VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH ROZŠÍŘENÍ SPEKTROMETRU PRO MĚŘENÍ ABSOLUTNÍ ODRAZIVOSTI

DESIGN OF A SPECTROMETER ACCESSORY FOR ABSOLUTE REFLECTANCE MEASUREMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE ŠTĚPÁN ŠUSTEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JAKUB KLUS
SUPERVISOR

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Štěpán Šustek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh rozšíření spektrometru pro měření absolutní odrazivosti

v anglickém jazyce:

Design of a spectrometer accessory for absolute reflectance measurements

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Charakteristika problematiky úkolu: Pomocí komerčně dostupných spektrometrů lze pohodlně měřit spektrální závislost propustnosti vzorku. Druhou možností je měření spektrální závislosti relativní odrazivosti vzorku, což je poměr odrazivosti vzorku a známého normálu jako funkce vlnové délky. Pomocí soustavy pohyblivých zrcadel však lze dosáhnout také uspořádání pro měření absolutní odrazivosti vzorků. Cílem práce je zhodnotit způsoby měření absolutní odrazivosti a navrhnout nástavec pro komerční zařízení - spektrometr Perkin Elmer Lambda 45.

Cíle bakalářské práce:

Student se nejdříve teoreticky seznámí s optickým uspořádáním spektrometru. Dále nastuduje uspořádání používaná pro měření absolutní odrazivosti. Závěrem by měl student navrhnout optickou i mechanickou část nástavce pro měření. Správnou funkci optické části ověří pomocí programů pro trasování paprsků. Mechanická část musí vyhovovat vnitřnímu uspořádání komerčního spektrometru Perkin Elmer Lambda 45.

Seznam odborné literatury:

VAŠÍČEK, Antonín. Optika tenkých vrstev. 1. vyd. Praha: NČSAV, 1956, 354 s.

ZWINKELS, Joanne C., M. NOËL a C. X. DODD. Procedures and standards for accurate spectrophotometric measurements of specular reflectance. Applied Optics. 1994, roč. 33, č. 34, s. 7933-7944. DOI: 10.1364/AO.33.007933. Dostupné z: http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=ao-33-34-7933

BENNET, H. E. a W. F. KOEHLER. Precision Measurement of Absolute Specular Reflectance with Minimized Systematic Errors. Journal of the Optical Society of America. 1960, roč. 50, č. 1, s. 1-6. DOI: 10.1364/JOSA.50.000001. Dostupné z: http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-50-1-1

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jakub Klus

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c. Děkan fakulty

Abstrakt
Předkládaná práce se zabývá návrhem nástavce a jeho konstrukčním řešením pro měření absolutní odrazivosti pomocí přístroje Perkin Elmer Lambda 45. Práce je rozdělená celkem do tří částí. První část se zabývá základní teorií optiky, jejíž znalost je potřeba pro správnou funkci optické části. Druhá část obsahuje přehled uspořádání nástavců používaných v praxi pro měření jak relativní, tak absolutní odrazivosti. Poslední část zahrnuje optické a konstrukční řešení nástavce.

Klíčová slova
Perkin Elmer Lambda 45, spektrometr, absolutní odrazivost, tenké vrstvy

Abstract
This paper describes the design and the design solution of an extension for measurement of an absolute reflectance using Perkin Elmer Lambda 45. This paper is divided into three parts. The first part deals with the basic theory of optics, knowledge of which is necessary for the proper function of the optical components used in the design. The second part provides an overview of configurations used in the practice to measure both the relative and the absolute reflectance. The last section includes the final design solution of the extension.

Key Words
Perkin Elmer Lambda 45, spectrometer, absolute reflectance, thin films

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma, „Návrh rozšíření spektrometru pro měření absolutní odrazivosti“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Dne……... ……..

Štěpán Šustek

Poděkování

Tato práce by nevznikla bez podpory mých rodičů, kterým děkuji především za jejich trpělivost.

Dále bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubu Klusovi za cenné připomínky, rady a vedení při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat prof. RNDr. Miloslavu Ohlídalovi, CSc za jeho cenné připomínky a rady při vypracovávání teorie.

Bibliografická citace

ŠUSTEK, Š. *Návrh rozšíření spektrometru pro měření absolutní odrazivosti.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jakub Klus.

Obsah

1. Úvod 10
2. Světlo 11
2.1. Vnímání světla lidským okem 11
3. Základní optické charakteristiky 13
3.1. Rychlost světla 13
3.2. Index lomu 13
3.3. Světlo jako Elektromagnetická vlna 13
3.4. Lineární polarizace 14
3.5. Eliptická polarizace 16
3.6. Kruhová polarizace 17
3.7. Přirozené světlo 18
4. Šíření paprsků optickým prostředím 19
4.1. Zákon odrazu 19
4.2. Snellův zákon lomu 19
4.3. Disperze světla 20
4.4. Odraz a lom na rozhraní dvou dielektrik 20
4.5. Intenzita světla odraženého a lomeného rozhraním dvou dielektrik 22
4.6. Kolmý dopad 23
4.7. Šikmý dopad 23
4.8. Relativní a absolutní odrazivost 24
5. Souhrn možných konstrukčních řešení 25
5.1. Specifikace měřicího prostoru přístroje 25
5.2. V-A uspořádání 25
5.3. V-W uspořádání 26
5.4. V-N uspořádání 26
6. Konstrukční řešení nástavce 28
7. Měření pomocí nástavce 29
7.1. Dovolené rozměry měřených vzorků 31
8. Nástavec a jeho součásti 34
8.1. Základní deska 35
8.2. Polohovadlo vstupního zrcadla 35
8.3. Držák vstupního zrcadla 36
8.4. Držák vzorku 36
8.5. Překlopné rameno 37

8.6. Polohovací šroub pro měření průchodu 38
8.7. Držák pevného zrcadla 39
9. Závěr 40
Literatura 41
Seznam použitých zkratek a symbolů 42
Seznam použitých zkratek vektorů 43
Seznam příloh 44

1. ÚVOD

Pomocí spektrometru Perkin Elmer Lambda 45 lze měřit spektrální závislost odrazivosti a propustnosti vzorku. Odrazivost se pak dá měřit přímo jako absolutní při vhodném uspořádání zrcadel.

Předkládaná práce se nejprve zabývá základní teorií, která je nutná pro popis optických systémů, a zhodnocením jejího dopadu na optickou část navrhovaného řešení. Důležité jsou zejména principy odrazu a lomu světelného paprsku a polarizace světla při odrazu.

Dále se tato práce zabývá přehledem možných uspořádání optické části navrhovaného nástavce. Ta jsou rozdělena do tří základních skupin podle způsobu měření. U každé skupiny jsou uvedeny základní výhody a nevýhody daného typu sestavení, které vycházející z předešlého teoretického souhrnu, a vhodnost jeho aplikace na přístroj Perkin Elmer Lambda 45.

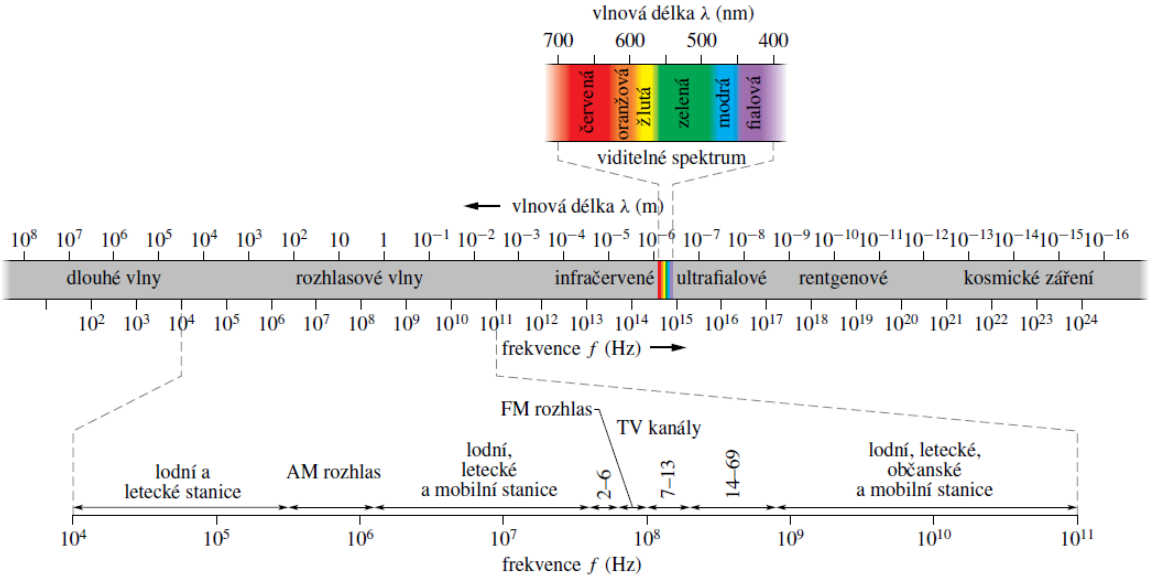
Poslední část pak obsahuje konstrukční řešení jak uspořádání optické části nástavce, tak způsob uchycení optických prvků. Na schématech je znázorněna trasa světelného svazku pro danou optickou sestavu ve všech možných měřicích konfiguracích. Trasa paprsku je pro názornost vyobrazena ve vizualizaci celého modelu nástavce. Při trasování paprsku bylo vzato v úvahu i jeho ovlivnění průchodem skrze vzorek a možné nežádoucí následky. Po rozboru uspořádání optického systému a trasy paprsku následuje rozbor mechanické části, kde jsou vyobrazeny a popsány všechny konstrukční prvky nástavce a jejich funkce. Výstupem této práce je pak návrh plně funkčního nástavce pro přístroj Perkin Elmer Lambda 45, který umožňuje měření absolutní odrazivosti i propustnosti vzorku.

2. SVĚTLO

Světlem je nazývána jen ta část elektromagnetického záření, kterou vidíme, tj. ta část, která působí na sítnici lidského oka. Tento poměrně úzký rozsah elektromagnetického spektra lze vymezit pomocí frekvence f (kterou vnímáme jako barvu) nebo vlnové délky λ v daném prostředí. Vztah mezi těmito veličinami je dán vztahem:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \tag{2.1}$$

kde v je rychlost světla v daném prostředí.

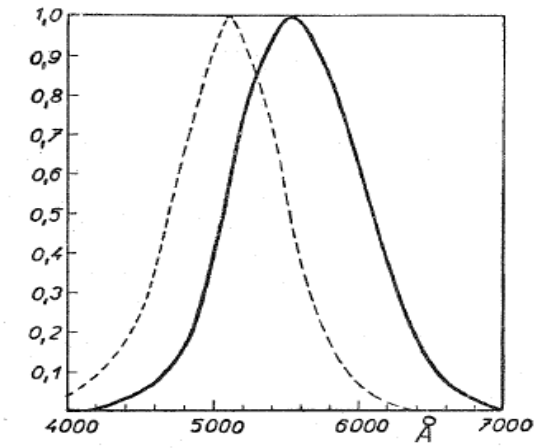


Obrázek 1: Elektromagnetické spektrum. Převzato z [1].

Na obrázku 1 je vyobrazeno viditelné světlo jako relativně malá část celého elektromagnetického spektra. Spektrum elektromagnetického záření prakticky nemá horní ani spodní hranici, vlny s nejnižší vlnovou délkou na Zemi dopadají jako kosmické záření, naopak ty s velkou vlnovou délkou jsou používány v telekomunikacích.

2.1. Vnímání světla lidským okem

Průměrné lidské oko nemá stejnou citlivost na všechny vlnové délky, které dokáže vnímat. Tato citlivost je největší pro barvu žlutozelenou s vlnovou délkou λ = 555 nm a asymptoticky klesá k nule pro vyšší i nižší vlnové délky. Pro hodnotu 1 % maximální citlivosti oka leží interval viditelné vlnové délky mezi hodnotami 430 nm (fialová) a 690 nm (červená). Pokud je intenzita světla dostatečně vysoká, může průměrné lidské oko vnímat vlnové délky i mírně za těmito hranicemi. Obrázek 2 znázorňuje citlivost oka za dobrých a zhoršených světelných podmínek, jako je denní světlo a šero nebo noc. Citlivost se za šera přesouvá k nižším vlnovým délkám s maximem citlivosti při 510 nm. Toto posunutí citlivosti se nazývá Purkyňův jev [2].



Obrázek 2: Citlivost oka za dobrých a zhoršených světelných podmínek. Přerušovaná křivka znázorňuje citlivost oka za zhoršených světelných podmínek. Převzato z [2].

3. ZÁKLADNÍ OPTICKÉ CHARAKTERISTIKY

3.1. Rychlost světla

Rychlost světla je různá v jednotlivých prostředích, ve kterých se světlo šíří. Pro vakuum je rychlost určena vztahem:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}, \tag{3.1}$$

kde ε_0 je permitivita vakua a μ_0 je permeabilita vakua. Pro účely výpočtů volíme $c = 3 \cdot 10^8\ \mathrm{ms}^{-1}$ [1].

Rychlost šíření světla pro ostatní homogenní izotropní nemagnetická prostředí je dána rovnicí:

$$v^2 = \frac{1}{\varepsilon \mu_0}, \tag{3.2}$$

kde ε je permitivita daného prostředí, která je součinem relativní permitivity prostředí ε_r a permitivity vakua:

$$\varepsilon = \varepsilon_\mathrm{r} \varepsilon_0. \tag{3.3}$$

3.2. Index lomu

Index lomu izotropního homogenního prostředí je definován vztahem [2]:

$$n = \frac{c}{v}, \tag{3.4}$$

kde c je rychlost světla ve vakuu (která je pro všechny vlnové délky stejná) a v je rychlost světla v daném prostředí. Index lomu je základní charakteristikou optických materiálů, pro vakuum je tedy roven jedné a pro všechna ostatní prostředí je vždy $n > 1$. Pro pevné látky je index lomu v řádech jednotek. U optických skel pak od 1,46 do 1,76. Voda má index lomu 1,33 což je z kapalin nejméně [2]. Index lomu lze také vyjádřit pomocí vlnových délek světla ve vakuu a v daném prostředí pomocí vztahu:

$$n = \frac{\lambda}{\lambda'}, \tag{3.5}$$

kde λ je vlnová délka světla ve vakuu a λ' vlnová délka téhož světla v daném prostředí. Protože je ve všech prostředích s výjimkou vakua rychlost světla pro jednotlivé vlnové délky různá, dosazuje se za index lomu dané látky jeho hodnota pro žlutou spektrální čáru hélia d[1] s vlnovou délkou λ=587,6 nm.

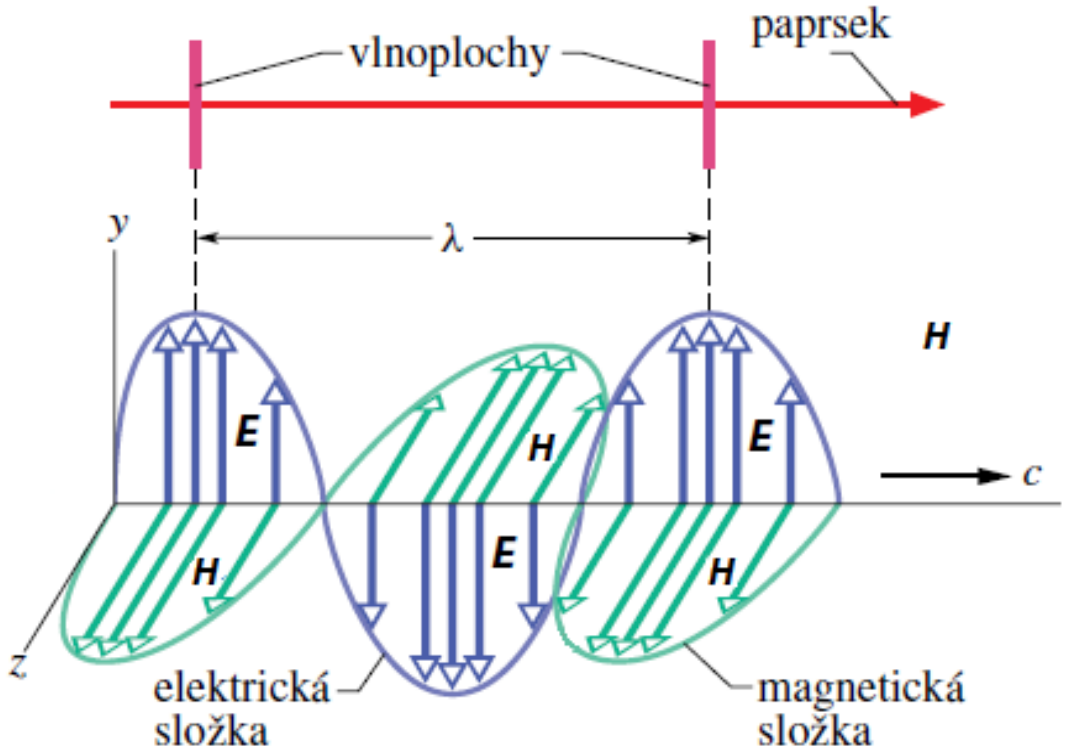
3.3. Světlo jako Elektromagnetická vlna

Jak je vidět na obrázku 3, elektromagnetická vlna se skládá ze dvou na sebe kolmých vln – vlny elektrické a magnetické. Elektromagnetická vlna je charakterizována frekvencí (z níž lze odvodit vlnovou délku ve vakuu podle (2.1)) a intenzitou. Intenzitu světla lze popsat pomocí Umovova-Poyntingova vektoru:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}, \tag{3.6}$$

kde $\vec{E}$ je vektor intenzity elektrického pole, $\vec{B}$ je vektor intenzity magnetického pole. Směr Poyntigova vektoru $\vec{S}$ udává v každém bodě směr přenosu energie. Ten v homogenním prostředí udává i směr šíření vlny [1].

[1] Také jinak nazývána Fraunhoferova čára D pro helium.



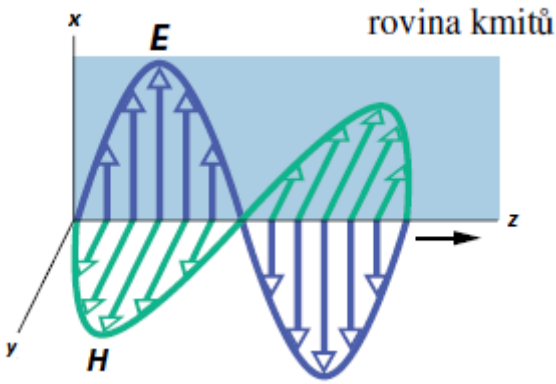
Obrázek 3: Schematické znázornění elektromagnetické vlny. Převzato z [1].

3.4. Lineární polarizace

Světelná rovinná vlna šířící se nemagnetickým dielektrikem je určena amplitudou elektrického pole E nebo amplitudou magnetického pole H. Mezi těmito amplitudami platí vztah:

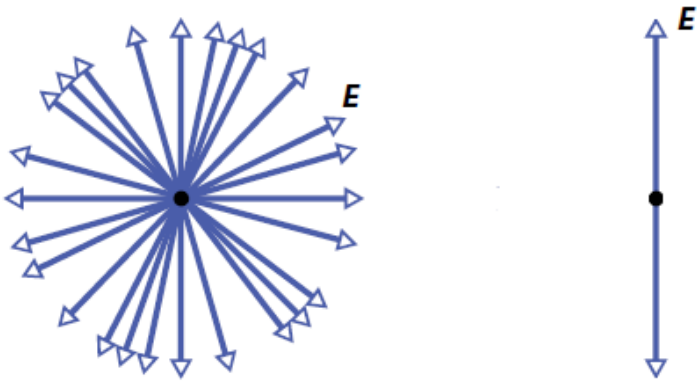
$$\frac{H}{E} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu_0}} = n\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}, \tag{3.7}$$

kde ε je permitivita daného prostředí a n je index lomu daného prostředí. Z rovnice (3.7) vyplývá, že poměr amplitud závisí na prostředí, ve kterém se vlna šíří. Pro praktické účely postačí, pokud se omezíme pouze na vektor intenzity elektrického pole $\vec{E}$ a rovinu kmitů, ve které se tento vektor šíří.



Obrázek 4: Rovina kmitů v souřadném systému. Převzato z [1].

Tato rovina je vždy kolmá ke směru šíření vlny jak lze vidět na obrázku 4. U elektromagnetických vln vysílaných běžnými zdroji světla má $\vec{E}$ nahodilý směr. V případě, že je tato rovina v postupující vlně stálá, hovoříme o lineárně polarizovaném světle. Rozdíl mezi náhodně polarizovaným světlem a světlem polarizovaným lineárně je vyobrazen na obrázku 5.



Obrázek 5: Zobrazení rovin pro přirozené a polarizované světlo. Převzato z [1].

Polarizační rovina, jako rovina elektrického pole $\vec{E}$, je kolmá na rovinu magnetického pole $\vec{H}$. Pokud tuto polarizační rovinu označíme jako rovinu xz a rovinu magnetických kmitů jako rovinu yz pak se rovnice udávající vztah pro vektorové vlny $\vec{E}$ a $\vec{H}$ zjednoduší na vztah:

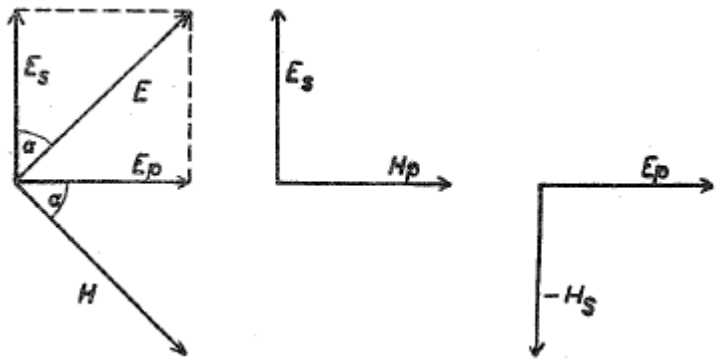
$$\vec{H} \equiv \vec{H}_y = n\sqrt{\frac{\varepsilon_v}{\mu_v}}\,\vec{E}_x \equiv n\sqrt{\frac{\varepsilon_v}{\mu_v}}\,\vec{E}. \tag{3.8}$$

Pro optické pozorování a měření je však vhodnější souřadný systém vztažený k rovině dopadu, tedy rovinu proloženou paprskem dopadajícím a odraženým. Označíme li úhel, který svírá polarizační rovina (rovina vektoru $\vec{H}$) s rovinou dopadu α (stejný uhel svírá i rovina kmitů elektrické intenzity s kolmicí na rovinu dopadu), jsou pak dány složky vektoru $\vec{E}$ vztahy:

$$\vec{E}_p = E\,sin\alpha\;\vec{I}\,, \tag{3.9}$$

$$\vec{E}_s = E\ cos\alpha\ \vec{J},$$

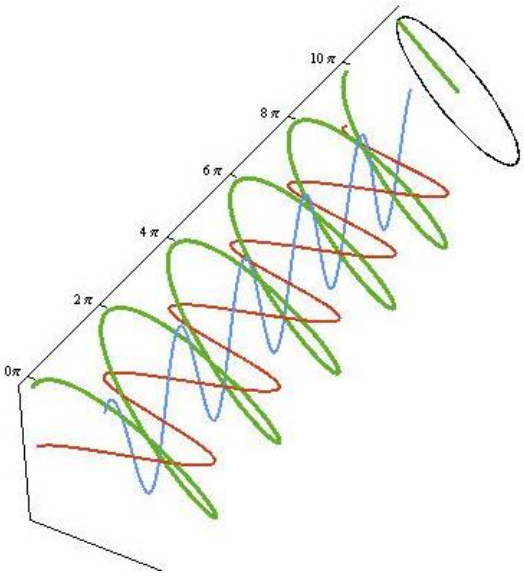
kde $\vec{E}_p$ je složka vektoru elektrické intenzity spadající do roviny dopadu a $\vec{E}_s$ je složka vektoru elektrické intenzity spadající do roviny kolmé k rovině dopadu, $\vec{I}$ je jednotkový vektor pro osu x a $\vec{J}$ je jednotkový vektor pro osu y. Protože rovina vlny magnetického pole $\vec{H}$ je kolmá na rovinu elektrického pole, složka magnetického pole $\vec{H}_p$ přísluší složce elektrického pole $\vec{E}_s$ a složka magnetického pole $\vec{H}_s$ přísluší složce elektrického pole $\vec{E}_p$ (viz obrázek 6).



Obrázek 6: Složky lineárně polarizovaného světla. Pokud je rovina polarizace natočena o úhel α vůči rovině dopadu, pak je vektor intenzity elektrického pole výslednicí dvou vektorů elektrických vln v na sobě kolmých rovinách, a to vektoru $\vec{E}_p$ v rovině dopadu vlny a vektoru $\vec{E}_s$ v rovině kolmé na tuto rovinu které jsou ve stejné fázi (vztah (3.9)). Převzato z [2].

3.5. Eliptická polarizace

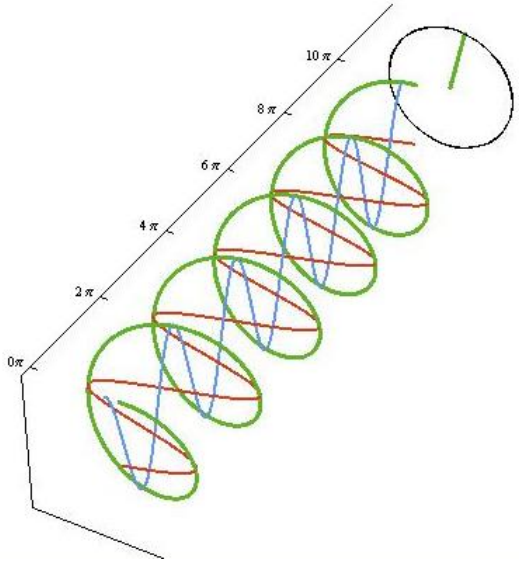
Případ lineárně polarizovaného světla je speciálním případem elektromagnetické vlny, ve které obě složky mají stejnou nebo opačnou fázi. Tyto složky však v obecných případech mohou být od sebe i jinak vzájemně fázově posunuty. Tento fázový posuv může vzniknout například při odrazu na tenké vrstvě nebo na kovovém zrcadle. V obou případech jsou takto fázově posunuty obě složky vektoru ($\vec{E}_p$ i $\vec{E}_s$). Výsledný vektor vlny už pak nadále není rovinný, ale přejde v prostorovou šroubovici. Při pohledu z roviny kolmé na směr šíření elektromagnetické vlny se potom tato šroubovice jeví jako elipsa, jak jde vidět na obrázku 7. S ohledem na směr, ve kterém výsledný vektor obíhá při svém postupu vpřed, rozlišujeme světlo na elipticky polarizované vlevo (proti směru hodinových ručiček) tj. kladná eliptické polarizace a elipticky polarizované vpravo (ve směru hodinových ručiček) nebo také se zápornou eliptickou polarizací (viz obrázek 9).



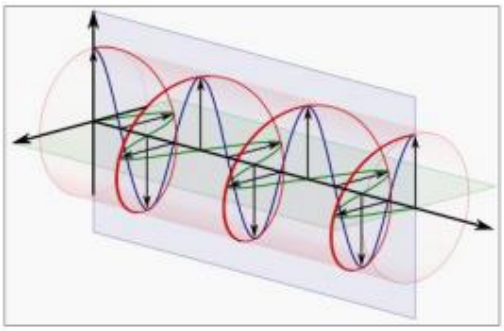
Obrázek 7: Grafické znázornění eliptické polarizace. Převzato z [3].

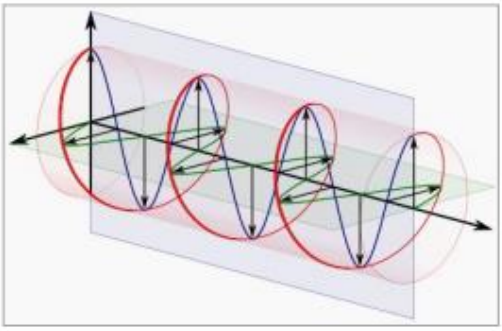
3.6. Kruhová polarizace

Zvláštním případem eliptické polarizace je kruhová polarizace. Ta vzniká, když se poloosy elipsy sobě rovnají. Tato situace nastane, když jsou $\vec{E}_p$ a $\vec{E}_s$ od sebe vzájemně posunuty ve fázi o $\frac{\pi}{2}$ nebo $\frac{3\pi}{2}$ a zároveň se sobě rovnají, jak jde vidět na obrázku 8. Kruhová polarizace se rozděluje na levou a pravou podle stejných pravidel jako polarizace eliptická. Všechny typy polarizace v závislosti na fázovém posunu jsou znázorněny na obrázku 10.

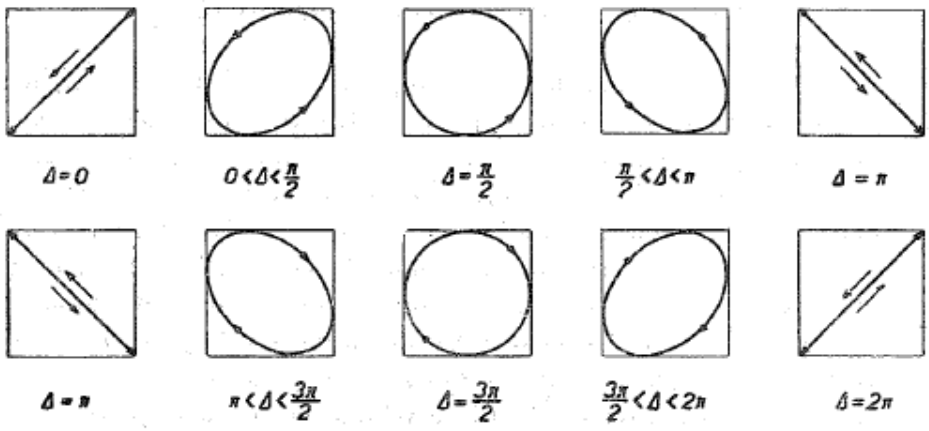


Obrázek 8: Grafické znázornění kruhové polarizace. Převzato z [3].





Obrázek 9: Pravá (záporná) kruhová polarizace. Levá (kladná) kruhová polarizace.



Obrázek 10: Polarizace světla pro různé fázové posuny. Převzato z [2].

3.7. Přirozené světlo

Světlo přirozené lze brát jako množinu lineárně polarizovaných světel, která stále a nepravidelně mění svoji rovinu kmitu. Jak již bylo ukázáno, každý rovinný kmit lze rozdělit do dvou na sebe kolmých složek (jedna složka ležící v rovině dopadu, druhá v rovině na ní kolmé). I přirozené světlo jako celek je možné rozdělit do těchto složek. Celková intenzita přirozeně polarizovaného světla se pak rozdělí rovnoměrně do těchto jednotlivých složek:

$$I = \frac{I_p}{2} + \frac{I_s}{2}. \tag{3.10}$$

Všechny důsledky, které vyplývají z tohoto předpokladu, byly dokázány optickými měřeními [2].

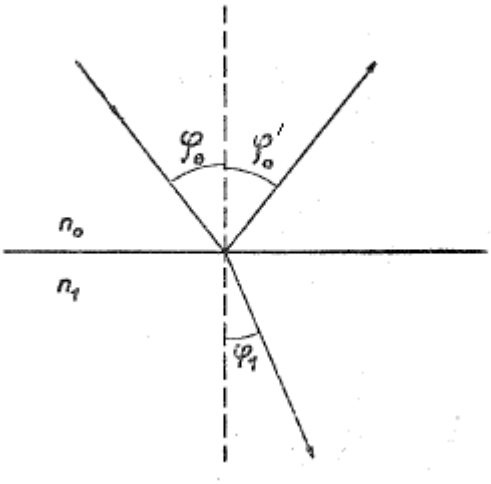
4. ŠÍŘENÍ PAPRSKŮ OPTICKÝM PROSTŘEDÍM

4.1. Zákon odrazu

Pro paprsky šířící se poloprostorem platí zákon odrazu, který zní: „Úhel odrazu světla se rovná úhlu dopadu," a matematicky jej lze popsat jako:

$$\varphi_0 = \varphi_0{}', \tag{4.1}$$

kde φ_0 je úhel dopadu a $\varphi_0{}'$ je úhel odrazu. Úhly měříme směrem od kolmice k povrchu dopadu vztyčené v místě dopadu (viz obrázek 11).



Obrázek 11: Znázornění úhlů dopadu, odrazu a lomu. Převzato z [2].

4.2. Snellův zákon lomu

Lom světla na rozhraní dvou prostředí je dán vztahem:

$$\frac{\sin\varphi_1}{\sin\varphi_0} = \frac{n_1}{n_0}, \tag{4.2}$$

kde je $\varphi_0$úhel dopadu, $\varphi_1$úhel lomu, n_0 index lomu prvního prostředí, ze kterého paprsek přichází, a n_1 index lomu prostředí, do kterého paprsek vstupuje (viz obrázek 11). Úhly měříme od kolmice vztyčené na rozhraní dvou prostředí v místě dopadu. Vztah (4.2) se nazývá Snellův zákon a lze jej také zapsat pro případ průchodu světelného paprsku více prostředími s rovnoběžnými rozhraními kdy úhel lomu v předešlém prostředí je zároveň úhlem dopadu pro následující prostředí ve tvaru

$$n_0 \sin\varphi_0 = n_1 \sin\varphi_1 = n_2 \sin\varphi_2 = \cdots, \tag{4.3}$$

kde n_0, n_1, n_2, jsou indexy lomu jednotlivých prostředí a φ_0, φ_1, φ_2, jsou úhly dopadu respektive úhly lomu pro jednotlivá prostředí. Z této rovnice vyplývá, že součin indexu lomu a úhlu dopadu (lomu) je pro všechna prostředí stejný. Pokud světlo prochází z opticky řidšího prostředí (opticky řidší prostředí je takové, které má menší index lomu) do opticky hustšího prostředí ($n_0 < n_1$) pak $sin\varphi_0 > sin\varphi_1$ a $\varphi_0 > \varphi_1$, nastává lom ke kolmici. Může

nastat i situace, kdy je lomený paprsek rovnoběžný s rozhraním ($\varphi_1 = 90°$). Tento úhel lomu nastane při mezním úhlu dopadu φ_m:

$$\sin \varphi_m = \frac{n_1}{n_0}, \tag{4.4}$$

kde n_0 je index lomu prostředí, z něhož paprsek přichází a n_1 je index lomu prostředí, do kterého vstupuje. Pokud je úhel dopadu větší než tento mezní úhel dopadu, už nedochází k lomu světla, ale k plnému odrazu.

4.3. Disperze světla

Díky rozdílným rychlostem šíření světla s různou vlnovou délkou v jednotlivých prostředích vznikají různé indexy lomu n pro jednotlivé vlnové délky λ. Pro nejpoužívanější látky v optice, jako je křemen nebo sklo, je rychlost šíření největší pro červenou barvu a nejmenší pro barvu fialovou. Index lomu n naopak roste od červeného k fialovému světlu. Tento jev nazýváme normální disperzí. V opačném případě hovoříme o anomální disperzi. Pokud je index lomu závislý na vlnové délce, pak je podle Snellova zákona závislý na vlnové délce i úhel lomu. Při lomu bílého světla tedy dochází k disperzi (rozkladu) na jednotlivé barvy. Tento rozklad se nečastěji provádí hranolem. Abychom mohli plně posoudit disperzní spektrum vytvořené hranoly se stejným lámavým úhlem, použijeme pojmy: střední disperze, relativní disperze a Abbeovo číslo. Střední disperzi udává vztah:

$$n_f - n_c\,, \tag{4.5}$$

kde n_c a n_f jsou indexy lomu prostředí pro Fraunhoferovy čáry C a F. Relativní disperzi určuje vztah:

$$\frac{n_f - n_c}{n_d - 1}\,, \tag{4.6}$$

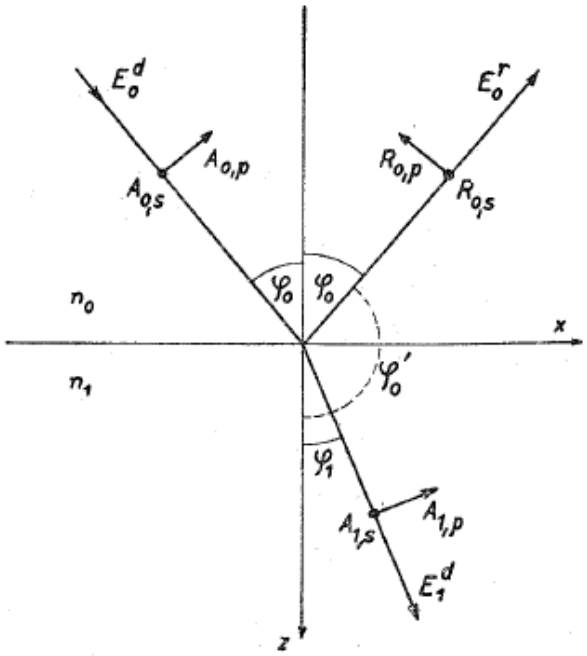
kde n_d je index lomu pro Fraunhoferovu čáru D. Protože relativní disperze je v praxi malé číslo, používá se častěji Abbeovo číslo, které je převrácenou hodnotou relativní disperze:

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_f - n_c}\,. \tag{4.7}$$

Abbeovo číslo optických skel nabývá hodnot mezi 20 (látky se silnou disperzí) a 70 (látky se slabou disperzí). Čím menší je Abbeovo číslo, tím větší je disperze.

4.4. Odraz a lom na rozhraní dvou dielektrik

Souřadný systém orientujme tak, že rovina rozhraní obou dielektrik je označena xy. Osa x je potom průmětem tohoto rozhraní a osa y je kolmá k nákresné rovině. Rovina xz je rovina dopadu, ve které se nachází dopadající, odražený a lomený paprsek. Vektorům v prvním prostředí, ze kterého světelný paprsek přichází, píšeme index 0, v druhém prostředí pak index 1. Označíme n a n indexy lomu jednotlivých prostředí. Vektor $\vec{E}_d^0$ rozdělíme na dvě složky: složku $\vec{A}_P^0$ v rovině dopadu, a složku $\vec{A}_S^0$ ležící v rovině kolmé na rovinu dopadu. Vektor odraženého paprsku $\vec{E}_r^0$ rozložíme na složky $\vec{R}_P^0$ a $\vec{R}_S^0$. Vektor lomené vlny $\vec{E}_d^1$ rozložíme do složek $\vec{A}_P^1$ a $\vec{A}_{PS}^1$. Index p pak vždy přísluší rovině dopadu a index s přísluší rovině k ní kolmé. Úhel dopadu označme φ_0, úhel odrazu φ_0' a úhel lomu φ_1. Popsaná situace je znázorněna na obrázku 12.



Obrázek 12: Orientace os a směrů rozložených vektorů. Převzato z [2].

Pokud permeabilitu obou dielektrik položíme rovnu permeabilitě vakua, tak pro rychlosti šíření paprsku v jednotlivých prostředích platí vztahy:

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 c}}, \qquad v_1 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_1 c}}. \tag{4.8}$$

Pokud kruhovou frekvenci označíme jako ω, a čas jako t, pak pro fázi dopadající světelné vlny τ_0^d, fázi odražené vlny τ_0^r a fázi lomené vlny τ_1^d platí následující vztahy:

$$\tau_0^d = \omega\left(t - \frac{x\,sin\varphi_0 + z\,cos\varphi_0}{v_0}\right), \tag{4.9}$$

$$\tau_0^r = \omega\left(t - \frac{x\,sin\,\varphi_0' + z\,cos\,\varphi_0'}{v_0}\right), \tag{4.10}$$

$$\tau_1^d = \omega\left(t - \frac{x\,sin\varphi_1 + z\,cos\varphi_1}{v_1}\right). \tag{4.11}$$

Poměr amplitudy odraženého a lomeného světla na rozhraní dvou izotropních homogenních lámavých dielektrik potom splňují:

$$r_p = \frac{R_{op}}{A_{op}} = \frac{tg\,(\varphi_0 - \varphi_1)}{tg\,(\varphi_0 + \varphi_1)}, \tag{4.12}$$

$$r_s = \frac{R_{os}}{A_{os}} = -\frac{\sin(\varphi_0 - \varphi_1)}{\sin(\varphi_0 + \varphi_1)}. \tag{4.13}$$

Dále poměr amplitudu světla prošlého rozhraním a světla dopadajícího určíme vztahy:

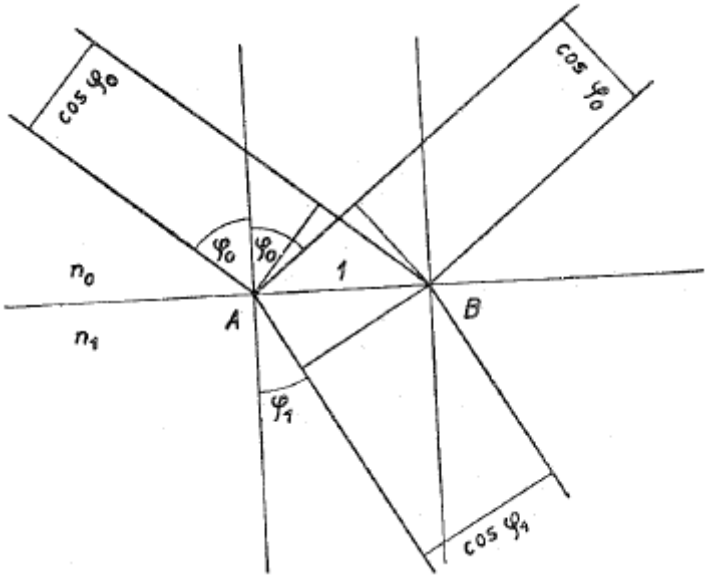
$$t_p = \frac{A_{1p}}{A_{op}} = \frac{2sin\varphi_1 - cos\varphi_0)}{sin(\varphi_0 + \varphi_1)\, cos(\varphi_0 + \varphi_1)}, \tag{4.14}$$

$$t_s = \frac{A_{1s}}{A_{os}} = \frac{2sin\varphi_1 - cos\varphi_0)}{sin(\varphi_0 + \varphi_1)}. \tag{4.15}$$

Znázornění vektorů a úhlů můžeme vidět na obrázku 12. Tyto vztahy se běžně označují jako Fresnelovy rovnice pro odraz a lom světla. Poměry r_P, r_s, t_P a t_s se označují jako činitelé zeslabení nebo Fresnelovy amplitudy.

4.5. Intenzita světla odraženého a lomeného rozhraním dvou dielektrik

Při výpočtu intenzity odraženého a lomeného světla na rovinném rozhraní dvou dielektrik vycházíme ze zákona o zachování energie. Pokud nevznikají žádné ztráty způsobené absorpcí, energie dopadajícího světla musí být stejná jako součet energií odraženého světla a světla lomeného. Protože jsme zavedli intenzitu, jako míru energie světla, která projde za jednotku času 1 s jednotkovou plochou, pak tento zákon zachovaní energie převedeme do tvaru, kdy intenzita dopadajícího světla musí byt rovna součtu intenzit světla odraženého a lomeného. Při této formulaci je však třeba zohlednit nejen různé indexy lomu pro dvě různá prostředí, ale také skutečnost, že lomem se mění průřez svazku světelných paprsků (odrazem se průřez světelného paprsku nemění). Pokud zvolíme myšlenou plošku 1 cm^2 na rozhraní 2 dielektrik, pak průřez světelných paprsků musí mít plochu rovnu $\cos\varphi_0$ a průřez svazku lomených paprsků musí mít plochu $\cos\varphi_1$, jak je znázorněno na obrázku 13.



Obrázek 13: Plocha průřezu jednotlivých světelných svazků. Převzato z [2].

Vyjdeme ze vztahu pro intenzitu světla:

$$I = n\,P\,\sqrt{\frac{\varepsilon_v}{\mu_v}}\,\frac{|E_0|^2}{2}, \tag{4.16}$$

podle kterého je intenzita přímo úměrná velikosti plochy P, indexu lomu a čtverci amplitudy intenzity elektrického pole [2]. Když následně dosadíme intenzitu světla odraženého a lomeného do poměru dostaneme pro složku p vztah:

$$\frac{I_p^r}{I_p^d} = \frac{R_{0p}^2}{A_{0p}^2} = r_p^2 = \left[\frac{tg\left(\varphi_0 - \varphi_1\right)}{tg\left(\varphi_0 + \varphi_1\right)}\right]^2. \tag{4.17}$$

Pro složku s vztah:

$$\frac{I_s^r}{I_s^d} = \frac{R_{0s}^2}{A_{0s}^2} = r_s^2 = \left[\frac{sin\left(\varphi_0 - \varphi_1\right)}{sin\left(\varphi_0 + \varphi_1\right)}\right]^2. \tag{4.18}$$

Intenzita dopadajícího světla se zpravidla klade rovna jedné. Pak platí, že intenzita odraženého světla se rovná čtverci Fresnelových amplitud pro odražené světlo.
Při výpočtu intenzity světla lomeného rozhraním musíme brát v úvahu změnu prostředí. Tedy změnu indexu lomu a také změnu průřezu svazku světelných paprsků. Vyjdeme-li opět ze vztahů (4.17) a (4.18)a dáme je do poměru a vyjdeme-li ze Snellova zákona a zákona zachování energie dostaneme potom rovnice:

$$A_{0p}^2 = R_{0p}^2 + A_{1p}^2\, tg\varphi_0\, cotg\varphi_1, \tag{4.19}$$

$$A_{0s}^2 = R_{0s}^2 + A_{1s}^2\, tg\varphi_0\, cotg\varphi_1. \tag{4.20}$$

Nebo vyjádřené pomocí Fresnelových amplitud:

$$1 - r_p^2 = t_p^2\, tg\varphi_0\, cotg\varphi_1, \tag{4.21}$$

$$1 - r_s^2 = t_s^2\, tg\varphi_0\, cotg\varphi_1. \tag{4.22}$$

4.6. Kolmý dopad

Zvláštní případ nastane při kolmém dopadu světla na rozhraní. Úhel dopadu, úhel odrazu i úhel lomu jsou rovny nule. Z toho vyplývá, že $\cos\varphi_0$ a $\cos\varphi_1$ se rovnají 1. Po dosazení těchto hodnot dostaneme pro odražené světlo

$$r_p = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} = -r_s. \tag{4.23}$$

A podobně pro lomené světlo:

$$t_p = t_s = \frac{2n_0}{n_1 + n_0}. \tag{4.24}$$

Vztahy mezi těmito amplitudami jsou pak dány rovnicemi

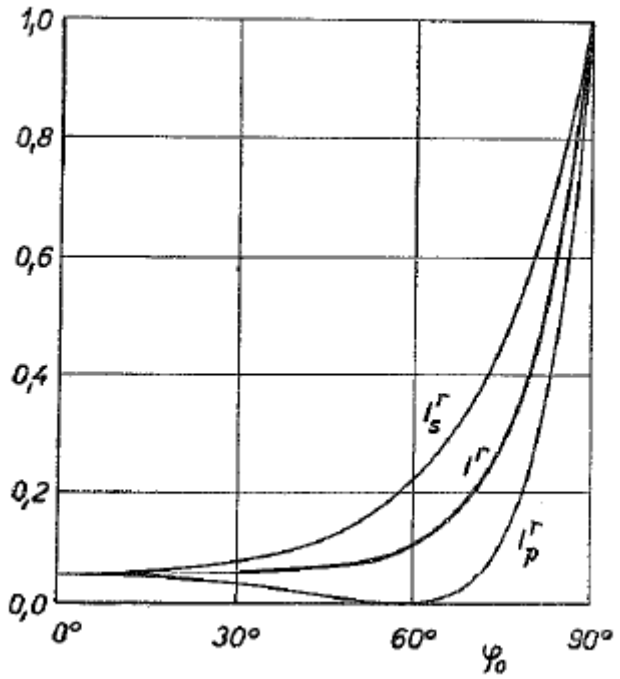
$$n_0\left(1 + r_p\right) = n_1\, t_p, \tag{4.25}$$

$$1 + r_s = t_s. \tag{4.26}$$

Je vidět, že obě složky odraženého světla při kolmém dopadu mají stejnou hodnotu, ale liší se znaménkem. Hodnota intenzity odraženého světla je však pro tento úhel nejmenší a nazýváme ji *odrazivostí*.

4.7. Šikmý dopad

Jedině při úhlu dopadu 0° se intenzity složek p i s reflektovaného světla shodují. Přibližné hodnoty obou složek v závislosti na úhlu dopadu lze vidět na obrázku 14.



Obrázek 14: Závislost intenzity reflektovaného světla pro složky p a s na úhlu dopadu. Převzato z [2].

Jak je vidět, při malých úhlech dopadu se intenzity jednotlivých složek liší jen nepatrně a s rostoucím úhlem se liší více. Intenzita složky p reflektovaného světla se v okolí 60° rovná nule. Odráží se tedy jen složka s a dochází k úplné lineární polarizaci odrazem. Tento úhel se nazývá polarizačním úhlem a jeho přesnou hodnotu určuje Brewsterův zákon [2]

$$\varphi_p = arctg\ n \tag{4.5}$$

4.8. Relativní a absolutní odrazivost

Při měření absolutní odrazivosti, se přímo měří odrazivost zkoumaného vzorku. Aby bylo možné měřit absolutní odrazivost, je nutné, aby paprsek měl stejnou dráhu jak při měření se vzorkem tak bez vzorku. Také počet zrcadel v sestavě musí být zachován stejně jako úhly dopadu na tyto zrcadla. Konstrukčně jednoduší sestavy však neumožňují splnění těchto podmínek. Pro vyhodnocení relativní odrazivosti je nejprve změřena intenzita světla odraženého od zrcadla se známou hodnotou odrazivosti. Poté je zrcadlo vyměněno za měřený vzorek. Výsledkem měření je poměr intenzity odraženého paprsku od vzorku a od zrcadla, takzvaná relativní odrazivost vzorku.

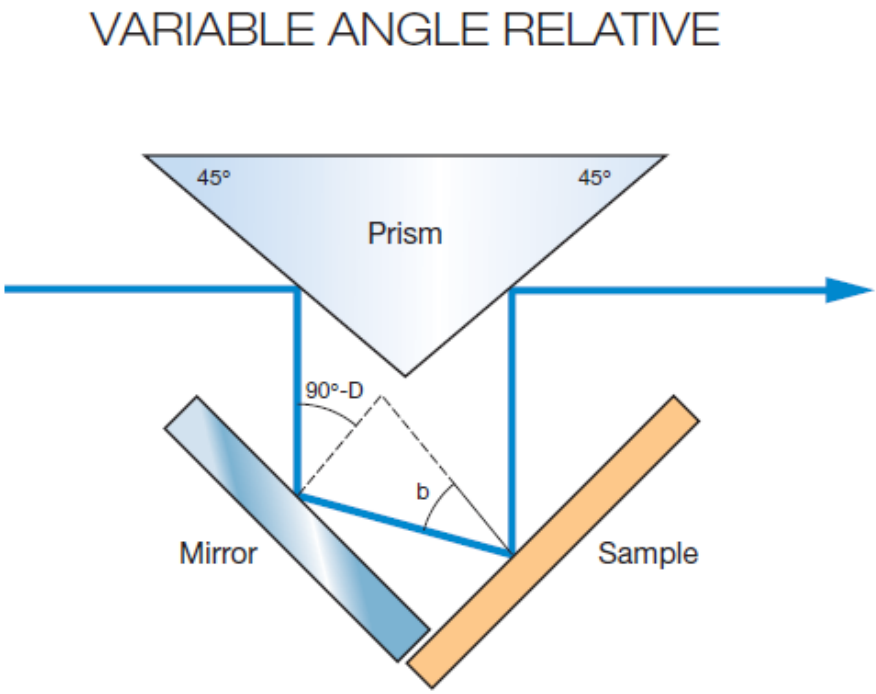
5. SOUHRN MOŽNÝCH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ

5.1. Specifikace měřicího prostoru přístroje

Měřicí prostor má rozměry 120 × 280 × 130 mm^3a obsahuje dva páry zdroj-fotodetektor. Zdroj i detektor jsou v obou případech v jedné rovině. Jeden pár slouží k měření intenzity světla ovlivněného měřeným vzorkem, druhý pak měří nezměněný paprsek. Tímto způsobem lze matematicky popsat vlivy vnějšího prostředí a světelného znečištění. Spodní stěna měřicího prostoru se dá odstranit, čímž dojde k zvětšení prostoru o 50 mm, tedy na 120 × 280 × 180 mm^3 Povrch prostoru pod spodní stěnou není černěný jako zbytek vnitřku přístroje, je otevřený a po odstranění této stěny by mohlo vznikat přílišné světelné znečištění, které by znehodnotilo měření.

5.2. V-A uspořádání

Na obrázku 15 je naznačeno V-A uspořádání. Toto uspořádání umožňuje měření vzorků větších rozměrů i v prostorově menších zařízeních díky své kompaktnosti. Díky nastavitelnému úhlu zrcadlového hranolu (Prism na obrázku 15) lze vzorek proměřit ve více bodech a předejít tak nepřesnostem v měření způsobenými lokálním narušením nebo znečištěním povrchu.



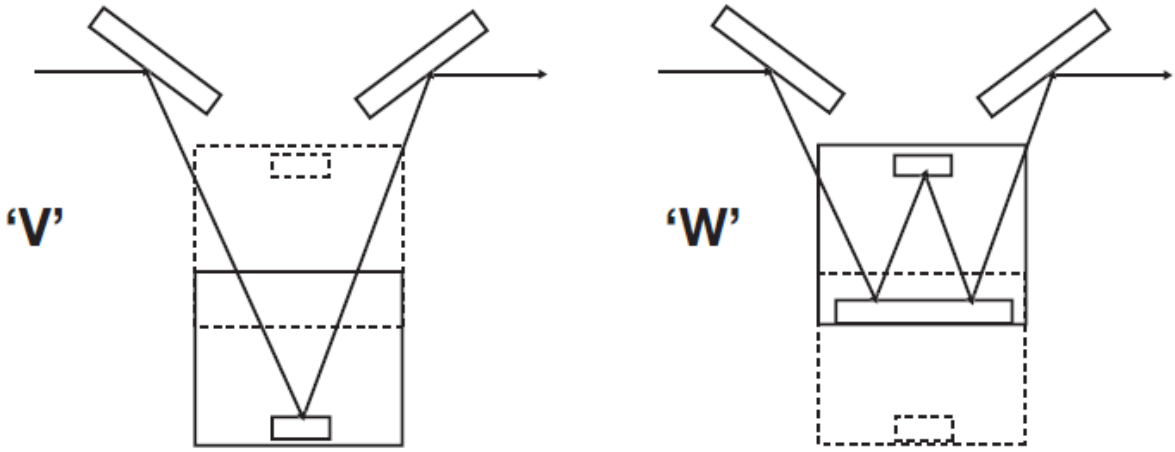
Obrázek 15: Schéma uspořádání V-A. Převzato z [4].

Natočením hranolu lze také nastavit úhel dopadu světelného paprsku na měřený vzorek. Tímto lze proměřit odrazivost vzorku v závislosti na úhlu dopadu, nebo změřit polarizační úhel. V tomto uspořádání je emitor světelného paprsku v jedné přímce s fotodetektorem. Velkou nevýhodou tohoto uspořádání je možnost měřit pouze relativní odrazivost. Pro změření odrazivosti jednoho neznámého vzorku je tedy nutné provést dvě měření,

přičemž pro druhé měření je provedena záměna vzorku za zrcadlo se známou odrazivostí pro měřené úhly. Z těchto dvou naměřených hodnot se skutečná odrazivost určí výpočtem.

5.3. V-W uspořádání

Obrázek 16 znázorňuje uspořádání, které umožňuje měření absolutní odrazivosti. Paprsek se odráží od shodných zrcadel jak při měření se vzorkem tak bez něj. V případě měření vzorku se zrcadlo sklopí do protější polohy a vzorek se umístí pod zrcadlo, jak lze vidět na obrázku 16.

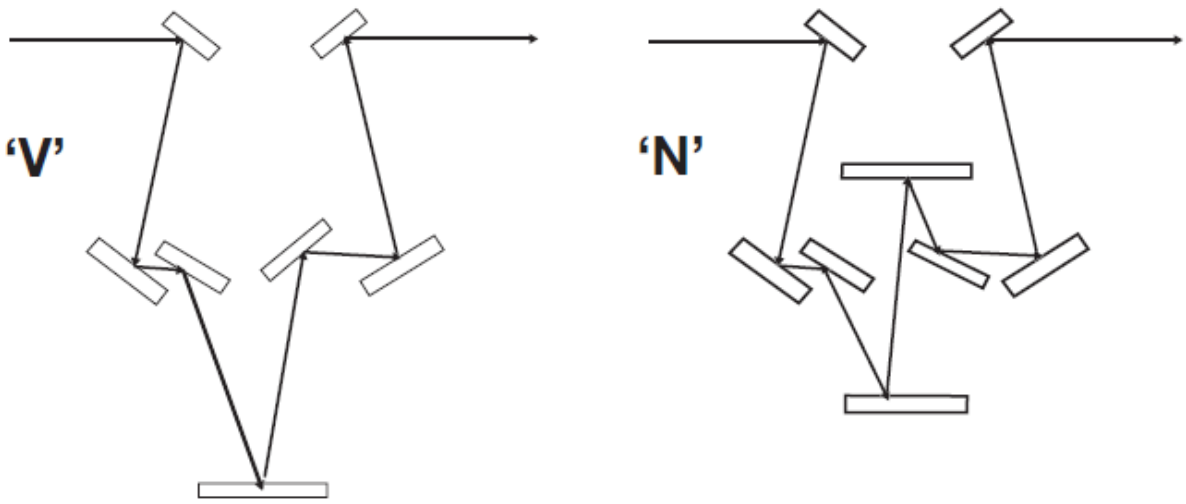


Obrázek 16: Schéma uspořádání V-W. Převzato z [4]

Mezi výhody tohoto uspořádání patří malé úhly dopadu, nenáročnost na konstrukci a malý počet zrcadel. Celkové sestavení je také ve srovnání s jinými uspořádáními rozměrově menší. Při měření vzorku však dochází k dvojnásobnému odrazu od vzorku. Tímto se můžou částečně odstranit chyby v měření vzniklé lokálním znečištěním nebo poškozením povrchu vzorku. Také je možné měřit rozměrově větší vzorky. Vzorek však musí být minimálně v jedné ose delší, než rozteč dvou míst, kde na něj dopadají paprsky, což znemožňuje měření malých vzorků. Výsledkem měření na tomto sestavení je pak druhá mocnina odrazivosti měřeného vzorku, která po odmocnění představuje průměrnou odrazivost dvou míst, od kterých se paprsek odráží.

5.4. V-N uspořádání

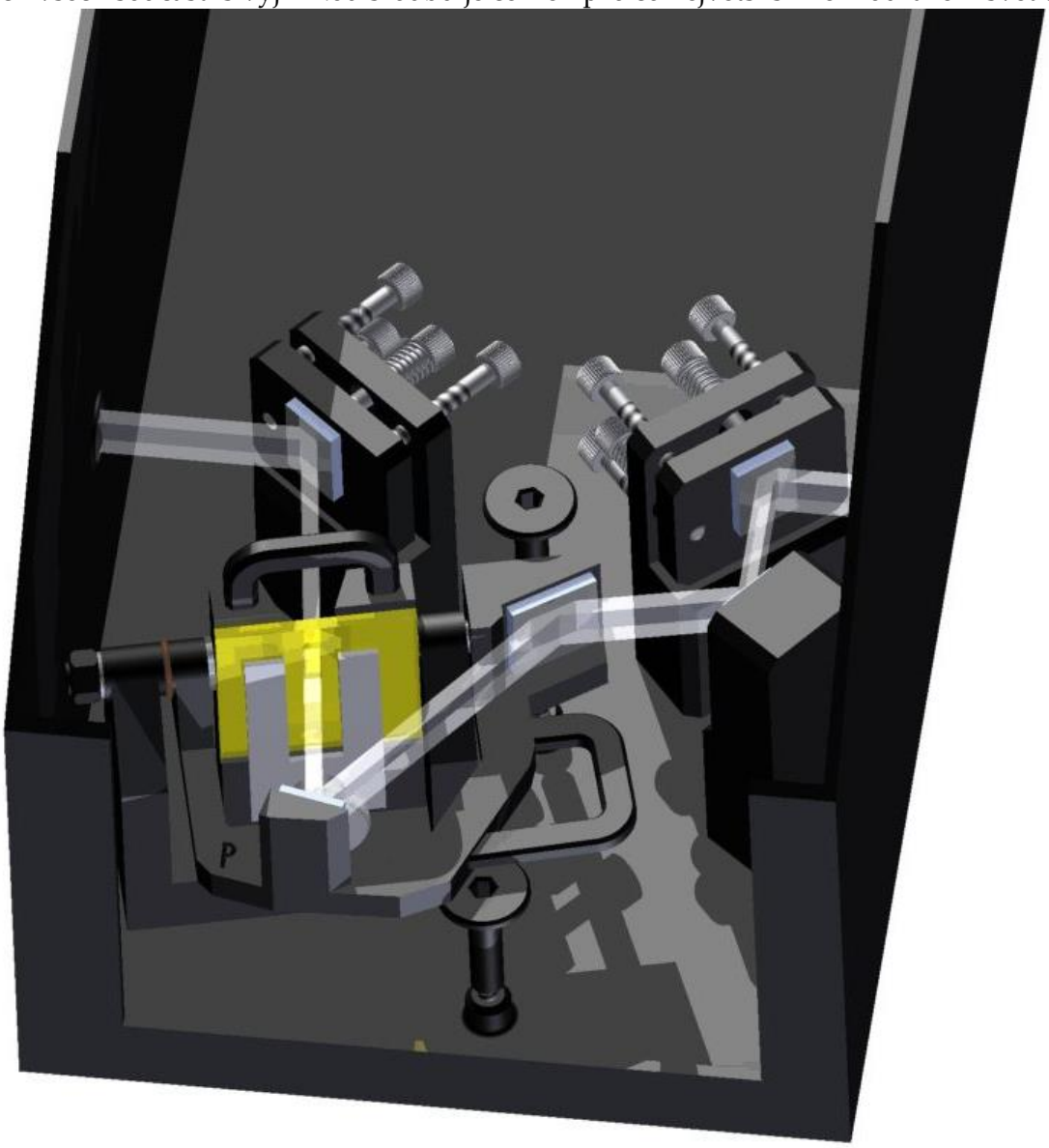
Konstrukčně nejsložitější uspořádání, jehož hlavní výhodou je přímé měření absolutní odrazivosti vzorku, bez dalších přepočtů, se nazývá V-N uspořádání. Jeho hlavní nevýhodou je pak velký počet zrcadel a rozměrová náročnost sestavení. Princip měření spočívá v symetrii optické dráhy, kterou paprsky projdou jak při založení vzorku do přístroje, tak při jeho odebráním. Této symetrie se dosahuje překlopením dvou zrcadel, přičemž se zrcadlo výhodně umístěné v ose překlápění pouze přetočí (viz obrázek 17). Při tomto uspořádání lze dosáhnout malých úhlů dopadu.



Obrázek 17: Schéma uspořádání V-N. Převzato z [4]

6. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ NÁSTAVCE

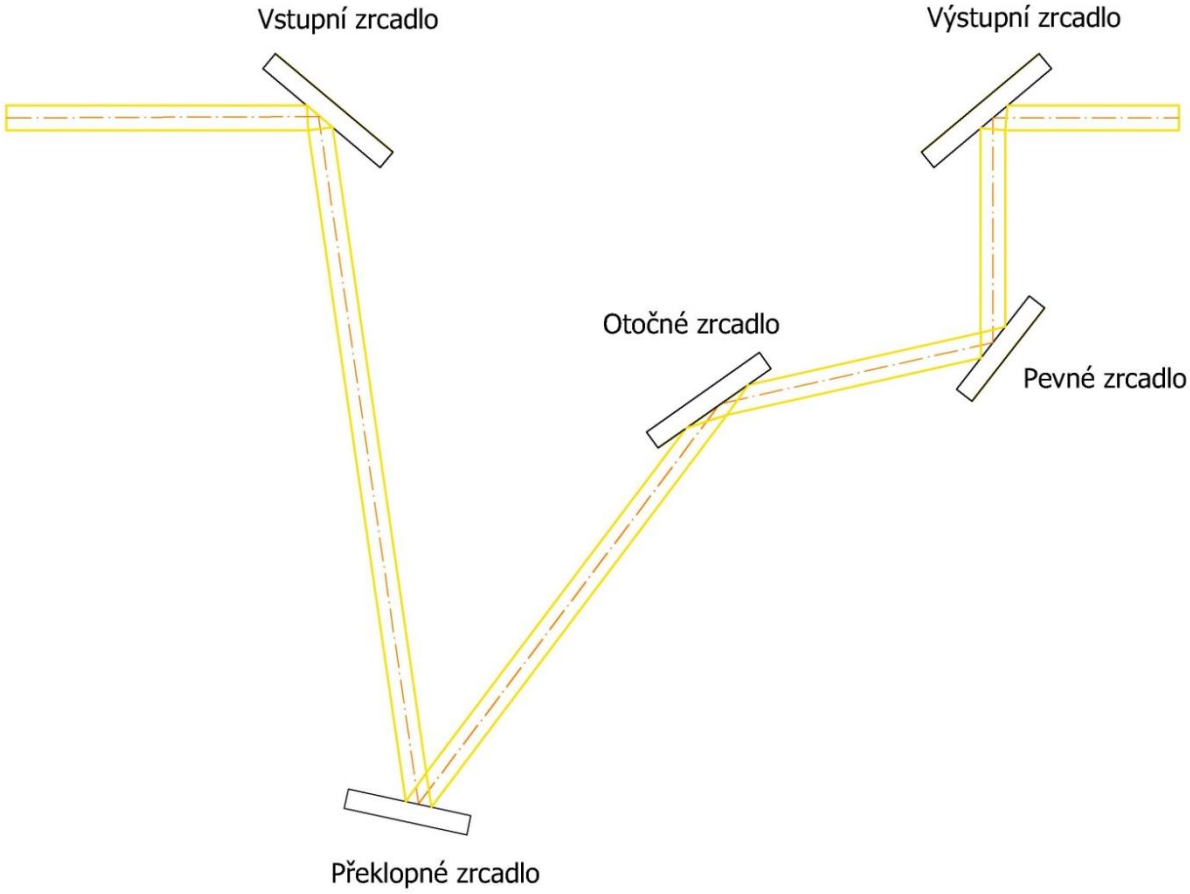
Navržená konstrukce vychází z V-N uspořádání a je dále poupravena. Pomocí navrženého nástavce lze měřit jak absolutní odrazivost neznámého vzorku, tak jeho propustnost (pouze u vzorků bez absorbce). Sestavení obsahuje 5 kovových zrcadel (first surface mirror) z katalogu [5]. Čtyři o rozměru 10x10 mm a jedno o rozměru 14x10 mm kvůli úhlu dopadu. Rozměry zrcadel byly voleny tak, aby rozměr světelného svazku byl menší než 80 % rozměru zrcadla v příslušné ose. Původní spodní deska byla nahrazena novou z důvodu nekompatibility s některými komponentami a pro zjednodušení montáže nových prvků. Na obrázku 18 lze vidět celé konstrukční řešení vymodelované ve studentské verzi programu Autodesk Inventor Professional 2011. Model obsahuje trasu svazku světelných paprsků (na obrázku znázorněno bílou barvou). Měřený vzorek je znázorněn žlutou barvou. Povrch všech součástí s výjimkou šroubů je černěn pro co největší snížení odrážení světla.



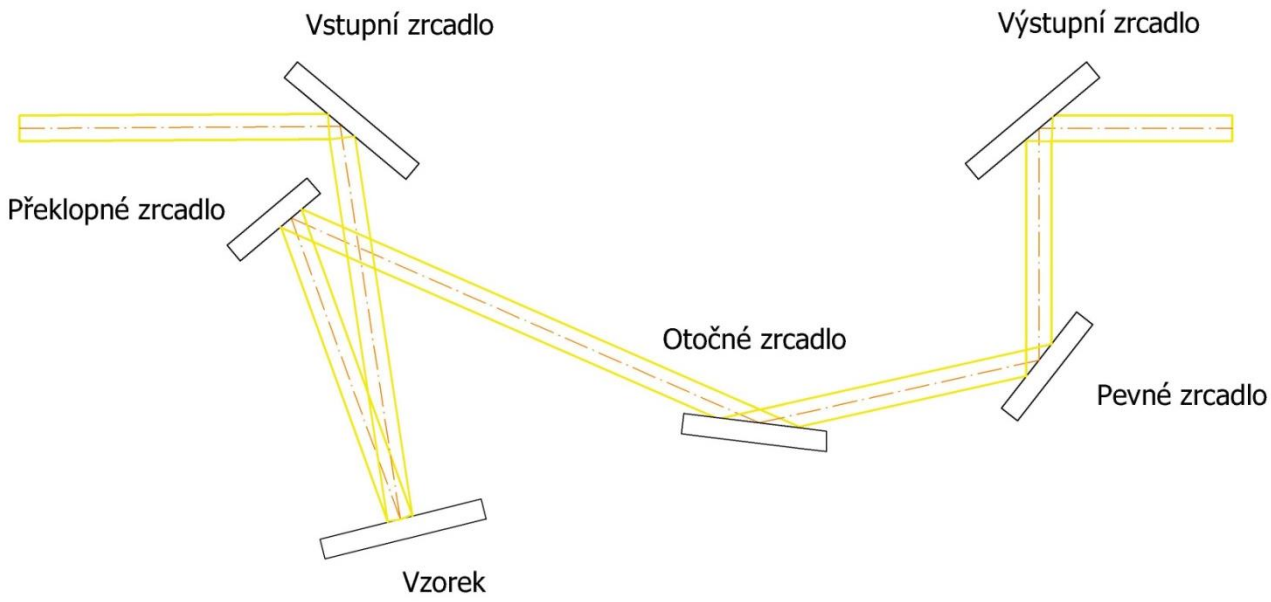
Obrázek 18: Vizualizace modelu celé sestavy. Model obsahuje trasu svazku světelných paprsků (na obrázku znázorněno bílou barvou). Měřený vzorek je znázorněn žlutou barvou. Povrch všech součástí s výjimkou šroubů, je černěn pro co největší snížení odrážení světla.

7. MĚŘENÍ POMOCÍ NÁSTAVCE

Měření absolutní odrazivosti umožňuje nezměněná trasa světelného svazku při měření jeho intenzity bez vzorku i s vloženým vzorkem. Při těchto dvou měřeních se nemění ani počet zrcadel, od kterých se svazek odráží a nemění se ani úhly dopadu na tyto zrcadla, jak lze vidět na obrázcích 19 a 20. Referenční svazek zůstává po celou dobu měření neovlivněn.

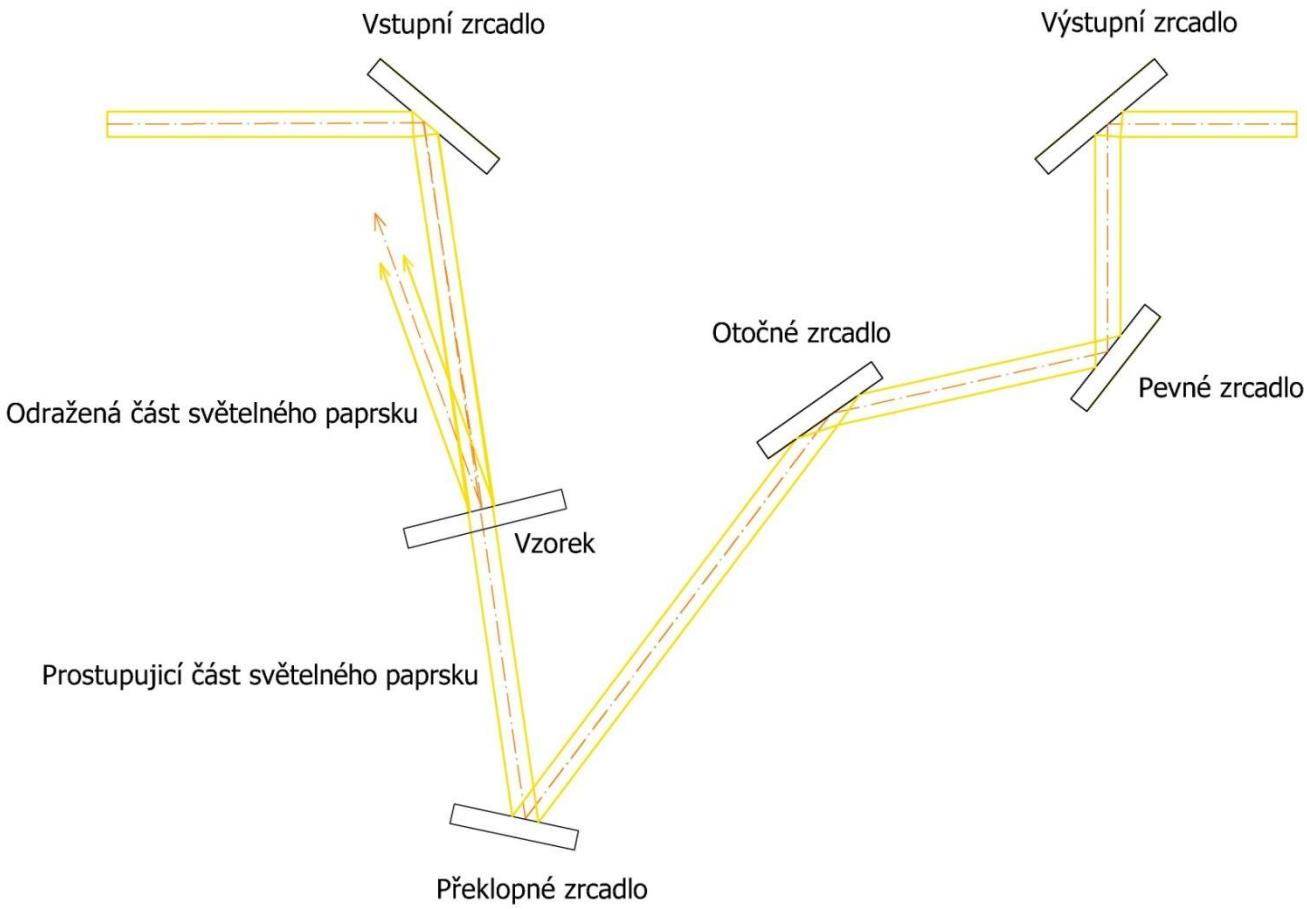


Obrázek 19: Trasa paprsku při měření 100% intenzity.



Obrázek 20: Trasa paprsku při měření odrazivosti vzorku.

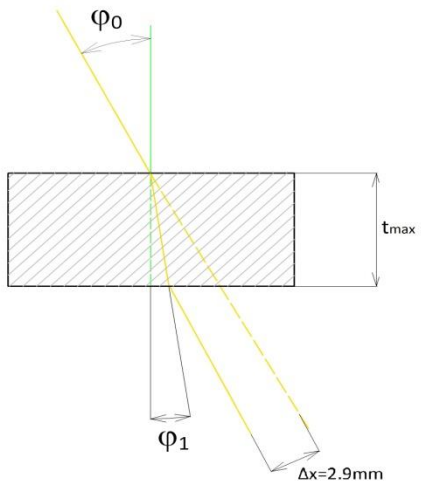
Pro měření světelného svazku, který prošel vzorkem, zůstává překlopné zrcadlo ve stejné poloze jako při měření 100% intenzity svazku, vzorek se pak vloží na stejné místo jako při měření jeho odrazivosti. Odražená část světelného svazku svou trajektorií mine všechna zrcadla a nedostane se k fotodetektoru (znázorněno na obrázku 21). Část, která projde skrz měřený vzorek, se odráží od překlopného zrcadla a pokračuje v trajektorii jako při měření 100% intenzity.



Obrázek 21: Trasa paprsku při měření průchodu vzorkem.

7.1. Dovolené rozměry měřených vzorků

Světelný svazek je při průchodu vzorkem mírně vychýlen vlivem úhlu lomu vzorku, jak je patrno z obrázku 22. Tento jev limituje tloušťku měřeného vzorku, neboť při příliš velké tloušťce světelný svazek může minout některé ze zrcadel a nedostane se tak k fotodetektoru. Pro výpočet maximální tloušťky vzorku uvažujeme přechod vzduch sklo s indexy lomu pro vzduch $n_v = 1$ a pro sklo $n_s = 1{,}9$ (pro sklo uvažujeme jednu z vyšších hodnot indexu lomu, protože vyšší hodnota znamená větší vychýlení světelného svazku). Z vytvořeného 3D modelu lze snadno určit, že osa průřezu svazku se může posunout o 3,4 mm, než světelný svazek začne míjet okraj překlápěcího zrcadla (v pořadí 1. zrcadlo za vzorkem). U otočného zrcadla se osa může posunout pouze o 2,9mm (v pořadí 2. zrcadlo za vzorkem). Proto pro výpočet použijeme hodnotu posunutí osy o 2,9 mm.



Obrázek 22 Schéma odklonění světelného svazku

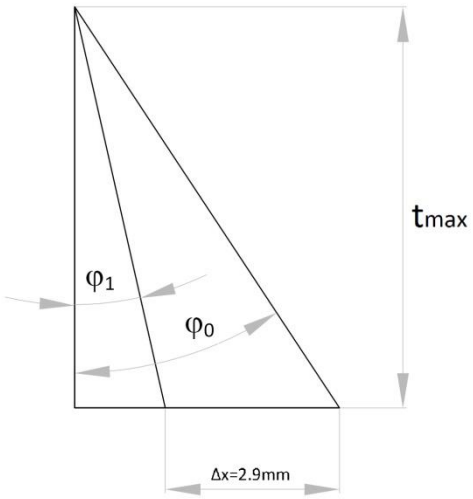
Úpravou rovnice 3.2.1 dostaneme:

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{n_0}{n_1}\sin\varphi_0\right), \tag{7.1}$$

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{1}{1{,}9}\sin 4{,}3°\right), \tag{7.2}$$

$$\varphi_1 = 2{,}26°. \tag{7.3}$$

Pro výpočet maximální tloušťky t použijeme rovnici pro vztah mezi délkami stran a velikostmi úhlů v pravoúhlém trojúhelníku podle obrázku 23.



Obrázek 23 Znázornění úhlů v trojúhelníku

$$t_{max} = \frac{\Delta x}{\Delta x\, tg\varphi_0 - tg\varphi_1}, \tag{7.4}$$

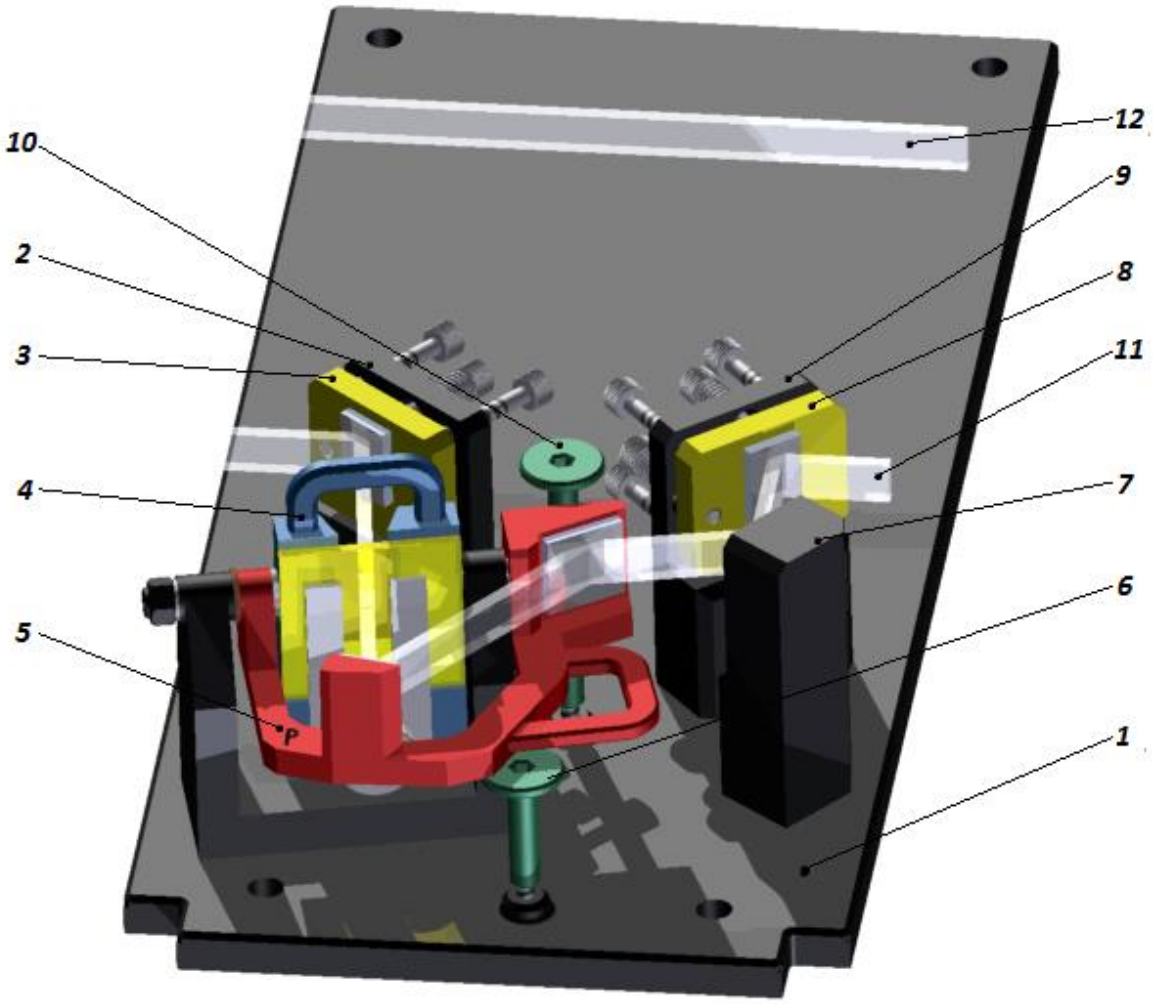
$$t_{max} = \frac{2{,}9}{tg2{,}26° - tg4{,}3°}, \tag{7.5}$$

$$t_{max} = 81{,}1 \text{ mm}, \tag{7.6}$$

kde φ_0 je úhel dopadu, φ_1 úhel lomu, Δx maximální možný posun osy světelného paprsku měřený kolmo na tuto osu. Při měření průchodu světelného svazku vzorkem, se nestane, že by svazek minul některé ze zrcadel. S ohledem na velikost nástavce a místa pro uložení vzorku nelze měřit takto rozměrný vzorek.

8. NÁSTAVEC A JEHO SOUČÁSTI

Všechny součásti s výjimkou normalizovaných šroubů a matic a přidržovacího plíšku jsou vyráběny z duralu a následně povrchově upraveny černým eloxováním. Na obrázku 24 jsou jednotlivé části nástavce od sebe barevně rozlišeny pro lepší přehlednost.

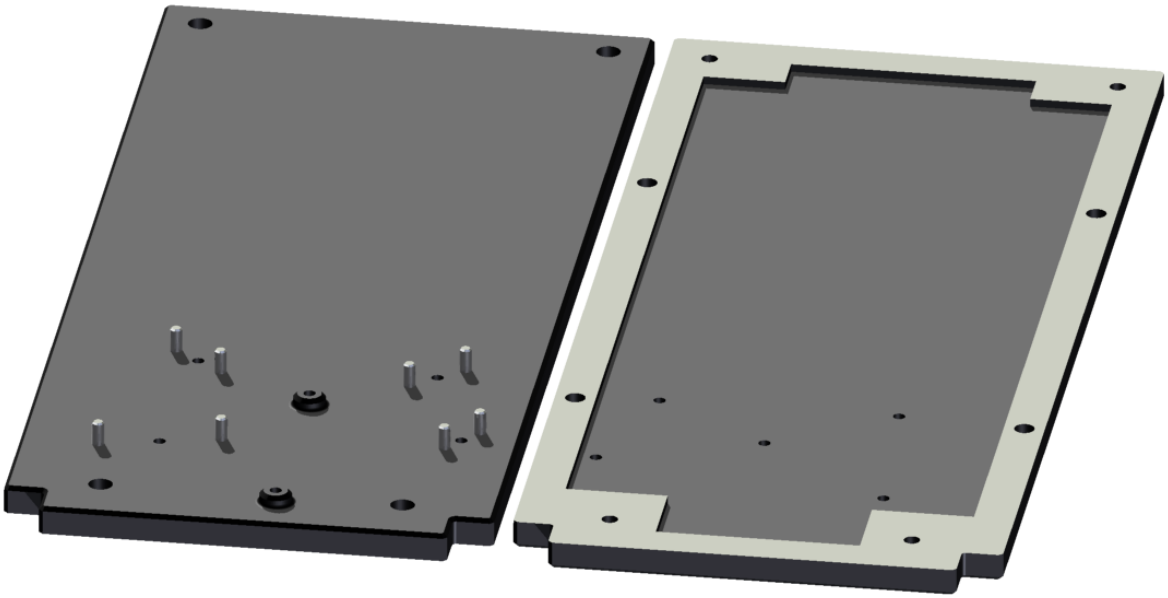


Obrázek 24: Barevně rozlišený model celého nástavce.

1. Základní deska
2. Polohovadlo vstupního zrcadla
3. Držák vstupního zrcadla
4. Držák vzorku
5. Překlopné rameno
6. Polohovací šroub pro měření průchodu
7. Držák pevného zrcadla
8. Držák výstupního zrcadla
9. Polohovadlo výstupního zrcadla
10. Polohovací šroub pro měření odrazivosti
11. Trasa měřicího světelného svazku
12. Trasa referenčního světelného svazku

8.1. Základní deska

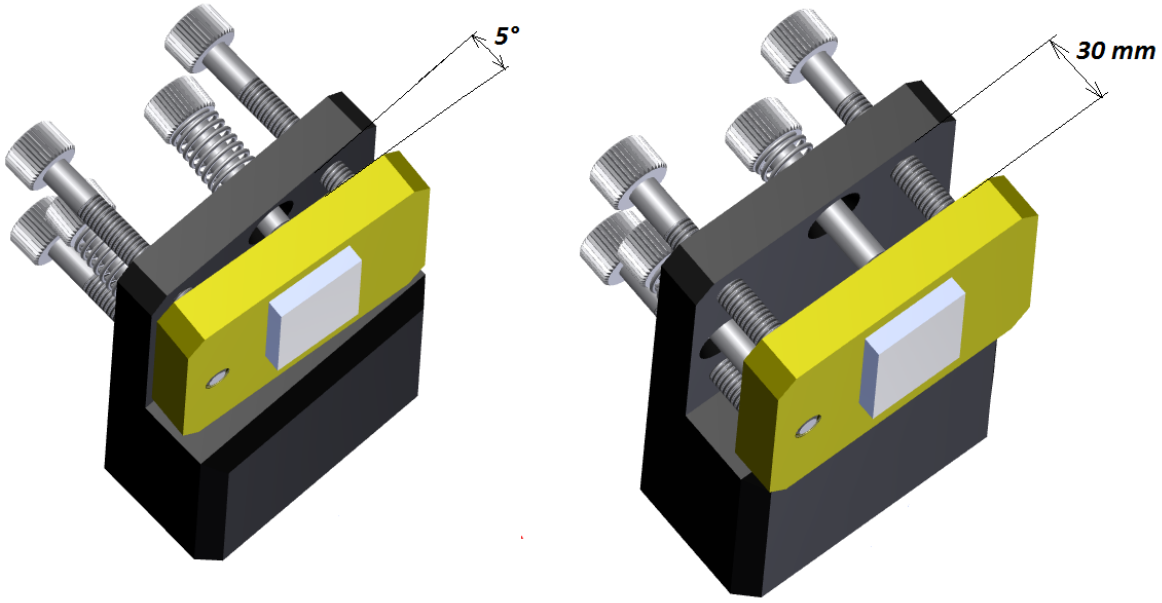
Z důvodů kompatibility s novým uspořádáním byla původní spodní stěna nahrazena novou základní deskou. Deska se upíná pomocí 4 šroubů M2 EN ISO 4762 [6], které upínaly původní spodní stěnu. Přesnou polohu základní desky zajišťuje čtveřice kolíků nalisovaných v rámu přístroje. Přesné umístění každé jednotlivé částí nástavce je zajištěno dvěma kolíky. Dále jsou části připevněny šroubem M3 ČSN 02 1116 [6], který se nachází v ose mezi párem kolíků.



Obrázek 25: Základní deska (vlevo pohled z vrchu, vpravo pohled zespodu).

8.2. Polohovadlo vstupního zrcadla

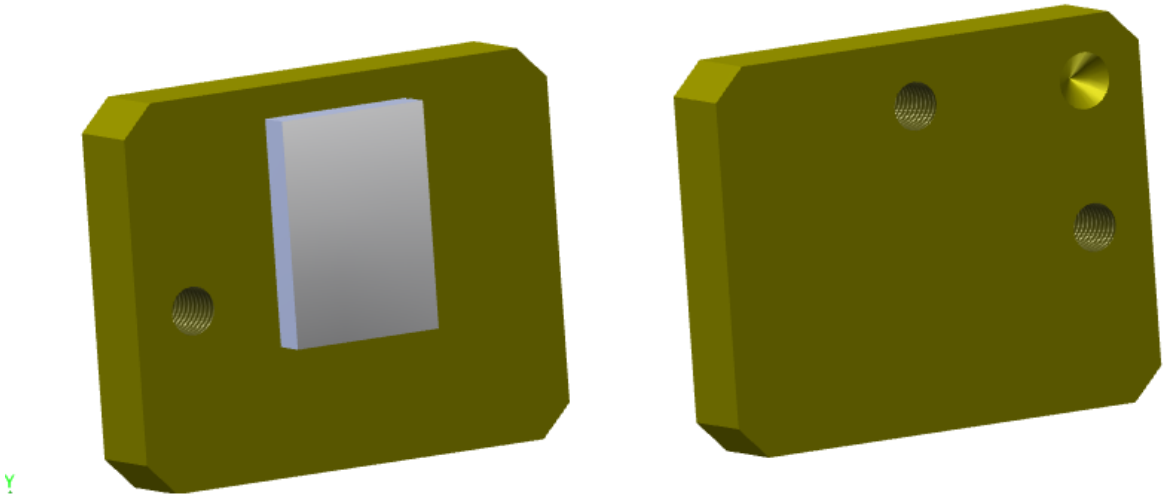
Umožňuje nastavit zrcadlo do přesného sklonu a směrovat paprsek do požadovaného místa. Zároveň eliminuje nepřesnosti při výrobě a montáži nebo posun vzniklý tenkou vrstvou lepidla mezi zrcadlem a držákem. Polohovadlo naklápí zrcadlo ve dvou osách. V ose rovnoběžné s boční stěnou polohovadla a v ose, která je rovnoběžná s horní stranou polohovadla. Nastavitelný je také posun v ose kolmé na plochu zrcadla. Polohování zajišťuje trojce šroubů M5 ČSN 02 1143 [6] s vroubkováním na válcové hlavě pro lepší manipulaci. Přítlak držáku zrcadla vyvozuje pružina uchycená šroubem stejného typu. Šrouby jsou rozmístěny tak, aby manipulací jedním šroubem docházelo k natáčení v jedné ose. Zrcadlo lze natočit až o 5° oběma směry v obou osách a posouvat po dráze 7 mm jak je znázorněno na obrázku 26.



Obrázek 26: Natočení a posunutí vstupního zrcadla pomocí polohovadla.

8.3. Držák vstupního zrcadla

Zrcadlo je k držáku připevněno lepidlem. Držák je přesně nastaven pomocí polohovadla. Pozice držáku vůči polohovadlu je zajištěna kuželovo-kuličkovým stykem. Horní levý šroub (viz obrázek 26) je zakončen dokulata. Na zadní straně v místě dotyku je na držáku kuželový zápich (na obrázku 27 v pravé horní části). Kulový konec šroubu zapadne do zápichu a ustálí jej s možností natáčení držáku vůči šroubu.

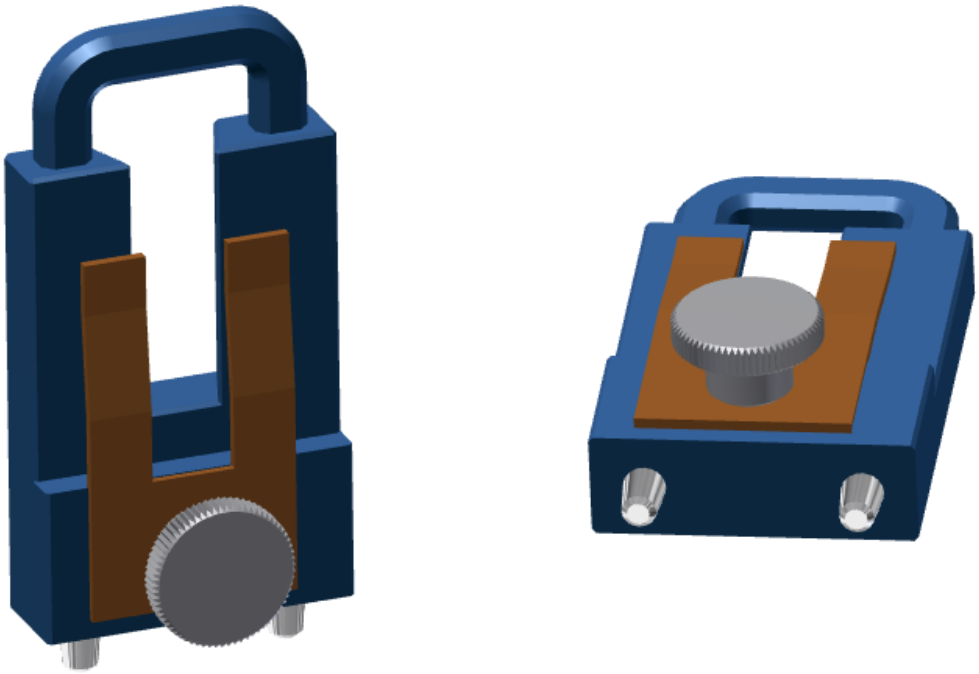


Obrázek 27: Držák vstupního zrcadla (vlevo pohled zepředu, vpravo pohled ze zadu).

8.4. Držák vzorku

Pro snadnou manipulaci se vzorkem a jeho snadnou výměnu lze držák vzorku samostatně vyjmout z nástavce. Jeho přesnou polohu zajišťují dva kolíky ve spodní části s kuželovým sklonem pro jednoduší opětovné vložení (viz obrázek 28). Drážka pro průchod světelného svazku je skosená a rozšiřuje se směrem, odkud svazek přichází. Zešikmení této plochy

umožňuje měření menších vzorků bez zastínění světelného svazku držákem. Vzorek dosedá na držák stranou, na kterou světelný svazek dopadá, aby tloušťka vzorku neovlivňovala místo dopadu svazku. Vzorek se upíná k držáku pomocí plíšku z bronzu CuSn6. Plíšky lze vyměňovat odtažením šroubu ČSN 02 1161 [6], umístěném v přední části držáku. Takto lze měřit vzorky odlišných rozměrů se stejným držákem. K lepší manipulaci s držákem vzorku se nachází v jeho horní části madlo. V držáku lze měřit vzorky do šířky 30 mm, výšky 40 mm a tloušťky 20 mm.



Obrázek 28: Držák vzorku (vlevo přední pohled, vpravo spodní pohled).

8.5. Překlopné rameno

Překlopením o 180°umožňuje změnu uspořádání mezi měřením odrazivosti a měřením propustnosti vzorku. Otočné uložení je realizováno pomocí dvojce čepů vlisovaných do otočného ramena a s uložením s vůlí v nohách. Lisované uložení a uložení s vůlí je zajištěno pomocí rozdílných tolerančních polí jednotlivých děr. Pro vymezení vůle mezi jednotlivými plochami v místech čepů slouží segregační kroužek (oranžová barva na obrázku 29). Vysunutí čepů z noh zabraňuje šestihranná samojistná matice M3 ČSN 02 1492 [6]. Utahujícím momentem matice je zároveň možné nastavit odpor ramena vůči změně polohy tzv. „tuhosti natáčení“. Pro lepší manipulaci při změně polohy ramena je v jeho pravé části umístěno madlo. Obě strany ramena jsou označeny vyraženými písmeny pro lepší orientaci při měření, R nahoře při měření reflektovaného světla, P nahoře při měření průchodu světla. Obě zrcadla nacházející se na ramenu jsou přilepena. Jejich vzájemná přesná poloha je zajištěná výrobou.

Obrázek 29: Překlopné rameno (Nahoře v poloze měření odrazivosti vzorku, dole v poloze měření propustnosti vzorku.

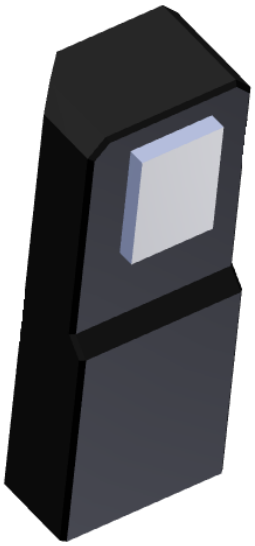
8.6. Polohovací šroub pro měření průchodu

Slouží k ustavení překlápěcího ramena do přesné polohy při měření průchodu. Ve spodní části je zašroubován závitem M3 do základní desky. Kvůli nedostatku prostoru pro přímou manipulaci rukou se šroub natáčí imbusovým klíčem velikosti 3 který se vkládá do horní části (viz obrázek 30). Překlápěcí rameno dosedá na horní rovinnou plochu tak, aby nezakrývalo otvor pro imbusový klíč.

Obrázek 30: Polohovadlo překlápěcího ramena pro polohu na měření průchodu.

8.7. Držák pevného zrcadla

Z důvodů snížení finančních nákladu a nedostatku místa v měřicí části je 4. zrcadlo upevněno bez možnosti natáčení na jednoduchém sloupku, který lze vidět na obrázku 31. Na nasměrování parsku do fotodetektoru postačuje zrcadlo následující. Zrcadlo je k držáku připevněno lepidlem.



Obrázek 31: Pevný držák zrcadla.

9. ZÁVĚR

Cílem předkládané práce bylo seznámit se základní teorií optiky potřebnou pro návrh rozšíření spektrometru. Dále pak porozumět uspořádáním, která se v praxi používají pro měření odrazivosti.

Na základě těchto znalostí bylo navrženo rozšíření spektrometru Perkin Elmer Lambda 45, které obsahuje optickou část složenou z 5 zrcadel od firmy Edmund Optics a konstrukční část vyhotovenou z duralu s povrchovou úpravou černým eloxováním. Rozšíření bylo navrhováno s ohledem na malý měřicí prostor přístroje (v porovnání s ostatními komerčně požívanými přístroji (například Perkin Elmer Lambda 900) pouze čtvrtinový prostor). Na přístroji s navrženým rozšířením lze měřit absolutní odrazivost vzorku i propustnost vzorku. Z těchto naměřených hodnot lze výpočtem odhadnout i absorpci vzorku. Na nástavci je možné měřit vzorek až o rozměrech $30 \times 40 \times 20\ \mathrm{mm}^3$. Konstrukční řešení bylo navrhováno s ohledem na finanční náročnost realizace. Jako normalizované součásti jsou použity pouze šrouby a matice. Komerčně dodávané úchyty optických zrcadel jsou pro prostor určený k měření příliš velké. Správná funkčnost optické části byla ověřena pomocí trasování světelných svazků v programu Autodesk Inventor.

LITERATURA

[1] HALLIDAY, David. Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. vyd. Brno/Praha: VUTIUM/PROMETHEUS, 2000, 1198 s. ISBN 80-214-1869-9.

[2] VAŠÍČEK, Antonín. Optika tenkých vrstev. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1956, 354 s. Studie a prameny, sv. 11

[3] WOLFRAMALPHA. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://demonstrations.wolfram.com/CircularAndEllipticPolarizationOfLightWaves/

[4] Design Considerations for a Variable Angle Absolute Reflectance Accessory: For the LAMBDA 950/850/650 UV/Vis/NIR and UV/Vis Spectrophotometers. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z:http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-74194APP_LAMBDAURADesignConsiderations.pdf

[5] EDMUND OPTICS EUROPE. OPTICS AND OPTICAL INSTRUMENTS ANNUAL CATALOG. Barrington, 2013, 470 s. ISBN E133B.

[6] LEINVEBER, Jan. Strojnické tabulky. 3. přepr.vyd. Praha: Scientia, 1999, 985 s. ISBN 80-718-3164-6.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

c	[m/s]	rychlost světla ve vaku
ČSN		České technické normy
EN ISO		Evropské normy
f	[Hz]	frekvence
I	[lx]	intenzita světla
M(x)	[mm]	metrický závit o průměru (x)
n		index lomu
P	[m^2]	plocha průřezu světelných svazků
r_s		poměr amplitud složek s odraženého lomeného světla
r_p		poměr amplitud složek p odraženého lomeného světla
t_{max}	[m]	maximální tloušťka vzorku
t_p		poměr amplitud složek s prošlého a dopadajícího světla
t_s		poměr amplitud složek p prošlého a dopadajícího světla
v	[m/s]	rychlost
Δx	[m]	posun světelných svazků při průchodu vzorkem
ε	[F/m]	permitivita
λ	[m]	vlnová délka
φ_0	[°]	úhel dopadu
φ_1	[°]	úhel lomu
φ_P	[°]	polarizační úhel
ν_d		Abbeovo číslo
ω	[rad/s]	úhlová rychlost

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK VEKTORŮ

$\vec{E}$	[V/m]	Vektor intenzity elektrického pole
$\vec{B}$	[T]	Vektor intenzity magnetického pole
$\vec{S}$		Poyntingův vektor
$\vec{I}$		jednotkový vektor v ose x
$\vec{J}$		jednotkový vektor v ose y
$\vec{E}_p$	[V/m]	Vektor intenzity elektrického pole v rovině dopadu
$\vec{E}_s$	[V/m]	Vektor intenzity elektrického pole v rovině kolmé
$\vec{E}_D^0$	[V/m]	Vektor intenzity el. pole dopadajícího na rozhraní
$\vec{A}_P^0$	[V/m]	složka vektoru $\vec{E}_d^0$ v rovině p
$\vec{A}_S^0$	[V/m]	složka vektoru $\vec{E}_d^0$ v rovině s
$\vec{E}_r^0$	[V/m]	Vektor intenzity el. pole odraženého na rozhraní
$\vec{R}_P^0$	[V/m]	složka vektoru $\vec{E}_r^0$ v rovině p
$\vec{R}_S^0$	[V/m]	složka vektoru $\vec{E}_r^0$ v rovině s
$\vec{E}_d^1$	[V/m]	Vektor intenzity el. pole lomeného na rozhraní
$\vec{A}_P^1$	[V/m]	složka vektoru $\vec{E}_d^1$ v rovině p
$\vec{A}_S^1$	[V/m]	složka vektoru $\vec{E}_d^1$ v rovině p

SEZNAM PŘÍLOH

Modely jednotlivých součástí nástavce v programu Autodesk Inventor.
Model sestavení nástavce v programu Autodesk Inventor.