závislost některých vlastností elektromagnetického záření na jeho vlnové délce resp. kmitočtu. V této práci budeme chápat spektrum jako závislost odrazivosti optického prvku na vlnové délce.

Cílem bakalářské práce popsat princip měření na spektrofotometru Nicolet, naučit se s ním zacházet a porovnat výsledky měření s výsledky na spektrofotometru PerkinElmer. Úkolem bylo změřit odrazivost pro kolmý dopad u šesti optických prvků, kontrolních vzorků – optické vzorky z určitého materiálu, v malém provedení, určené k měření spektrálních vlastností. Měření pomocí přípravků RC, VW a URA, všechna měření budou v ideálním případě dávat shodné výsledky. Předpokládáme, že nejpřesnější budou výsledky s použitím přípravku URA, protože na přípravcích VW a RC dochází k ruční manipulaci s měřeným vzorkem a měřicí soustavou.

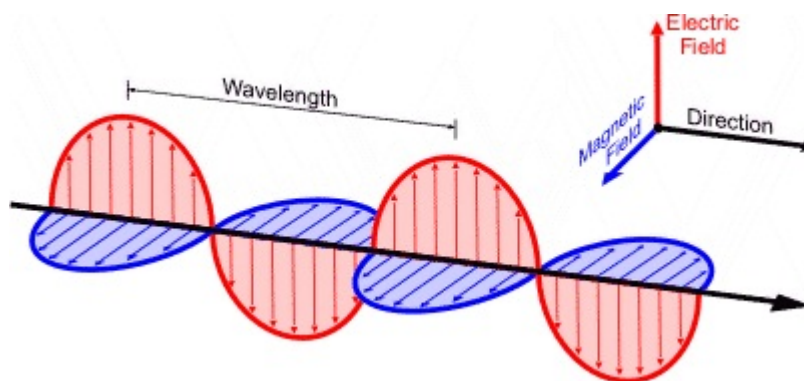


Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického záření

1 | Vlastnosti elektromagnetického záření

1.1 Charakteristické veličiny

Optické záření popisujeme jako elektromagnetickou vlnu, která se skládá ze dvou složek, vektoru elektrické intenzity \vec{E} a vektoru magnetické intenzity \vec{H} , pohybujících se kolmo ke směru šíření. Oba vektory \vec{E} , \vec{H} jsou kolmé i vzájemně. Směr šíření je dán vektorem \vec{k} .



Obrázek 1.1: vyobrazení elektromagnetického záření.

Pohyb vlny je cyklický a proto můžeme definovat charakterizující veličiny jako vlnová délka, perioda, frekvence a vlnové číslo.

Perioda T [s] určuje délku trvání jednoho cyklu.

Frekvence $\nu = 1/T$ [$s^{-1} = \text{Hz}$], určuje počet cyklů za jednotku času.

Vlnové číslo w [cm^{-1}] určuje počet vln (počet maxim) na jednotku vzdálenosti, zpravidla na jeden centimetr. Platí, že $w = 1/\lambda$.

Vlnová délka λ [m] je vzdálenost mezi začátkem a koncem jednoho cyklu. Frekvence ν je s vlnovou délkou svázána vztahem $c = \lambda\nu$ [$m \cdot s^{-1}$], kde c je rychlost světla (přesněji elektromagnetického záření) ve vakuu.

1.2 Spektra

Podle vlnové délky rozlišujeme různé spektrální oblasti viz. obrázek 1. Spektrální oblasti vymezuje každá literatura poněkud odlišně a vzájemně se mohou překrývat. Pro optiku jsou základní tři oblasti:

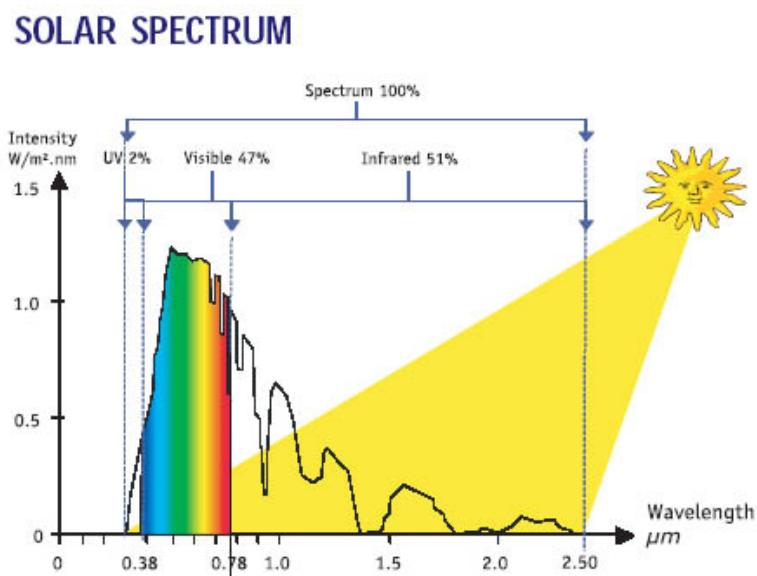
- **UV** Ultra Violet, ultrafialové ležící v rozmezí 10 nm – 360 nm.
- **VIS** Visible, viditelné ležící v rozmezí 360 nm – 780 nm.
- **IR** Infra Red, infračervené ležící v rozmezí 780 nm – 1 mm, které dále dělíme na [11]

NWIR Near Wavelength Infrared, **blízké** 780 nm – 1400 nm

MWIR Mid Wavelength Infrared, **střední** 1400 nm – 3000 nm

FWIR Far Wavelength Infrared, **daleké** 3000 nm – 1 mm

Příkladem spektra je spektrální hustota ozáření zemského povrchu Sluncem. Z obrázku



Obrázek 1.2: Spektrální hustota ozáření zemského povrchu Sluncem

1.2 vidíme, že více než polovina přenášené energie dopadající na zemský povrch, vyzařované Sluncem, se nachází v infračervené oblasti. Nejvíce energie je však přenášeno v pásmu kolem 500 nm, v zelené části viditelného spektra. Ve vakuu se vlnění šíří rychlostí světla $c = 299\,792\,458$ m/s. Platí, že $c = \lambda \cdot f$ je konstantní. Zvýší-li se tedy vlnová délka, sníží se frekvence a naopak. Při průchodu záření do hmotného prostředí zůstává konstantní frekvence, a změní se rychlost šíření spolu s vlnovou délkou.

Rychlost šíření elmag. záření v materiálu je menší než ve vakuu. Tuto vlastnost zachycujeme vztahem pro index lomu $n = c/v$, kde v je rychlost záření v hmotném prostředí. Spektra dělíme např. na:

- Spojitá, jsou tvořena spojitým intervalem vlnových délek. Zdroji jsou Slunce, žárovky, oheň...
- Čárová, jsou vyzařována plyny zahřátými na vysokou teplotu (nebo ochlazenými na velmi nízkou). Jejich původ je dán kvantováním energetických hladin elektronů. Díky spektrální analýze můžeme podle čárového spektra přesně určit daný prvek, pro který je spektrum charakteristické.
- Pásová, jsou kombinací dvou předešlých.

A dále na:

- Emisní, to jsou ta, která jsou vyzařována ven, do okolí.
- Absorpční, to jsou ta, kdy je daným optickým prvkem část záření pohlcována. Tedy objekt některé vlnové délky pohlcuje a některé odráží nebo propouští.

1.3 Černé těleso

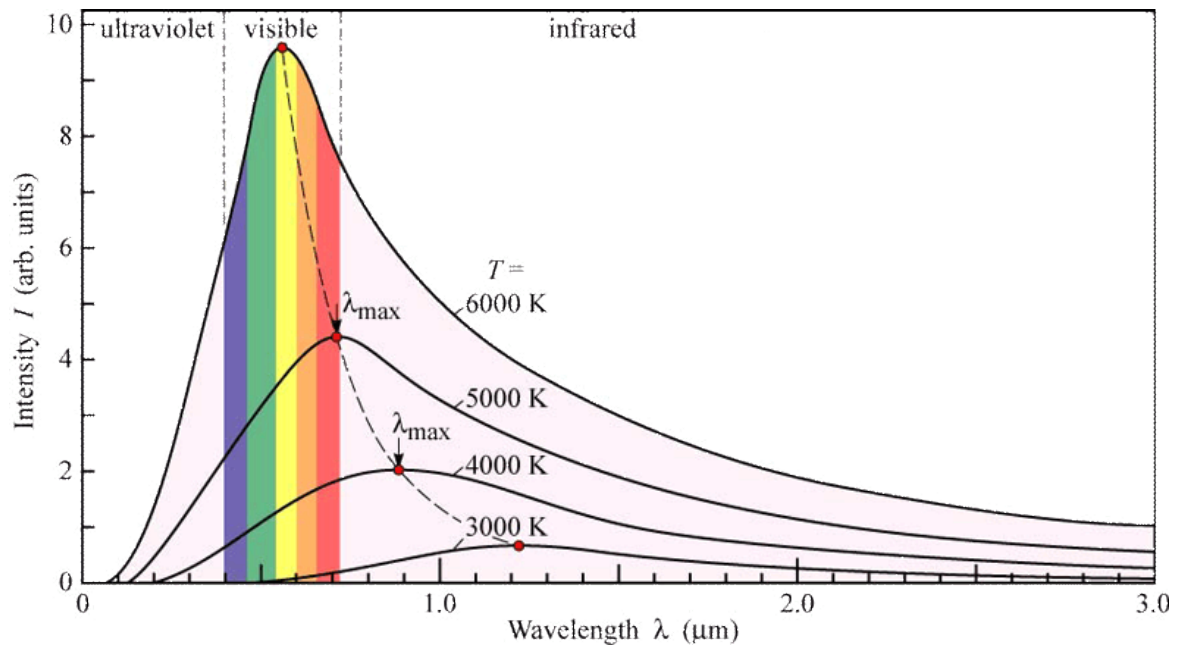
Černé těleso je idealizovaný pojem tělesa, které pohlcuje záření všech vlnových délek. V termodynamické rovnováze musí kterékoli těleso absorbující světlo také emitovat odpovídající záření. Model černého tělesa můžeme využít k popisu zdroje záření, zahřátého na vysokou teplotu (například žárovky).[13] Planck ukázal, že spektrální výkon zdroje záření je dán vztahem

$$E(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi Vhc}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} d\lambda \quad (1.1)$$

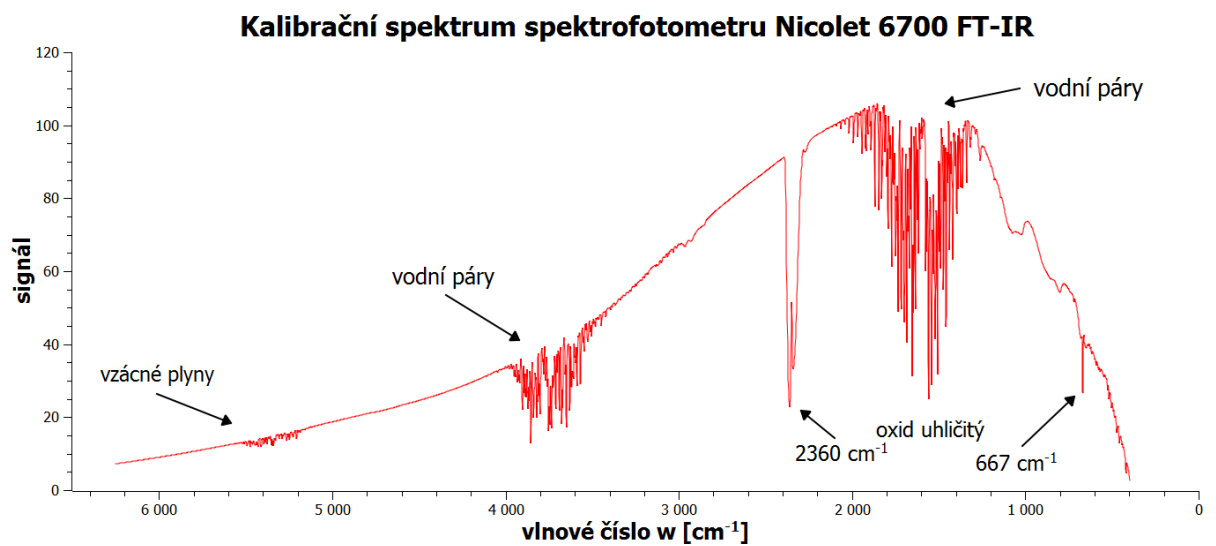
kde h je Planckova konstanta, k je Boltzmanova konstanta, V je objem tělesa, T je teplota a λ vlnová délka. Planckův vyzařovací zákon určuje, jak je vyzařovaný výkon závislý na vlnové délce[9].

Vlnová délka odpovídající maximu spektrální hustoty zářivého výkonu je formulována Wienovým zákonem

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \times 10^6}{T} [\text{nm}]$$



Obrázek 1.3: Rozložení výkonu tepelného záření ve spektru černého tělesa o teplotě T [K]

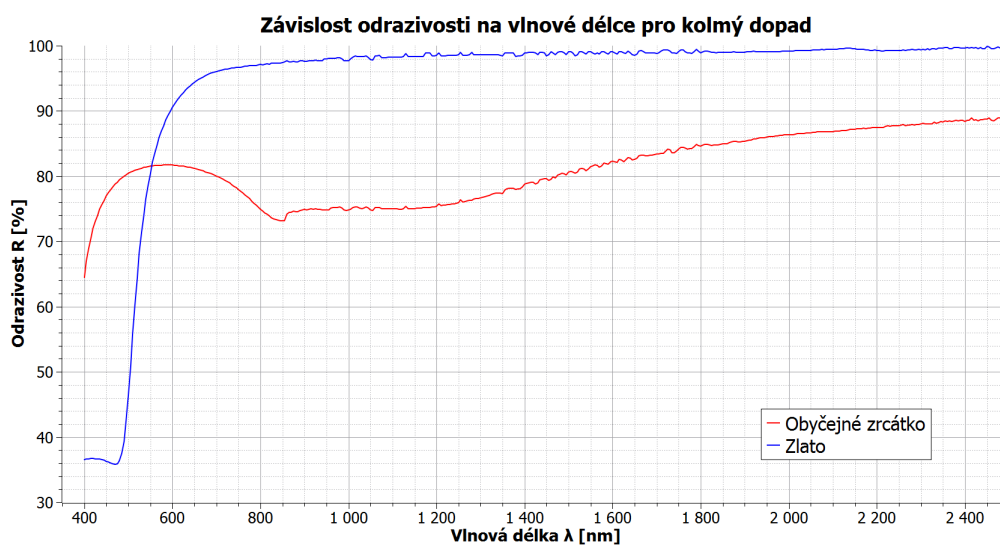


Obrázek 1.4: Kalibrační spektrum zdroje spektrofotometru Nicolet

2 | Parametry spektra

Na obrázku 1.4 je vyobrazeno kalibrační spektrum spektrofotometru Nicolet, tedy bez měřeného vzorku. Ve spektru jsou obsaženy příspěvky spektrálních vlastností zdroje, komponent přístroje a atmosferických par, např. vodní páry, oxid uhličitý či vzácné plyny. Komponenty přístroje přispívající k tvaru kalibračního spektra jsou zejména zdroj, dělič, zrcátka a detektor. Měření pro kratší vlnové délky bychom zjistili, že kolem délky 250 nm propustnost klesá na nulu, což je způsobeno absorpcí děliče z KBr [12]. (Viz. kapitola 3.3).

Ve své práci se zabývám odrazivostí optických prvků v IČ oblasti. Na následujícím obrázku vidíme vyobrazenou závislost odrazivosti pozlacené destičky a obyčejného koupelnového zrcátka, s vrstvou hliníku na zadní straně, v dané IČ oblasti.



Obrázek 2.1: Odrazivost pozlacené destičky a zrcátka (hliník na zadní stěně).

Spektrum na obrázku je vyneseno jako závislost odrazivosti na vlnové délce. Běžně se však můžeme setkat s konvencí, kde se vyobrazuje na ose x závislost na vlnovém čísle a na ose y absorpance nebo odrazivost. To, jakou závislost budeme vynášet, závisí na vlastnostech, které chceme měřit. Pokud zkoumáme neznámý materiál a chceme jeho spektrum porovnat se spektrem v databázi za účelem identifikace, použijeme závislost absorpance na vlnovém čísle. **Absorpance, propustnost a odrazivost** [2] jsou vzájemně úzce propojené veličiny. Jejich hodnoty závisí mimo jiné na úhlu do-

padu.

Úhel dopadu je definován jako úhel mezi směrovým vektorem dopadajícího záření a normálovým vektorem plochy v místě dopadu. Vzájemné vztahy mezi odrazivostí a úhlem dopadu popisují Fresnelovy vztahy. Svá měření jsem však prováděl pro téměř kolmý dopad (8°).

Platí zákon odrazu, který říká, že úhel odrazu je roven úhlu dopadu a že tento odražený paprsek leží v rovině dopadu.

Rovina dopadu je vymezena směrovým vektorem dopadajícího záření a normálovým vektorem plochy v místě dopadu.

Propustnost a odrazivost charakterizujeme poměrem dopadajícího a odraženého resp. propuštěného výkonu. Výkon vyjadřujeme Poyntingovým vektorem, který udává výkon přenášený emag. vlněním jednotkovým průřezem za jednotku času.

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}, \quad (2.1)$$

kde \vec{B} je vektor magnetické indukce [4] a μ_0 je permeabilita vakua. Dále víme, že hustota zářivého toku (W/m^2) je rovna časové střední hodnotě tohoto vektoru:

$$I = \langle S \rangle \quad (2.2)$$

Tato rovnice udává výkon prošlý jednotkovou plochou kolmou k vektoru \vec{S} za jednotku času. Z obrázku 2.2 si definujeme charakterizující veličiny pomocí dopadajícího, odraženého a propuštěného výkonu v závislosti na úhlu dopadu resp. úhlu prošlého svazku.

$I_i A \cos \alpha$ – výkon dopadajícího svazku

$I_r A \cos \alpha$ – výkon odraženého svazku

$I_t A \cos \beta$ – výkon propuštěného svazku

A – jednotková plocha rozhraní

Odrazivost: Je definována jako poměr výkonu odraženého svazku ku výkonu dopadajícího svazku. Pro kolmý dopad platí

$$R[\%] = \frac{I_r}{I_i} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Přesněji:

$$R = \frac{I_r A \cos \alpha}{I_i A \cos \alpha} = \frac{I_r}{I_i} = \frac{\frac{1}{2} v_r \epsilon_i E_{0r}^2}{\frac{1}{2} v_i \epsilon_i E_{0i}^2} = \left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)^2 \quad (2.4)$$

kde v je rychlost šíření záření v daném prostředí a ϵ je permitivita daného prostředí. Odrazivost můžeme také vyjádřit pomocí indexů lomu Fresnelovým vzorcem pro kolmý

dopad [6].

$$R = \left(\frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right)^2 \quad (2.5)$$

kde n_i – index lomu prostředí, n_t – index lomu měřeného vzorku.

Propustnost: Je definována jako poměr propuštěného výkonu ku dopadajícímu výkonu. Propustnost pro kolmý dopad je dána vztahem:

$$T[\%] = \frac{I_t}{I_i} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Přesněji:

$$T = \frac{I_t A \cos \beta}{I_i A \cos \alpha} = \frac{\frac{1}{2} v_t \epsilon_t \cos \beta E_{0t}^2}{\frac{1}{2} v_i \epsilon_i \cos \alpha E_{0i}^2} = \frac{\sqrt{\epsilon_t} \cos \beta}{\sqrt{\epsilon_i} \cos \alpha} \left(\frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)^2 \quad (2.7)$$

přičemž jsme využili vztah $\mu_0 \epsilon_t = 1/v_t^2$.

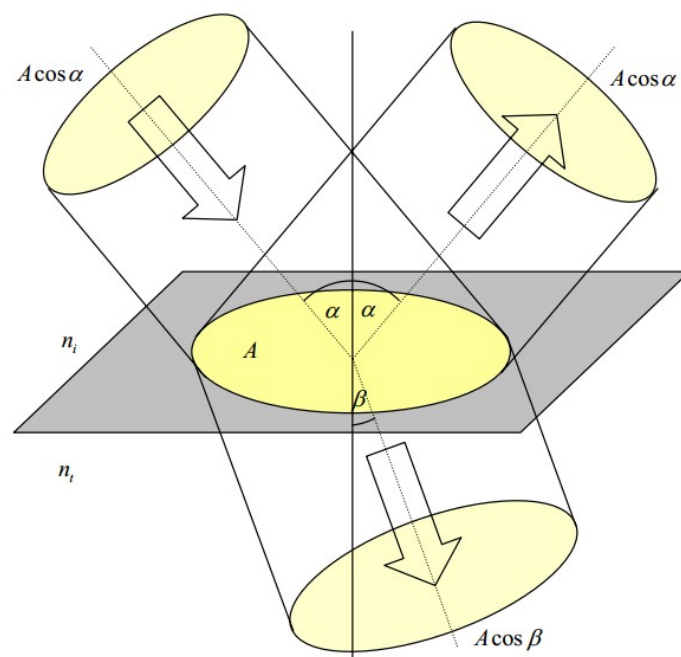
Pokud jsou obě dielektrika bezztrátová, nedochází k absorpci a platí, že $R + T = 1$. Vzhledem k tomu, že budeme měřit hodnoty jen pro téměř kolmý dopad, stačí využít zjednodušené vztahy.

Absorbance: Udává míru, s jakou zkoumaný materiál pohlcuje záření příslušné vlnové délky. Míra absorbance se odvíjí od použitého materiálu, ale obecně lze říci, že čím je tloušťka větší, tím je jeho absorbance vyšší. V mnoha optických systémech tedy máme zájem, aby optické komponenty byly v zájmu přenesení více energie, co nejtenčí. Absorbanci vyjádříme vztahem

$$A = \log \frac{I_i}{I_t} \quad (2.8)$$

nebo také pomocí propustnosti

$$A = -\log T. \quad (2.9)$$



Obrázek 2.2: Odraz a průchod světelného svazku rozhraním

3 | Spektrofotometry

Ve své práci porovnávám dva spektrofotometry pracující na různých principech. První, PerkinElmer, ze zdroje postupně selektuje konkrétní vlnové délky pomocí difrakční mřížky a následně detekuje záření odražené od zkoumaného objektu. Nicolet, využívá principu Michelsonova interferometru a Fourierovy transformace. Nicolet měří celý požadovaný spektrální rozsah najednou a měření je tak otázka pár vteřin.

3.1 PerkinElmer Lambda 950

Jedná se o dvousvazkový spektrofotometr se spektrálním rozsahem 175 až 3300 nm. Rozlišení pro UV/VIS oblast $\leq 0.05\text{nm}$ a pro blízkou IČ oblast. $\leq 0.2\text{nm}^1$.

3.1.1 Konstrukce

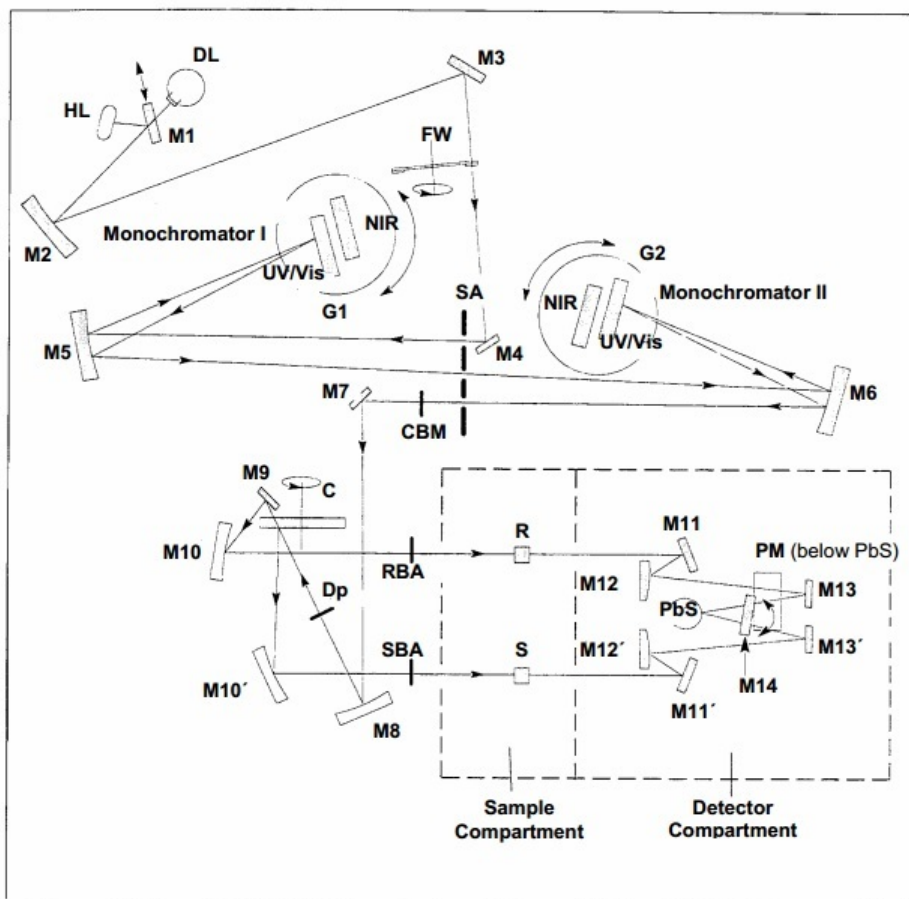
PerkinElmer na pracovišti spektroskopické laboratoře je ve třech provedeních:

- **základní sestava** – v této sestavě se PerkinElmer dodává, je zde neměnná konfigurace, malý měřicí prostor (na obrázku 3.1 oblast Sample Compartment) a záření dopadá přímo na detektor přes soustavu optických členů (na obrázku 3.1 oblast Detector Compartment)
- **optická lavice** – je zde větší měřicí prostor než u základní sestavy. Můžeme poskládat libovolnou měřicí soustavu, zvolit si vlastní integrační kouli, zrcátka, polarizátor, optická vlákna atd.
- **URA** – na tomto přístroji je trvale zapojen a nainstalován přípravek URA. S tímto přípravkem měříme jen odrazivost pro úhly dopadu v rozsahu $8^\circ - 68^\circ$.

Zdroj

Zdrojem je halogenová žárovka a deuteriová výbojka (na obrázku 3.1 HL, DL), které pokrývají celé pracovní spektrum. Deuteriová výbojka je pro UV oblast a pro viditelnou a NIR oblast je halogenová žárovka.

¹informace dostupné v technickém manuálu na www.perkinelmer.com



Obrázek 3.1: PE Lambda 950 – funkční schéma

Optické filtry

Za zdrojem je umístěn karusel s blokovacími optickými filtry (na obrázku 3.1 označený FW) synchronizovaný s monochromátory. Tyto filtry ořezávají krátkovlnnou část spektra ještě před vstupem do monochromátorů.

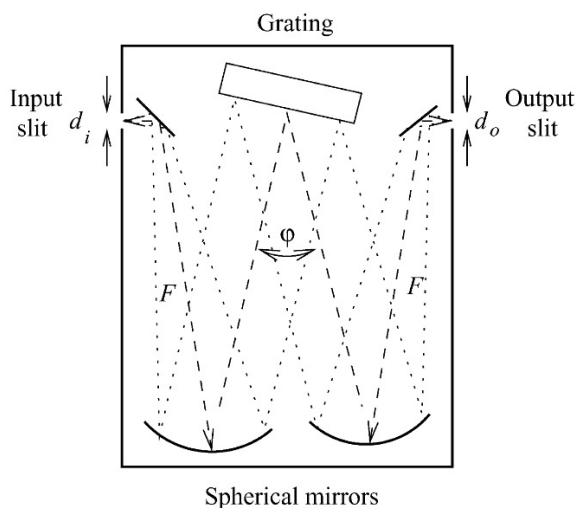
Monochromátor

Je zařízení, které z polychromatického záření vymezuje požadovaný úzký pás vlnových délek. Může to být buď hranol nebo optická mřížka. Mřížka slouží v našem spektrofotometru jako disperzní prvek, který rozkládá svazek polychromatického záření na "vějíř" paprsků jednotlivých vlnových délek.

Ve spektrofotometru PerkinElmer jsou monochromátory dva. Jako disperzní prvek jsou použity optické mřížky s 1440 vrypů/mm pro UV/VIS oblast a s 360 vrypů/mm pro blízkou IČ oblast ². Na obrázku 3.2 je znázorněna typická konstrukce použitého monochromátoru[13]. Rozložení vstupního záření na spektrum je dáno rovnicí

$$l(\sin\alpha + \sin(\varphi + \alpha)) = m\lambda \quad (3.1)$$

²informace dostupné v technickém manuálu na www.perkinelmer.com



Obrázek 3.2: funkční schéma monochromátoru

kde α je úhel dopadu paprsku dopadajícího na mřížku, φ je úhel mezi dopadajícím a odraženým paprskem, m je řád difrakce, l je perioda mřížky a λ vlnová délka na výstupu pro daný úhel dopadu dopadajícího svazku.

Střídač

Dále za monochromátory je svazek po odrazu od sférického zrcadla veden přes střídač (na obrázku 3.1 označení C). Ten střídavě formuje referenční a měřící svazek. Do cesty měřícímu svazku postavíme přípravek k měření odrazivosti (spolu s měřeným prvkem). Referenční svazek prochází volně. Svazek tedy střídavě prochází přímo na detektor a střídavě na přípravek se zkoumaným prvkem a až pak na detektor.

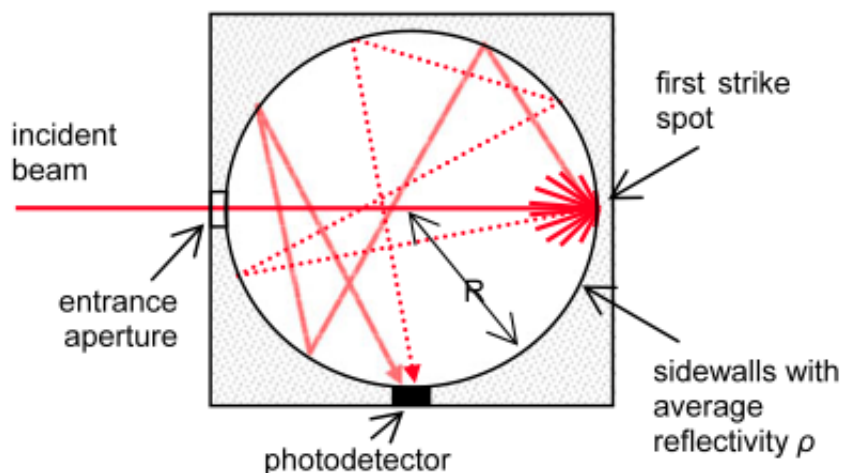
Zeslabovače

Jsou optické neutrální filtry začleněné za střídačem (na obrázku 3.1 označené RBA, SBA) u obou svazků, které mají za úkol snížit intenzitu svazku pro měření velmi nízkých hodnot odrazivosti či propustnosti. Pokud například máme měřený vzorek s odrazivostí řádově v procentech, zařadíme do referenčního svazku zeslabovač, který sníží intenzitu na například 10 % původní hodnoty. Standardně máme zeslabovače na 1 %, 10 %. Slouží k přesnějšímu vyhodnocování naměřených dat.

Detektor – integrační koule

Některé materiály nebo optické prvky mají tu vlastnost, že při odrazu nebo průchodu svazku je tento svazek vychýlen od původního směru nebo rozptýlen. Abychom detekovali i takto odchýlené záření, používáme pro jeho zachycení tzv. integrační koule. Jedná se o dutou kouli s bílým rozptylujícím povrchem a detektorem na vnitřní straně. U spektrofotometru PerkinElmer je dostupná koule o průměru 60 mm pro měření na přípravku RC, VW. Integrační koule nám umožňuje zachytit všechny sbíhavé, rozbíhavé

i rozptýlené paprsky. Detektor bez integrační koule má vyšší citlivost, ale může být nehomogenní. Problémem může být změna tvaru svazku při měření. Pokud bychom měřili například čočku, bude mít měřený svazek jiný průměr než při kalibraci, což vede ke zkreslujícím hodnotám. Oba uvedené problémy řešíme použitím integrační koule. Zpracovává oba svazky, měřící i referenční.



Obrázek 3.3: funkční schéma integrační koule

3.2 Princip Fourierovského spektrofotometru

Fourierovský spektrofotometr využívá interference světla. Skládá se ze zdroje, Michelsonova interferometru, referenčního laseru a detektoru.

Michelsonův interferometr ve spektrofotometru Nicolet je Twymanův-Greenův typ, ve kterém je svazek zdroje kolimován. Složené rovinné vlny na výstupu fokusujeme čočkou na detektor. Před detektor umístíme měřený prvek, na kterém bude část přenášeného výkonu propuštěna či odražena a část výkonu absorbována. Detekovaný výkon je digitalizován na signál a Fourierovou transformací převeden na spektrum. V tomto spektru jsou příspěvky měřeného vzorku, ale i příspěvky „kalibračního spektra“ viz. obrázek 1.4.

Poměrem signálu bez vzorku a signálu se vzorkem (po provedení Fourierovy transformace) získáme spektrum samotného zkoumaného vzorku a tím jeho hledané spektrální vlastnosti [5].

Fourierovský spektrofotometr neprovádí měření pro jednotlivé vlnové délky. Každý průjezd pohyblivého zrcátka v Michelsonově interferometru znamená jedno proměření celé požadované spektrální oblasti. Následnou aplikací Fourierovy transformace na signál dostaneme závislost odrazivosti na vlnové délce. Výhodou fourierovského spektrofotometru je tedy především rychlost měření.

3.3 Nicolet 6700 FT-IR

Jedná se o jednosvazkový spektrofotometr se spektrálním rozsahem 1280 nm až 28 570 nm.

3.3.1 Konstrukce

Zdroj

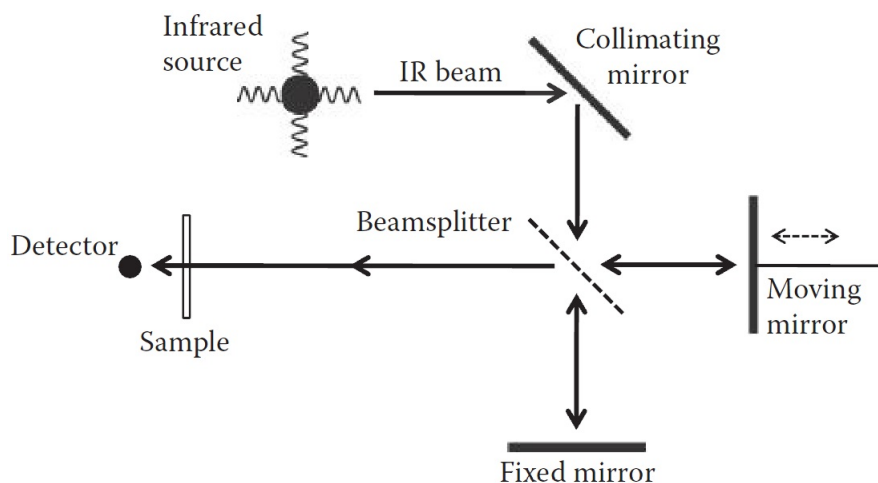
Jako zdroj ve spektrofotometru pro měření v IČ oblasti je rozšířená žhavená spirála nebo pásek z materiálu s vysokým elektrickým odporem, obvykle směs niklu a chromu. Výhoda spirál ze směsi niklu a chromu je ta, že nepodléhají tak snadno oxidaci a proto mají delší životnost. U zdroje vyžadujeme dlouhodobou tepelnou stabilitu a volíme jej podle spektra, ve kterém chceme měřit. Obecně můžeme říci, že čím více energie (záření) projde vzorkem, tím kvalitnější spektrum dostaneme. Proto by se mohlo zdát, že ideálním zdrojem bude žhavené wolframové vlákno ve vakuu. Protože však vlákno je ve skleněné baňce a sklo, resp. křemen, propouští vlnové délky přibližně do 2500 nm, můžeme jej použít jen pro měření v oblasti blízkého a krátkého IČ záření. V současnosti je nejrozšířenějším zdrojem Globar. Ve spektrofotometru Nicolet jsou zdroje dva. První komerčně označený **ETC EverGlo™**, pro oblasti střední a daleké IČ oblasti (1040 nm až 1000 μm), který operuje ve třech režimech:

- **Pohotovostní** - provozní teplota 900°C. Spektrofotometr se standardně dodává se záložním zdrojem a neměli bychom jej vypínat. Dělič svazku v interferometru je ze soli KBr (viz dále) a pokud by teplota ve spektrofotometru klesla pod teplotu v místnosti, mohly by zde kondenzovat vodní páry. Vzhledem k tomu, že KBr je silně hygroskopický, mohlo by tak dojít k jeho nenávratnému poškození.
- **Pracovní** - provozní teplota 1140°C, poskytuje dostačující výkon pro většinu požadovaných aplikací
- **Turbo** - provozní teplota 1250°C, pro měření v oblastech nad 3000 cm^{-1} (3330 nm).

A druhý **halogenová žárovka** pro viditelnou až blízkou IČ oblast (360 nm až 2500 nm), jehož provozní teplota je přibližně 2700°C.

Michelsonův interferometr

Svazek je veden ze zdroje záření do Michelsonova (Twyman-Greenova) interferometru. Svazek je kolimován na dělič. Ideální dělič svazku, v našem případě destička z bromidu draselného, část svazku propustí a část odrazí. Nyní tedy máme dva svazky, každý s poloviční intenzitou původního. Jak vidíme na obrázku 3.4, jedno zrcátko je pevné a druhé pohyblivé. Oba svazky se od zrcátek vracejí zpátky na dělič, kde se velikosti

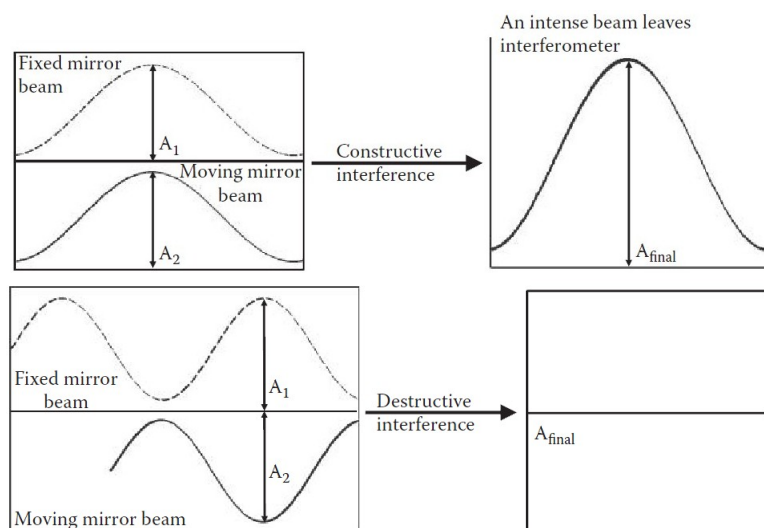


Obrázek 3.4: Twyman–Greenův interferometr

vektorů, znázorňujících jejich amplitudu, skládají v závislosti na fázovém posunu, tedy v závislosti na dráhovém rozdílu paprsků.

Princip interference je založen na rozdílu optických drah, které svazky urazí a na následném skládání (rekombinaci) amplitud těchto dvou svazků na děliči.

Pokud je dráhový rozdíl svazků roven celočíselnému násobku vlnové délky tj. $\delta = n\lambda$, kde $n = 1, 2, 3, \dots$, nastává konstruktivní interference a my zaznameneáme na detektoru nejvyšší intenzitu. Pokud je dráhový rozdíl svazků roven poločíslnému násobku vlnové délky tj. $\delta = (n + \frac{1}{2})\lambda$, nastává destruktivní interference, amplitudy skládajících se vln se vzájemně vyruší a my detekujeme nulovou intenzitu. Detektor tedy zazna-



Obrázek 3.5: Grafické znázornění konstruktivní a destruktivní interference.

menává závislost intenzity (kvadrát amplitudy) na fázovém posunu (na dráhovém rozdílu svazků).

Referenční laser

V systému je zabudován referenční He-Ne laser o známé vlnové délce $\lambda = 632,8$ nm, pro přesné měření dráhového posunu pohyblivého zrcátka. Znalost přesné polohy posuvného zrcátka je nezbytnou informací pro výpočet Fourierovy transformace. Svazek laseru neprochází středem děliče, ale je pro něj vyhrazeno excentricky umístěné okénko.

Dělič paprsků

Ve spektrofotometru Nicolet je použit dělič KBr, který propouští velmi široké spektrum vlnových délek až do 26 μm . Jeho nevýhoda je, že je hygroskopický. Po nějakém čase se na děliči postupně vytvoří tenká vrstva vody, kondenzovaná z atmosféry, což vede k znehodnocení vlastností děliče. Tomu lze zabránit automatickým profukováním suchým plynem.

Alternativou je dělič ze selenidu zinečnatého, který hygroskopický není, je mnohem dražší a používá se mimo laboratoře. Jeho nevýhodou je, že začíná velmi silně pohlcovat záření už okolo 15 μm .

Pokud potřebujeme měřit vlastnosti pro delší vlnovou délku, můžeme použít dělič z CsI (jodid cesný) s propustností až na 50 μm . Jeho nevýhodou je, že je silně hygroskopický a jeho životnost je proto velmi krátká.

Všechny děliče mají excentricky umístěné okénko pro referenční laser. Jsou rozpoznávány elektronicky a pro každý dělič je v paměti spektrometru uložena optimální poloha zrcadel.³

Detektor

Ve spektrofotometru Nicolet se integrační koule nepoužívá. Úkolem detektoru je převést dopadající výkon na elektrický signál, obvykle na napětí. Detektory volíme v závislosti na spektrálním rozsahu. Proces výměny detektorů je plně automatizovaný. Každý detektor má předzesilovač s nastavitelným zesílením citlivosti.

Dále jsou ve spektrofotometru zabudovány různé optické filtry určené k vymezení užšího pásu vlnových délek. Také se zařazují neutrální filtry před velmi citlivé detektory, u kterých by mohlo dojít k přesycení a tak ke krátkodobému "oslepnutí" detektoru. Zrcátka mohou být v hliníkovém nebo zlatém provedení. Ve zlatém provedení získáváme větší odrazivost a tedy i větší přenos výkonu v IČ oblasti.

Polarizátor

Volitelnou součástí vybavení u obou spektrofotometrů je elektronicky ovládaný polarizátor, který zařazujeme až před měřený vzorek. I když se výrobci snaží snížit počet

³převzato z průvodního manuálu spektrofotometru Nicolet

odrazných ploch ve spektrofotometru na minimum, světlo je po několikanásobném odrazu mírně polarizované. Pro měření pod jiným než kolmým úhlem dopadu pro nepolarizované záření použijeme polarizátor s nastavenou polarizací na 45° (rovnoměrné zastoupení S i P složky).

3.4 Fourierova transformace

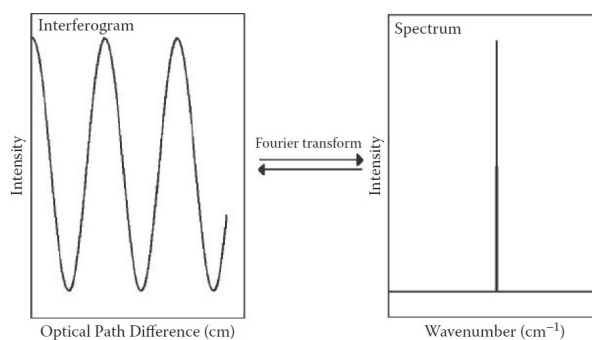
Fourierova transformace se využívá pro frekvenční analýzu naměřeného signálu. Signál, jako závislost dopadajícího výkonu na dráhovém rozdílu tak převedeme na závislost výkonu na vlnočtu resp. na vlnové délce. Přímá Fourierova transformace je dána vzorcem [10]:

$$\mathcal{F}\{h(t)\} = H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt \quad (3.2)$$

a inverzní Fourierova transformace:

$$\mathcal{F}^{-1}\{H(\omega)\} = h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega)e^{+i\omega t} d\omega \quad (3.3)$$

Názornou ukázkou aplikace Fourierovy transformace na monochromatický zdroj vidíme na obrázku 3.6.[7]



Obrázek 3.6: Fourierova transformace signálu z monochromatického zdroje

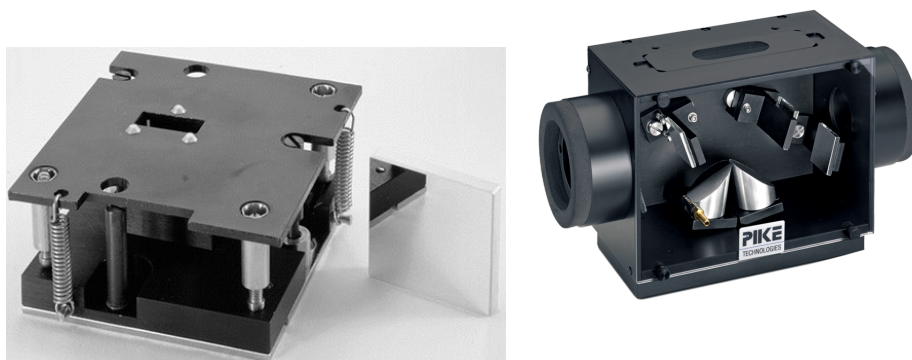
4 | Absolutní a relativní měření odrazivosti

Samotné spektrofotometry se používají k měření propustnosti různých biologických roztoků nebo chemických sloučenin. K měření hodnot odrazivosti potřebujeme navíc další pomocné sestavy či přípravky. Ve své práci jsem využil přípravků RC, VW a URA (Universal Reflectance Accessory). Pro měření odrazivosti máme dvě metody, relativní a absolutní.

- **Relativní měření odrazivosti**, závisí na referenčním vzorku. Potřebujeme referenční vzorek se známou odrazivostí, vůči kterému odrazivost neznámého prvku měříme. Odtud pak výpočtem získáme skutečnou hodnotu. Provádíme na přípravku RC.
- **Absolutní měření odrazivosti**, provádíme pomocí přípravku VW nebo URA. Hledanou hodnotu získáváme přímo.

4.1 RC přípravek

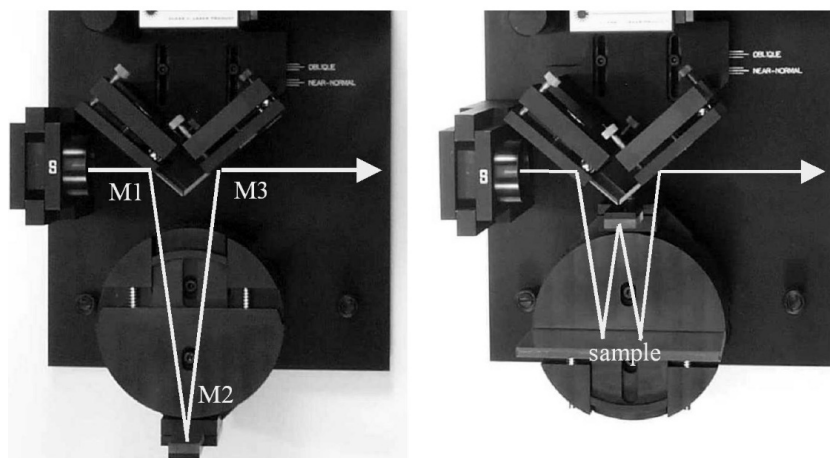
RC přípravek slouží pro relativní měření jen pro kolmý dopad. V měření jsem jako referenční vzorek použil planparalelní destičku povrstvenou zlatem.



Obrázek 4.1: Vlevo RC přípravek pro PerkinElmer. Vpravo RC přípravek pro Nicolet

4.2 V-W přípravek

Jedná se o absolutní měření pro kolmý dopad a název přípravku je odvozen od tvaru dráhy procházejícího svazku, který je pro tento přípravek příznačný. Na levé polo-



Obrázek 4.2: fotografie VW shora s naznačenou dráhou paprsku

vině obrázku je přípravek v pozici, kdy zařízení kalibrujeme. Otočením pohyblivé části pak přípravek přestavíme do polohy znázorněné napravo a získáme tak dva odrazy od měřeného prvku. To se ukázalo výhodné při měření prvků s vysokou odrazivostí, jelikož díky dvojité reflexi, získáváme kvadrát naměřené hodnoty odrazivosti [8].

Svazek se na prvku odrazí dvakrát, proto musíme provést příslušné matematické korekce. I vyjadřuje výslednou intenzitu s dvojitým odrazem na měřeném vzorku, na obrázku 4.2 vpravo. $R_1 = R_2 = R$ = odrazivost měřeného vzorku.

$$I = I_0 \cdot R \cdot R = I_0 \cdot R^2$$

odkud tedy dostáváme odrazivost

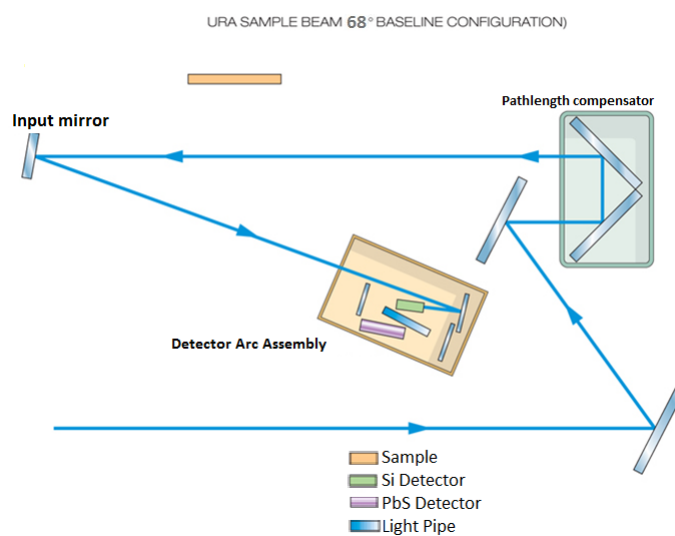
$$R = \sqrt{\frac{I}{I_0}}$$

R_1 , R_2 vyjadřují první a druhý odraz. I_0 vyjadřuje intenzitu při měření referenčního vzorku, na obrázku 4.2 vlevo. Tento výpočet software vykonává automaticky v rámci měření.

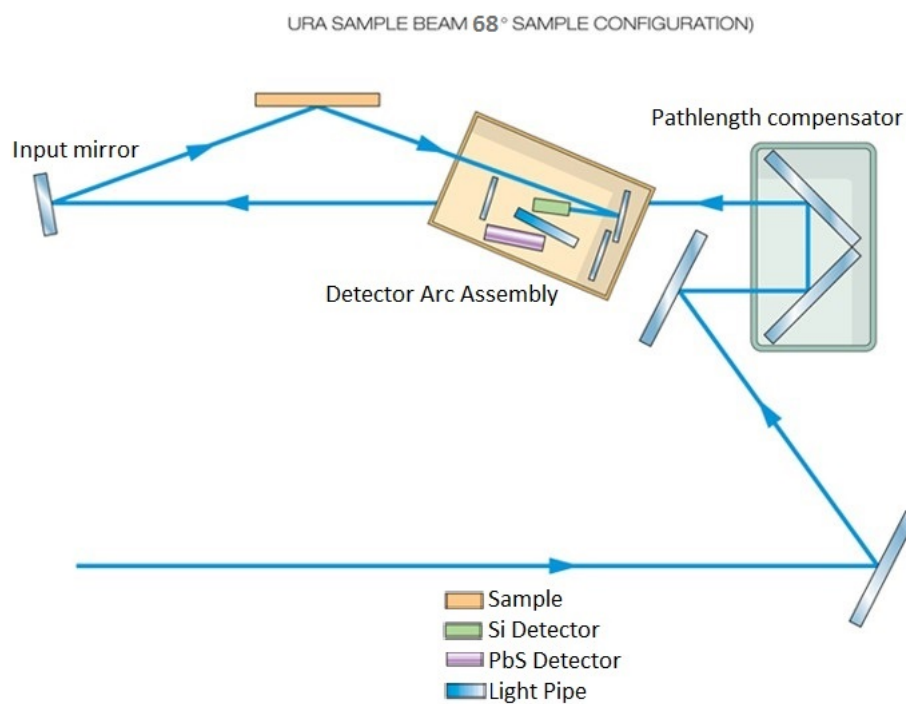
4.3 URA – Universal Reflectance Accessory

Jedná se o typ VN přípravku pro absolutní měření odrazivosti. URA se na rozdíl od předchozích ovládá plně automaticky pomocí softwarového rozhraní. Přípravek nejprve provede měření bez vzorku a poté měří s jedním odrazem navíc (na měřeném vzorku). Odrazivost můžeme měřit pro úhly dopadu od 8° do 68° . Pro UV a VIS oblast záření

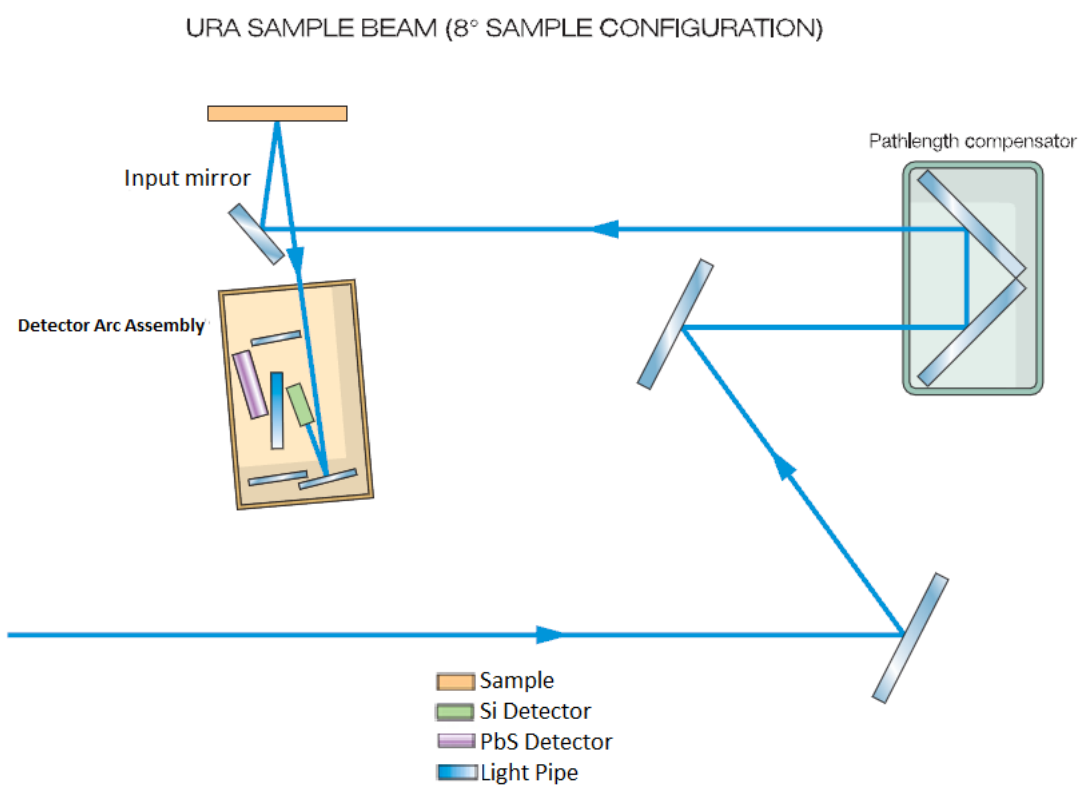
je zde křemíkový detektor. Pro oblast IČ je zde detektor PbS.



Obrázek 4.3: Funkční schéma přípravku URA – měření bez vzorku



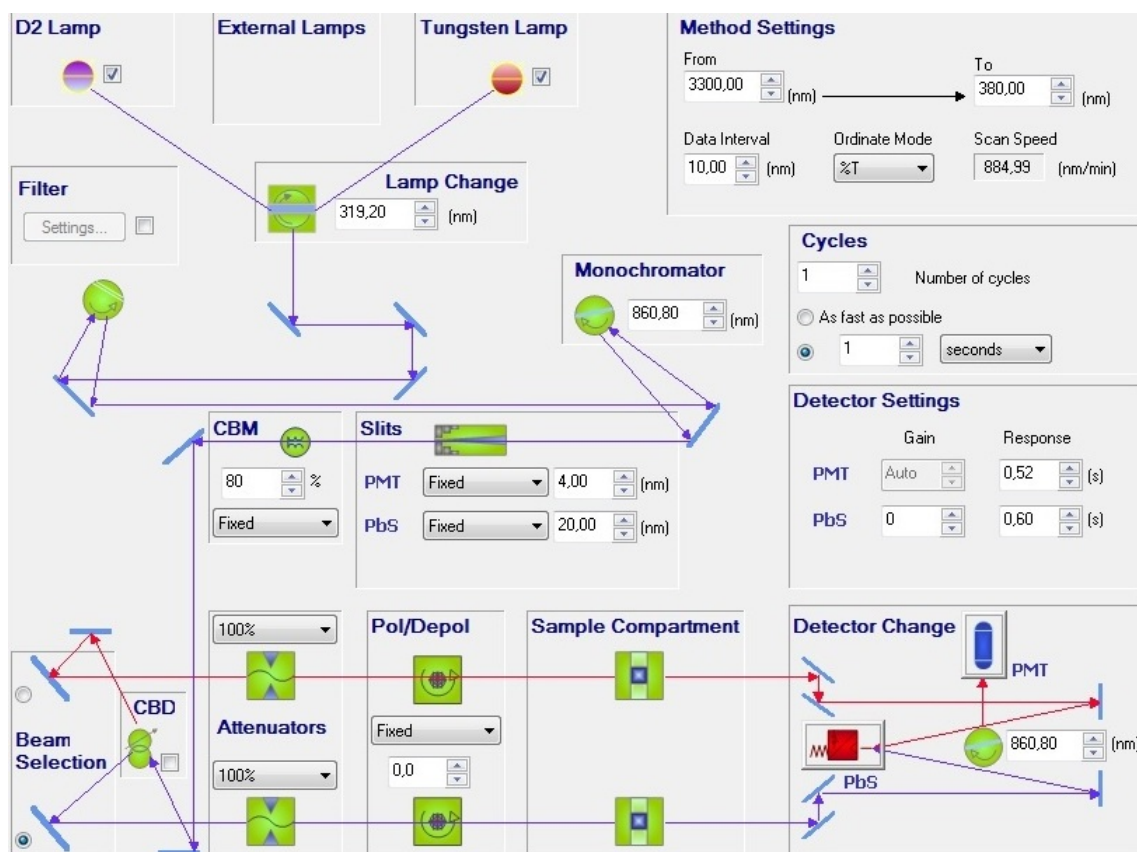
Obrázek 4.4: Funkční schéma přípravku URA – měření se vzorkem pro úhel dopadu 68°



Obrázek 4.5: Funkční schéma přípravku URA – měření se vzorkem pro úhel dopadu 8°

5 | Software

K přístroji PerkinElmer je dodáván ovládací program UV WinLab a k přístroji Nicolet software OMNIC. Princip obsluhy obou přístrojů je velmi podobný, proto dále popíši jen software UV WinLab. Při spuštění programu nás přivítá výchozí okno ve kterém si zvolíme měřenou veličinu a způsob měření. Na obrázku 5.1 vidíme možnosti nastavení jednotlivých parametrů měření.



Obrázek 5.1: Obrázek z uživatelského rozhraní programu UV WinLab

Vpravo nahoře zvolíme požadovaný rozsah měření a takzvaný krok. Delší krok znamená rychlejší měření, avšak na úkor rozlišení. Zde také volíme jestli budeme měřit propustnost nebo odrazivost. Vlevo nahoře si podle zvoleného rozsahu navolíme UV nebo IČ zdroj. Pokud měříme přes obě spektrální oblasti, je zde možnost zvolit si přímo vlnovou délku, na které se zdroje vystřídají. Tato možnost je zde proto, že spektra obou lamp se v určité oblasti překrývají a záleží na nás jak velký šum je přijatelný (zda

už je nutné UV lampu použít). Svazek dále pokračuje přes dvojitý monochromátor na střídač (jen u PerkinElmer). Je zde úzká štěrbina, kde máme možnost svazek zaclonit, pokud bychom měli příliš malý měřený vzorek. Za střídačem nastavíme požadovanou polarizaci (pokud je třeba) a na konec určíme, na jaké vlnové délce se budou střídat detektory, pokud měříme širší rozsah. Každý detektor má určité rozmezí vlnových délek, kde je citlivý.

6 | Praktická část

6.1 Měřené vzorky

CaF₂, fluorid vápenatý má široké uplatnění v optice pro výrobu skel, čoček, děličů a hranolů. Má extrémně nízký index lomu $n = 1,39$ a teplota tání je 1360°C . Propouští záření od 130 nm do $10\text{ }\mu\text{m}$.

Ge, Ge₂, germanium má velmi vysoký index lomu $n = 4,00$. Používá se ve světlovodné optice a zejména při výrobě děličů ve spektrofotometrech. Dále se s ním můžeme setkat v čočkách pro tepelné zobrazování. Rozsah vlnových délek, které propouští je $1800 - 23\ 000\text{ nm}$.

GaAs, arsenid galia má speciální užití v daleké IČ oblasti. Jeho teplota tání je 1511°C a index lomu $n = 3,27$.

Si, Si₂, křemík, základní prvek polovodičových součástek a skla. Primárně využívaný pro optické prvky ve viditelném spektru. Index lomu $n = 3,42$. **Si_{SYNCHROSPEED}** a **Si₂** se liší jen způsobem výroby

Informace byly převzaty z databáze optických materiálů [3].

6.2 Průběh měření

Měřil jsem celkem šest optických prvků, nejprve na přístroji PerkinElmer a pak na přístroji Nicolet. Na přístroji PerkinElmer jsem sestavil měřící aparaturu na optické lavici pro měření s přípravkem RC resp. VW a v softwaru nastavil požadované parametry, které byly u všech měření téměř stejné.

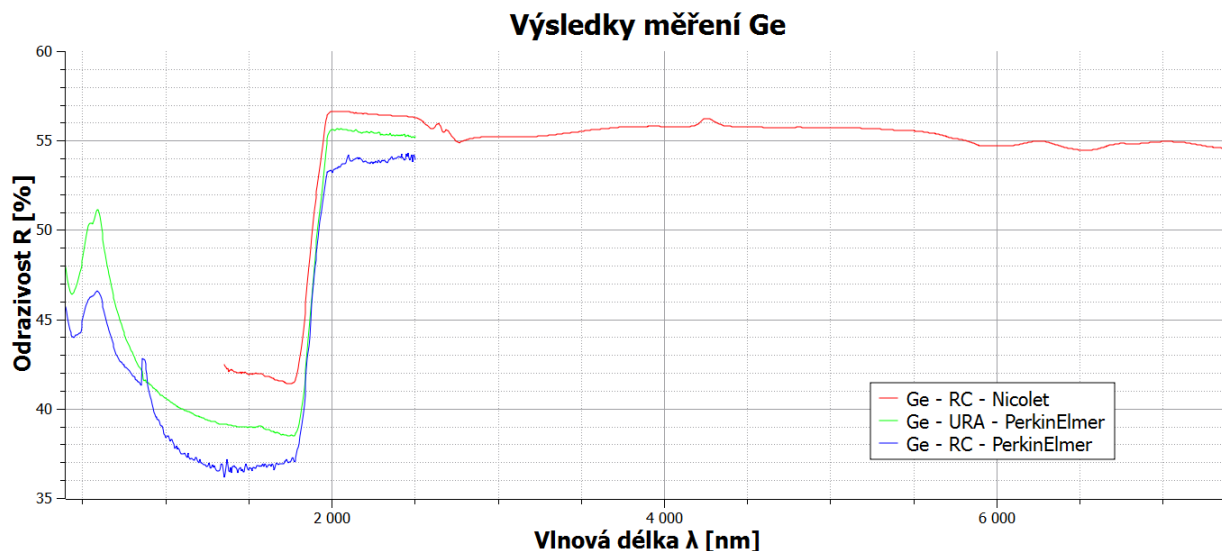
Integrační čas nám udává hodnotu, jak dlouho bude daná vlnová délka měřena. Kvalita spektra roste se vzrůstajícím integračním časem. Pokud tuto hodnotu nastavíme příliš nízkou, vyskytuje se ve spektru nežádoucí šum. Volíme kompromis mezi dobou měření a kvalitou signálu. Ve svém měření jsem nastavil integrační čas $0,6\text{ s}$ pro detektor PbS a $0,52\text{ s}$ pro detektor PMT.

Krok je interval vlnové délky s jakým se posouváme po spektru. U všech měřených prvků jsem nastavil krok 5 nm .

Zdroj. U přístroje PerkinElmer jsem měřil v rozmezí vlnových délek $400\text{ nm} - 2500\text{ nm}$ a proto zvolil halogenovou žárovku. Výměna **detektorů** byla nastavena na vlnovou

délku 860 nm. U přístroje Nicolet jsem měřil v rozsahu 1355 nm – 7410 nm. Překrývající se oblasti jsem pak porovnal a vyhodnotil.

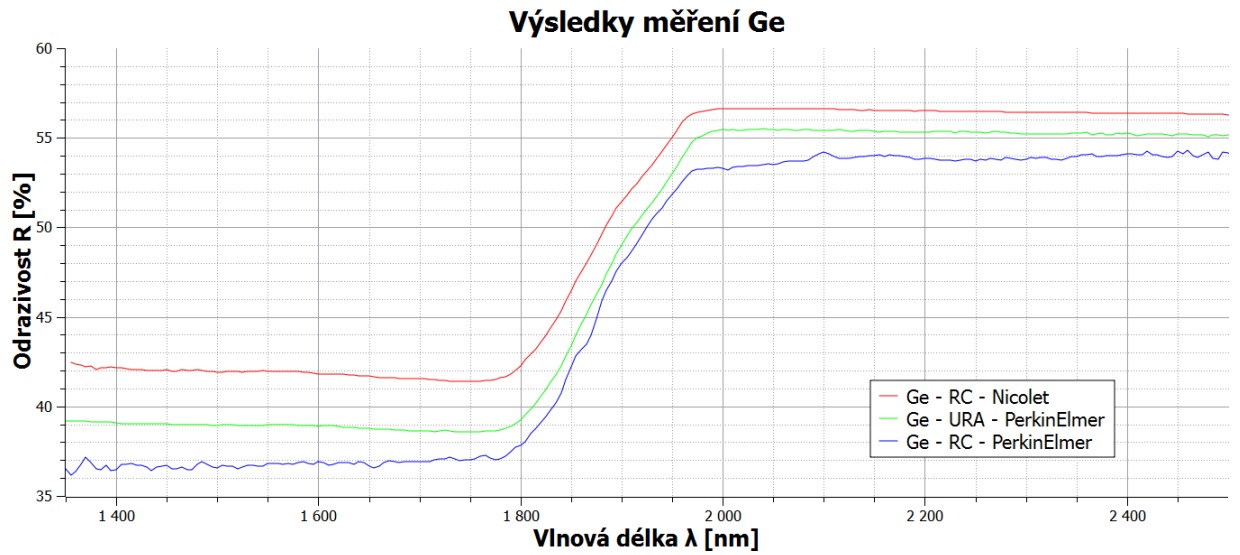
Během měření se vyskytly komplikace. Přípravek VW pro Nicolet nebyl seřízený, musel být poslán výrobci na reklamaci a měření tedy neproběhlo. Z provozních důvodů neproběhlo ani měření pro přípravek VW pro PerkinElmer. Na přípravku VW jsem změřil jen vzorek zlata (viz. obrázek 2.1), který měl dostatečně velké rozměry. Naměřené hodnoty jsem pak použil jako hodnoty odrazivosti referenčního vzorku při měření na RC přípravku. Porovnával jsem tedy výsledky tří měření.



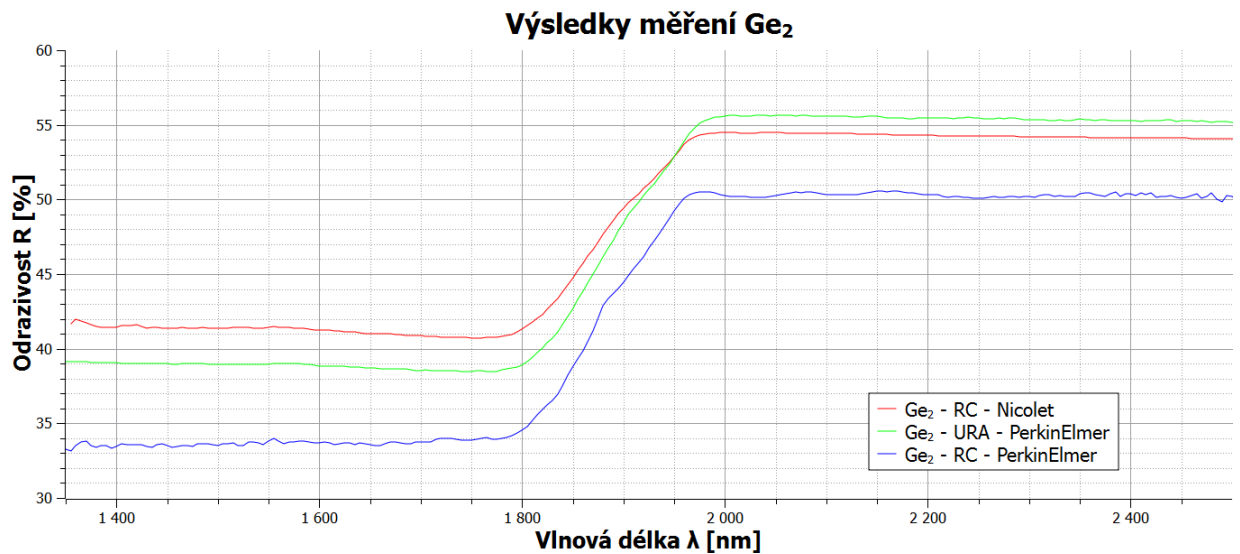
Obrázek 6.1: Srovnání výsledků tří měření vzorku germania

Omezíme se však pouze na překrývající se oblasti pro přesnější vyhodnocení. Na obrázku 6.1 je u přípravku RC na PerkinElmer zřetelný schodek v oblasti 860 nm, způsoben výměnou detektorů.

6.3 Výsledky měření



Obrázek 6.2: Srovnání výsledků tří měření vzorku germania

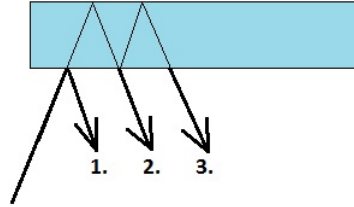


Obrázek 6.3: Srovnání výsledků tří měření vzorku Ge₂

Přípravkem URA na spektrofotometru PerkinElmer jsme naměřili prakticky stejné hodnoty u obou vzorků. Nicolet zaznamenal u obou vzorků vyšší odrazivost, ale u Ge₂ v oblasti nad 1850 nm je naměřená odrazivost nižší než s použitím přípravku URA. Přípravek RC naměřil na začátku vymezeného spektra odrazivost až o 7 % nižší než Nicolet. Tento veliký rozdíl je zřejmě dán nepečlivým umístěním vzorku na přípravek RC. Použitím formule pro výpočet indexu lomu germania v závislosti na vlnové délce (μm)[14]

$$n_{(\lambda)}^2 = 9,28156 + \frac{6,7288\lambda^2}{\lambda^2 - 0,44105} + \frac{0,21307\lambda^2}{\lambda^2 - 3870,1} \quad (6.1)$$

získáme index lomu germania $n_{(2\mu m)} = 4,104$. Dosazením do rovnice 2.5 pro odrazivost pro kolmý dopad získáme $R = 36,98 \%$. To ale není v souladu s naměřenou hodnotou. Je tedy možné, že dochází k odrazu i na zadní stěně měřeného vzorku.



Obrázek 6.4: Vícenásobný odraz na měřeném vzorku

Mějme počáteční intenzitu I_0 . První odraz je dán I_0R , pro intenzitu dalších odrazů platí:

2. odraz $I_0R(R - 1)^2R$

3. odraz $I_0R(R - 1)^2R^3$

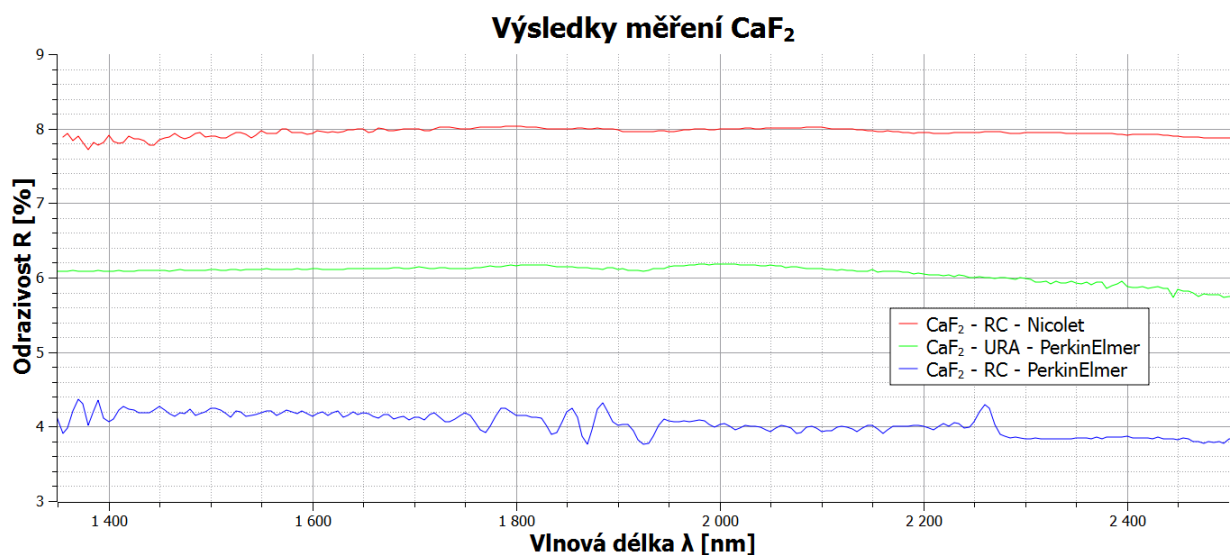
4. odraz $I_0R(R - 1)^2R^5$

atd.

Součtem geometrické řady (kvocient = R^2) a dosazením získáváme odrazivost

$$R = 0,37(1 + \frac{0,63^2}{1 - 0,37^2}) = 0,54 \rightarrow 54\%$$

Tato hodnota přibližně odpovídá hodnotám odrazivosti pro germanium pro vlnovou délku $\lambda = 2000$ nm. K odrazu na zadní stěně tedy skutečně dochází.

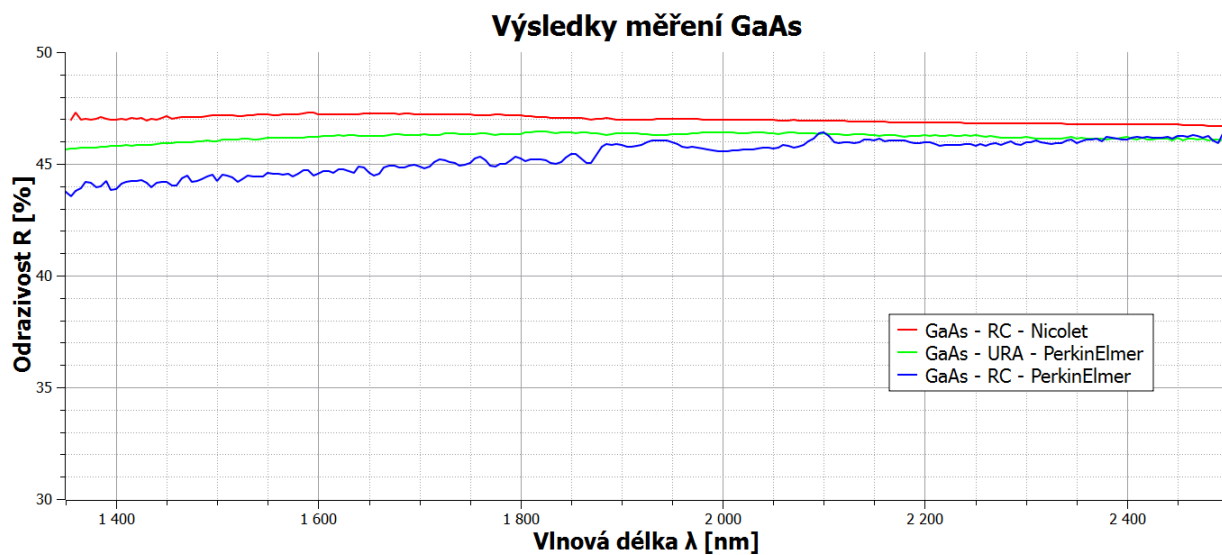


Obrázek 6.5: Srovnání výsledků tří měření vzorku CaF₂

Na tomto grafu je zarážející rozptyl naměřených hodnot. Očekávali jsme totožné nebo alespoň velmi blízké hodnoty výsledků. Měření na spektrofotometru Nicolet nám dává výsledek o 2 % vyšší odrazivosti než měření na spektrofotometru PerkinElmer užitím přípravku URA. Přípravek RC na PerkinElmer nám dává naopak odrazivost o 2 % nižší než na přípravku URA. Výsledek získaný na přípravku RC je zřejmě dán neopatrným umístěním vzorku do aparatury.

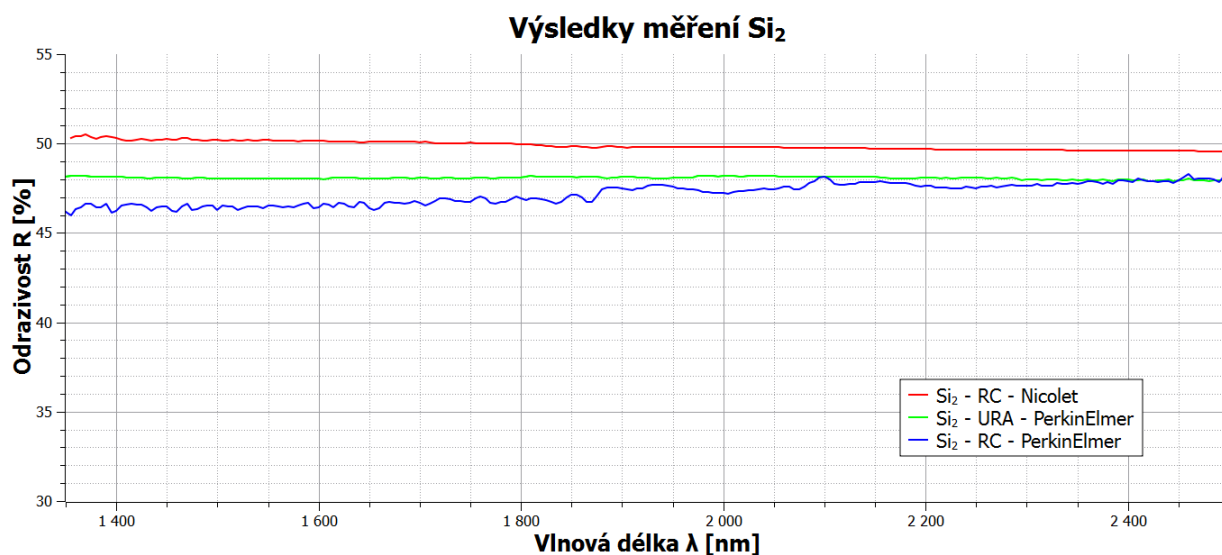
Index lomu CaF_2 pro vlnovou délku $2 \mu m$ je roven $n_{(2\mu m)} = 1.42386$ [1]

Tomu odpovídá podle rovnice 2.5 odrazivost $R = 3,058 \%$. Analogickým postupem jako u germania zjistíme, že opět dochází k vícenásobnému odrazu na zadní stěně. Výsledná vypočtená hodnota odrazivosti s odrazem na zadní stěně je přibližně $R = 5,934 \%$. Nejblíže skutečným hodnotám se tedy blíží výsledky získané měřením na přípravku URA, které leží uprostřed, což je také v souladu s referenčními hodnotami.

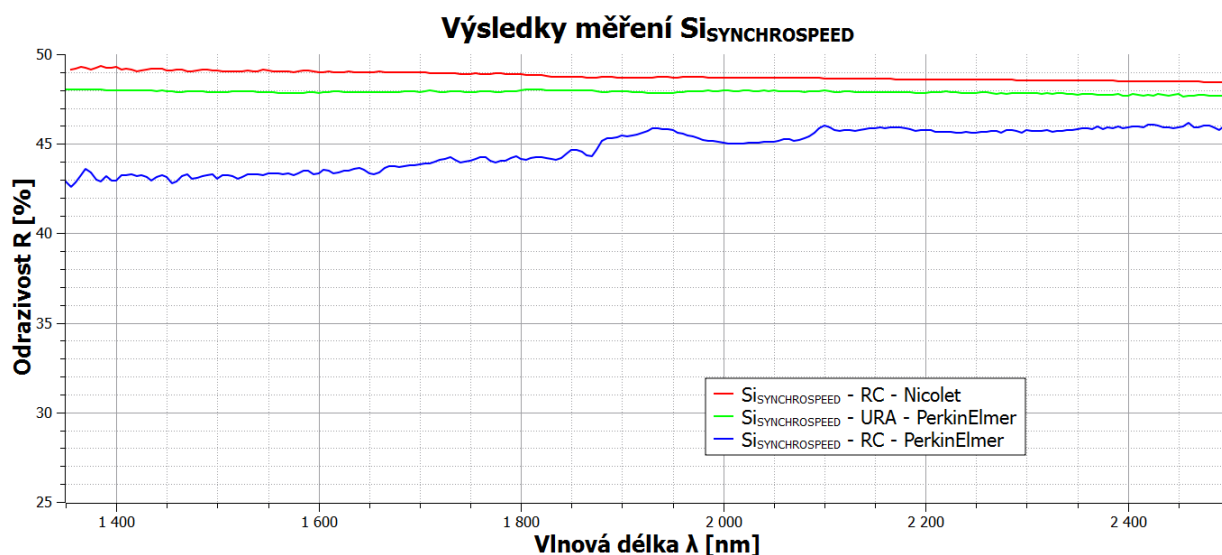


Obrázek 6.6: Srovnání výsledků tří měření vzorku GaAs

Z výsledků vidíme, že hodnoty se liší až o 4 %. To může být způsobeno špatným umístěním vzorku na RC přípravek. Od $2\mu\text{m}$ jsou hodnoty odrazivosti srovnatelné nezávisle na způsobu měření.



Obrázek 6.7: Srovnání výsledků tří měření vzorku Si_2



Obrázek 6.8: Srovnání výsledků tří měření vzorku $\text{Si}_{\text{SYNCHROSPEED}}$

Měřené vzorky Si_2 a $\text{Si}_{\text{SYNCHROSPEED}}$ se liší způsobem výroby. Metoda synchrospeed je v současné době velmi rozšířená, protože umožňuje masovou a přesto kvalitní výrobu čoček.

Použitím přípravku URA jsme naměřili u obou prvků prakticky stejné hodnoty odrazivosti, ale měření na přípravku RC byly hodnoty odrazivosti u obou vzorků o 2-4 % nižší. Na druhou stranu měření na spektrofotometru Nicolet nám dalo výsledky odrazivosti o 1-2 % vyšší než na přípravku URA. Intuitivně bychom tedy mohli říci, že skutečné hodnoty budou ležet někde ve středu. Osobně se k tomuto závěru také přikláním. Jednak proto, že na přípravku URA je prakticky nulová manipulace se vzorkem a jednak proto, že dráha na mezi měřeným vzorkem a detektorem je na přípravku URA podstatně kratší než u přípravku RC na spektrofotometru PerkinElmer či Nicolet.

6.4 Závěr

Mým cílem bakalářské práce bylo zprovoznit přípravky RC a VW pro Nicolet, zpracovat naměřená data a srovnat výsledky s hodnotami získanými měřeními na spektrofotometru PerkinElmer. Dále pak popsat princip měření na spektrofotometru Nicolet a naučit se s tímto spektrofotometrem zacházet.

Z grafů vidíme, že u všech prvků spektrofotometr Nicolet naměřil vždy vyšší hodnoty odrazivosti než PerkinElmer ať už na RC nebo s přípravkem URA. Skutečné hodnoty odrazivosti budou však nižší, protože jsme měřili planparalelní sklíčka, které měly obě strany leštěné kvůli měření propustnosti. V důsledku toho dochází k druhému odrazu na zadní stěně a detektor tak zaznamená vyšší intenzitu. Tento nežádoucí jev lze odstranit buď zamatováním zadní strany nebo použitím klínového vzorku.

Téma bakalářské práce se mi zdálo zajímavé hlavně díky praktické části. Seznámil jsem se s pracovníky ve spektrofotometrické laboratoři, kde se provádí důkladná kontrola spektrálních vlastností optických prvků. Dále jsem se seznámil se spektrofotometri, naučil se s nimi zacházet a aplikovat je v konkrétních měřeních. Také jsem měl možnost nahlédnout i na jiná pracoviště. Na tuto bakalářskou práci možná v budoucnu navážu diplomovou prací podobného zaměření pro oblast UV.

Zdroje obrázků

1	http://kirraweehighphysics.wordpress.com/	7
1.1	http://www.srh.noaa.gov/jetstream/remote/remote_intro.htm	8
1.2	http://theglassblog.files.wordpress.com/2011/02/solar-spectrum1.jpg	9
1.3	http://4two.info/barge/as/spectra/334402_com_planckcurve.jpg	11
1.4	Kalibrační spektrum zdroje spektrofotometru Nicolet	11
2.1	Odrazivost pozlacené destičky a zrcátka (hliník na zadní stěně).	12
2.2	http://biomolecules.mff.cuni.cz/files/courses/Fresnelovy_vzorcery_II.pdf	15
3.1	http://www.nyu.edu/fas/dept/chemistry/mdi/pdfs/UV.pdf , str. 25	17
3.2	Tkachenko, N. V.: Optical spectroscopy: methods and instrumentations, str. 31	18
3.3	http://openoptics.info/the-project/about/integrating-sphere-2/	19
3.4	Smith, B. C.: Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy, str. 20	21
3.5	Smith, B. C.: Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy, str. 21,23	21
3.6	Smith, B. C.: Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy, str. 31	23
4.1	RC PerkinElmer z http://www.perkinelmer.com/Catalog/Product/ID/B0086703 , Nicolet z http://www.piketech.com/SR-10Spec.html	24
4.2	Znázornění chodu svazku VW, převzato z [8]	25
4.3	Převzato z manuálu dostupného na http://www.perkinelmer.com	26
4.4	Převzato z manuálu dostupného na http://www.perkinelmer.com	26
4.5	Převzato z manuálu dostupného na http://www.perkinelmer.com	27
5.1	Obrázek z uživatelského rozhraní programu UV WinLab	28
6.1	Srovnání výsledků tří měření vzorku germania	31
6.2	Srovnání výsledků tří měření vzorku germania	32

6.3	Srovnání výsledků tří měření vzorku Ge ₂	32
6.4	Vícenásobný odraz na měřeném vzorku	33
6.5	Srovnání výsledků tří měření vzorku CaF ₂	34
6.6	Srovnání výsledků tří měření vzorku GaAs	35
6.7	Srovnání výsledků tří měření vzorku Si ₂	36
6.8	Srovnání výsledků tří měření vzorku Si _{SYNCHROSPEED}	36

Literatura

- [1] Refractive index database.
URL <http://refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material=CaF2>
- [2] Studijní text dostupný na http://biomolecules.mff.cuni.cz/files/courses/Fresnelovy_vzorcy_II.pdf.
- [3] Databáze optických prvků. 2013.
URL <http://www.crystran.co.uk/optical-materials>
- [4] Elektřina a magnetismus, kapitola 13. květen 2013.
URL http://www.aldebaran.cz/elmg/kurz_13_maxw.pdf
- [5] Bradley, M.: Advantages of a Fourier Transform Spectrometer. *Thermo Fisher Scientific, Technical note*, ročník 50674, 2008: str. 2.
- [6] Fuka J., H. B.: *Optika*. SPN, 1961.
- [7] Kauppinen, J.; Partanen, J.: *Fourier Transforms In Spectroscopy*. Wiley Online Library, 2001, 271 s.
- [8] van Nijnatten, P.; de Wolf, J.; Schoofs, I.: Directional Reflection measurements on highly reflecting coatings: str. 7.
- [9] Opatrný, T.: *Kapitoly z termodynamiky a statistické fyziky*. 2009.
- [10] Saleh, B.; Teich, M.: *Základy fotoniky*. I, Praha: Matfyzpress, 1994, 226 s.
- [11] Schiller, C.: *Motion Mountain-old3*. Christoph Schiller, 2012.
- [12] Smith, B. C.: *Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy*. CRC press, 2011, 182 s.
- [13] Tkachenko, N. V.: *Optical spectroscopy: methods and instrumentations*. Elsevier Science, 2006, 307 s.
- [14] Weber, M.: *Handbook of Optical Materials*. Laser & Optical Science & Technology, Taylor & Francis, 2010, ISBN 9780849335129.
URL <http://books.google.cz/books?id=6VpQDoef05wC>