

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Eva Jesenská

Studium Fresnelova hranolu

Katedra chemické fyziky a optiky

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Petr Němec, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2011

Ďakujem vedúcemu svojej bakalárskej práce doc. RNDr. Petru Němecovi, Ph.D. za veľmi užitočné konzultácie a rady. Taktiež mu ďakujem za pomoc pri meraní, za ochotu a za čas, ktorý strávil vedením mojej bakalárskej práce .

Ďalej by som sa chcela poďakovať Mgr. Nadi Tesařovej za prípravu experimentu a následnú pomoc pri meraní.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne.....

podpis

Názov práce: Studium Fresnelova hranolu

Autor: Eva Jesenská

Katedra / Ústav: Katedra chemické fyziky a optiky

Vedúci bakalárskej práce: doc. RNDr. Petr Němec, Ph.D. ,Katedra chemické fyziky a optiky

Abstrakt: V danej bakalárskej práci študujeme polarizačné vlastnosti Fresnelovho hranola. V prvom rade nás zaujíma ako kvalitné polarizované svetlo vieme pomocou Fresnelovho hranola vytvoriť, resp. presnosť s akou vyrába kruhovo, alebo lineárne polarizované svetlo. Ďalšia skúmaná vlastnosť je miera závislosti kvality vzniknutého polarizovaného svetla na vlnovej dĺžke. Taktiež overujeme ako sa mení charakter vzniknutého polarizovaného svetla pri zmene uhlu dopadu lineárne polarizovaného svetla na hranol. Nakoniec získané výsledky porovnáme s vlastnosťami vlnových doštičiek.

Kľúčové slová: polarizácia svetla, Fresnelov hranol, vlnová doštička

Title: Study of Fresnel's rhomb

Author: Eva Jesenská

Department: Department of Chemical Physics and Optics

Supervisor: doc. RNDr. Petr Němec, Ph.D. ,Department of Chemical Physics and Optics

Abstract: This bachelor thesis is devoted to the investigation of the polarization properties of the Fresnel rhomb. First of all, we were interested in the quality of the polarized light which can be created using the Fresnel rhomb. In particular, we were checking the accuracy of the circular and linear polarization which is produced by Fresnel rhomb. Secondly, we tested the wavelength dependence of the quality of polarized light. We also investigated the dependence of the polarization state on the light angle of incidence. Finally, we compared the obtained results with those for the wave plates.

Keywords: polarization of light, Fresnel rhomb, wave plate

Obsah

Úvod	6
1. Popis polarizačného stavu	7
1.1. Kartézska reprezentácia	7
1.2. Eliptická reprezentácia	8
1.3. Kruhová reprezentácia	9
2. Polarizačné zariadenia	11
2.1. Vlnové doštičky	11
2.2. Fresnelov hranol	14
3. Meranie polarizačného stavu	16
3.1. Experimentálne usporiadanie	16
3.2. Postup merania	18
4. Výsledky merania	20
4.1. Štvrt'vlnný Fresnelov hranol	20
4.2. Polvlnný Fresnelov hranol	24
5. Diskusia výsledkov	28
5.1. Štvrt'vlnný Fresnelov hranol	28
5.2. Polvlnný Fresnelov hranol	28
6. Záver	30
Použitá literatúra	31
Použité skratky	32

ÚVOD

V tejto práci sa snažíme skúmať kvalitu polarizačných vlastností Fresnelovho hranola . V úvode teda priblížime, čo to vlastne polarizácia je.

Svetlo, ako priečne EM-vlnenie, má elektrickú a magnetickú zložku, avšak silové účinky magnetickej zložky sú voči elektrickej zložke tak malé, že ich pri popise väčšiny javov spojených so svetlom môžeme zanedbať. V ďalšom sa teda budeme venovať, len zložke elektrickej resp. vektoru elektrickej intenzity $E(\mathbf{r},t)$.

Jedna z najvýznamnejších vlastností elektrickej zložky svetla je polarizácia. Polarizačný stav svetla je určený smerom vektoru intenzity elektrického poľa $E(\mathbf{r},t)$ a jeho závislosti na čase. Pri popise daného stavu sa teda využíva to, že v každom mieste \mathbf{r} sa koncový bod vektoru $E(\mathbf{r},t)$ pohybuje v rovine, v ktorej opisuje krivku. Táto krivka je vo všeobecnosti elipsa, a preto hovoríme o eliptickej polarizácii. Eliptická polarizácia za špeciálnych podmienok prechádza do kruhovej, alebo lineárnej polarizácie.

Polarizované svetlo má v praxi široký záber využitia (LCD displaye, 3D projekcia,...), čo je hlavný dôvod na jeho podrobnejšie preskúmanie.

1. POPIS POLARIZAČNÉHO STAVU

Polarizačný stav sa dá popisovať pomocou rôznych reprezentácií. V tejto práci načrtujeme 3 reprezentácie, ktoré budeme následne využívať. Tieto reprezentácie, ako aj polarizácia samotná, sú detailne rozpracované v [1] a prehľadne v [2], z ktorých sme v nasledujúcich podkapitolách čerpali.

Na spracovanie nameraných údajov sme použili program Dpol, vyvinutý Pavlom Bromom, ako súčasť jeho bakalárskej práce. Kompletne informácie o tomto programe sa nachádzajú v [2]. Tento program spracováva výstupné dáta z detektoru v eliptickej reprezentácii a následne ich prepočítava do iných reprezentácií. Vďaka tomu môžeme využívať na vyjadrenie kvality jednotlivých polarizačných stavov najvhodnejšiu reprezentáciu. To znamená: na popis kruhovo polarizovaného svetla kruhovú reprezentáciu a na popis lineárne polarizovaného svetla kartézsku reprezentáciu.

1.1. KARTÉZSKA REPREZENTÁCIA

Táto reprezentácia úplne popisuje polarizačný stav svetla pomocou parametrov a_x , a_y , φ_x , φ_y . Jej výhoda je v tom, že voľbu kartézskych súradníc vieme prispôbiť aparátúre.

Vektor $E(\mathbf{r},t)$ má v komplexnej symbolike tvar

$$E(\mathbf{r},t) = E_0(\mathbf{r}) \cdot e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi)} \quad (1).$$

Skutočnú vlnu popisuje reálna časť z (1). Ak kartézsky systém zvolíme tak, že kladný smer šírenia svetla bude pozdĺž osy z, reálne zložky vektora $E(\mathbf{r},t)$ budú:

$$\begin{aligned} E_x(\mathbf{r},t) &= a_x \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi_x) \\ E_y(\mathbf{r},t) &= a_y \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi_y) \\ E_z(\mathbf{r},t) &= 0 \end{aligned} \quad (2).$$

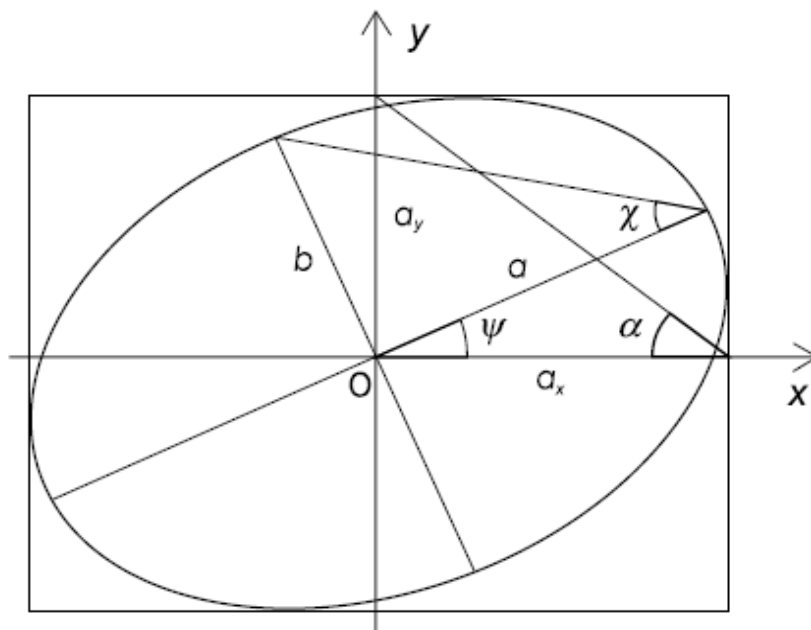
Parametre a_x , a_y sú amplitúdy zložiek vektora E , ω je uhlová frekvencia žiarenia, $k = 2\pi/\lambda$ je smerový vektor žiarenia s vlnovou dĺžkou λ šíriaceho sa v smere z. φ_x , φ_y

sú počiatočne fázy. Ďalej zavádzam fázový rozdiel $\varphi = \varphi_x - \varphi_y$.

Na základe úmernosti intenzity svetla a kvadrátu $E(\mathbf{r},t)$ dostávame, že v smere, kde je priemet vektoru $E(\mathbf{r},t)$ maximálny je nameraná intenzita svetla taktiež maximálna, a túto jej hodnotu označím I_{\max} . V smere, kde je minimálny priemet vektoru $E(\mathbf{r},t)$ označím naopak hodnotu intezity I_{\min} . To sa dá využiť na vyjadrenie kvality lineárnej polarizácie. Z [3] preberám definíciu extinkčného koeficientu $P = I_{\min}/I_{\max}$, ktorý je tým menší, čím kvalitnejšia je získaná lineárna polarizácia. V [3] bolo taktiež uvedené, že pre bežné lineárne polarizátory je hodnota extinkčného koeficientu rádovo okolo 10^{-5} .

1.2. ELIPTICKÁ REPREZENTÁCIA

V tejto reprezentácii sa, ako už bolo spomenuté v úvode, využíva fakt, že koncový bod vektora $E(\mathbf{r},t)$ sa v každom mieste \mathbf{r} pohybuje v rovine, v ktorej opisuje krivku, ktorá je vo všeobecnosti elipsa. Polarizačný stav teda popíšeme pomocou parametrov prislúchajúcich elipse. Polarizačná elipsa, vrátane parametrov použitých na popis polarizovaného svetla, je na obrázku 1.1. Parameter a je veľká poloosa elipsy, b malá poloosa. ψ je uhol, ktorý zvierá veľká poloosa s osou x . Daná elipsa má však ešte zmysel otáčania, ktorý je obsiahnutý v znamienku eliptičnosti χ , definovanej ako $\tan(\chi) = \pm b/a$, kde $+$ odpovedá pravotočivému svetlu a $-$ ľavotočivému svetlu (konvencia a obrázok sú prebrané z [2]).



Obr. 1.1: Geometrický význam parametrov z kartézskej a eliptickej polarizácie [2].

1.3. KRHOVÁ REPREZENTÁCIA

Táto reprezentácia sa zakladá na tom, že každú polarizáciu viem popísať pomocou zastúpenia ľavotočivej kruhovej polarizácie (ĽKP) a pravotočivej kruhovej polarizácie (PKP), resp. každý polarizačný stav viem zložiť z istého množstva ĽKP a PKP svetla. Vektor $E(\mathbf{r},t)$ tu má tvar

$$\mathbf{E} = (\sigma_+ a_+ e^{-i\varphi_+} + \sigma_- a_- e^{-i\varphi_-}) e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (3),$$

kde

$$\sigma_+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{x} + i\mathbf{y})$$

$$\sigma_- = \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{x} - i\mathbf{y}) \quad (4)$$

sú nové bázové vektory. Parametre a_+ , a_- vyjadrujú podiel zastúpenia ĽKP a PKP, φ_+ , φ_- sú počiatočné fázy.

Polarizačný stav svetla je teda v rôznych reprezentáciách popísaný pomocou

nerovnakých parametrov. To akú hodnotu musia mať dané parametre, aby sme o svetle vyjadrenom pomocou nich mohli povedať, že je lineárne, alebo kruhovo polarizované, je uvedené v tabuľke 1.1. Pri lineárne polarizovanom svetle máme v kartézskej a eliptickej reprezentácii viac možností.

Tabuľka 1.1: Podmienky lineárnej a kruhovej polarizácie v rôznych reprezentáciách

Reprezentácia	Lineárna polarizácia	Kruhovú polarizáciu	
		Ľavotočivá	Pravotočivá
Kartézská	$a_x = 0$	$a_x = a_y$ $\varphi = -\pi/2$	$a_x = a_y$ $\varphi = +\pi/2$
	$a_y = 0$		
	$\varphi = 0$		
	$\varphi = \pi$		
Eliptická	$a = 0$	$a = b$ $\tan\chi = -b/a$	$a = b$ $\tan\chi = b/a$
	$b = 0$		
Kruhovú	$\sigma_- = 50\%$ $\sigma_+ = 50\%$	$\sigma_- = 100\%$ $\sigma_+ = 0\%$	$\sigma_+ = 100\%$ $\sigma_- = 0\%$

2. POLARIZAČNÉ ZARIADENIA

Bežné svetelné zdroje pozostávajú z náhodne orientovaných svetelných žiaríčkov, z čoho následne plynie, že aj polarizácia svetla pochádzajúca z týchto zdrojov, je v každom čase náhodná, resp. rôzna. O takomto svetle hovoríme, že nieje polarizované.

Vyššie však bolo spomenuté, že polarizované svetlo má široký záber využitia. Vystáva teda otázka, ako sa z prirodzeného svetla vyrobí polarizované svetlo a ako sa zo svetla s určitou polarizáciou vyrobí svetlo s inou polarizáciou. Na vytvorenie polarizovaného svetla slúžia polarizačné zariadenia zvané polarizátory. V tejto práci spomeniem dve zariadenia, ktoré sa na zmenu polarizačného stavu používajú, a to Fresnelov hranol (FH) a vlnové doštičky.

2.1. FRESNELOV HRANOL

Nasledujúce vlastnosti FH a odvodenia vzťahov sú detailne rozpracované v literatúre [1], z ktorej je taktiež prebraná konvencia definície fresnelových vzorcov.

FH na zmenu polarizačného stavu využíva fyzikálny jav zvaný totálny odraz. K tomuto optickému javu dochádza len pri prechode svetla z opticky hustejšieho prostredia (vzduch), charakterizovaného indexom lomu n_1 , do opticky riedkejšieho prostredia (sklo), charakterizovaného indexom lomu n_2 . Ďalšia podmienka nato, aby k danému javu došlo je, aby bol uhol dopadu väčší ako tzv. uhol totálnej reflexie Θ_i , pre ktorý platí

$$\sin \theta_i = \frac{\sin \theta_c}{n} \quad (5).$$

Θ_i je Brewstrov uhol úplnej polarizácie a n je tu pomer indexov lomu ($n=n_2/n_1$).

Totálny odraz je doprevádzaný fázovým posunom medzi kolmými zložkami svetla. Práve tento posun sa prejaví na zmene polarizačného stavu.

Pre uhol dopadu Θ_{im} , pri ktorom dochádza pri totálnom odraze k maximálnemu fázovému posunu platí

$$\sin \theta_{im} = \frac{2n^2}{1+n^2} \quad (6).$$

Fázový posun je pri totálnom odraze zviazaný s veľkosťou tohoto uhla Θ_{im} a teda aj indexom lomu n , a to vzťahom

$$\tan \frac{\varphi}{2} = \frac{1-n^2}{2n} \quad (7).$$

Keďže φ je fázový posun ktorý chceme odrazom dosiahnuť, vieme pomocou (6) a (7) ihneď určiť aké prostredia a uhol dopadu potrebujeme.

Konkrétne pre prípad štvrtvlnného FH:

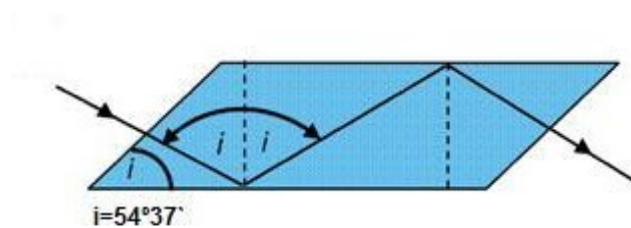
V praxi sa používa na vytvorenie kruhovo polarizovaného svetla z lineárne polarizovaného svetla a naopak. Na túto zmenu polarizačného stavu potrebujeme dosiahnuť fázový posun 90° . Na vytvorenie tohoto posunu potrebujeme použiť totálny odraz dvakrát. Zo vzorcov (6) a (7) totižto vyplýva, že ak by bol tento odraz len jeden, musel by mať hustejší materiál (voči vzduchu) veľmi vysoký index lomu ($n_2 = 2,41$). To by však bolo príliš náročné na výrobu, a teda aj oveľa drahšie.

To, že k totálnemu odrazu dochádza dvakrát znamená, že je vhodné pri každom jednom odraze dosiahnuť fázový posun 45° . Bežne používaný materiál na výrobu FH je sklo (riedšie prostredie reprezentuje vzduch). Pomer indexov lomu je $n=1,51$.

Použitím (6) a (7) dostávame, že vhodné uhly dopadu Θ_{im} sú:- $\Theta_{im1} = 48^\circ 37'$

$$- \Theta_{im2} = 54^\circ 37'$$

Na konštrukciu hranola sa obvykle používa uhol $\Theta_{im} = 54^\circ 37'$, na obrázku 2.1 označený ako i .



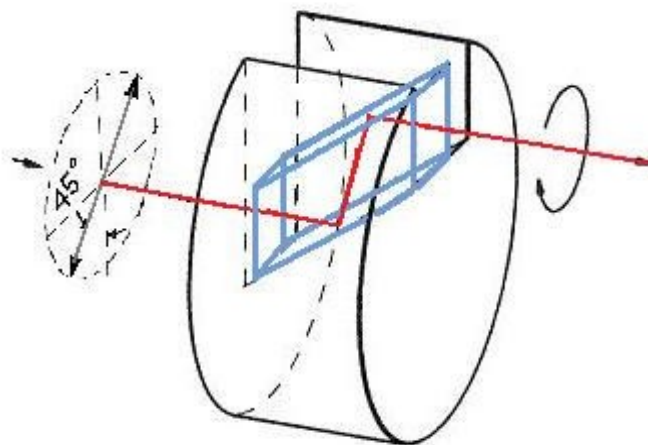
Obr. 2.1: Prechod lúča Fresnelovým hranolom [4].

Na vznik kruhovo polarizovaného svetla však potrebujem, okrem fázového posunu 90° , splniť ešte jednu podmienku, a to aby boli rovnaké amplitúdy kolmých komponent dopadajúcej vlny, a_x a a_y . To zabezpečíme tak, že dopadajúca vlna bude lineárne polarizovaná v smere, ktorý zvierá uhol 45° s normálou na rovinu dopadu ako je vidno napr. na obrázku 2.2 (rovina dopadu je určená kolmicou dopadu a paprskom dopadajúceho vlnenia).

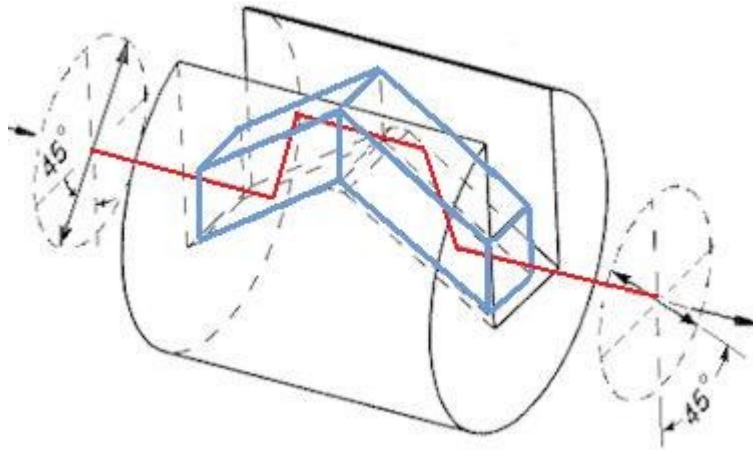
V tejto práci premeriavame 2 druhy FH:

Štvrt'vlnný (ŠFH), ktorý mení kruhovo polarizované svetlo na lineárne polarizované svetlo a naopak tak, že medzi kolmými zložkami svetla zavádza fázový posun $\pi/2$ (obrázok 2.2).

Polvlnný (PFH) (zložený z dvoch ŠFH), ktorý zavádza fázový posun π . PFH nemení charakter polarizovaného svetla, stáča však rovinu vstupujúcej lineárnej polarizácie tak, že ak je uhol dopadu β , stočí ju o 2β (obrázok 2.3).



Obr. 2.2: Štvrt'vlnný Fresnelov hranol [5].



Obr. 2.3: Polvlnný Fresnelov hranol [5].

2.2.VLNOVÉ DOŠTIČKY

V texte vychádzam z [6] [7]. Vlnové doštičky (VD), podobne ako FH, umožňujú zmenu polarizačného stavu tým, že vytvoria fázový posun medzi vzájomne kolmými zložkami svetla. Tento posun sa však narozdiel od FH zabezpečuje pomocou dvojlomného anizotropného materiálu, za ktorý sa obvykle volí kremeň. Takýto materiál má v rôznych smeroch rôzne indexy lomu a paprsok sa v ňom štiepi na riadny a mimoriadny paprsok.

Smery, v ktorých sa polarizačný stav svetla prechádzajúceho kryštálom/doštičkou nemení, sa nazývajú hlavné osi. V doštičkách ich označujeme ako rýchlu a pomalú osu. Ak má paprsok, časti vektoru elektrickej intenzity kolmé aj rovnobežné s danou osou, rozštiepi sa, ako bolo vyššie spomenuté, na dva paprsky. Tieto paprsky sa doštičkou šíria rôznymi rýchlosťami (c/n), a teda po prechode istej vzdialenosti d (hrúbka doštičky), získavajú rôzne fázové posunutia. Vo výsledku tak opäť z lineárne polarizovaného svetla dostávame obecné elipticky polarizované svetlo.

Daný fázový rozdiel medzi zložkami svetla však výrazne závisí aj na vlnovej dĺžke dopadajúceho svetla a to vzťahom

$$\Delta \varphi = 2\pi d(|n_o(\lambda_0) - n_e(\lambda_0)|) \frac{1}{\lambda_0} \quad (8),$$

kde hrúbka d dvojlomného materiálu (kremeň) musí spĺňať

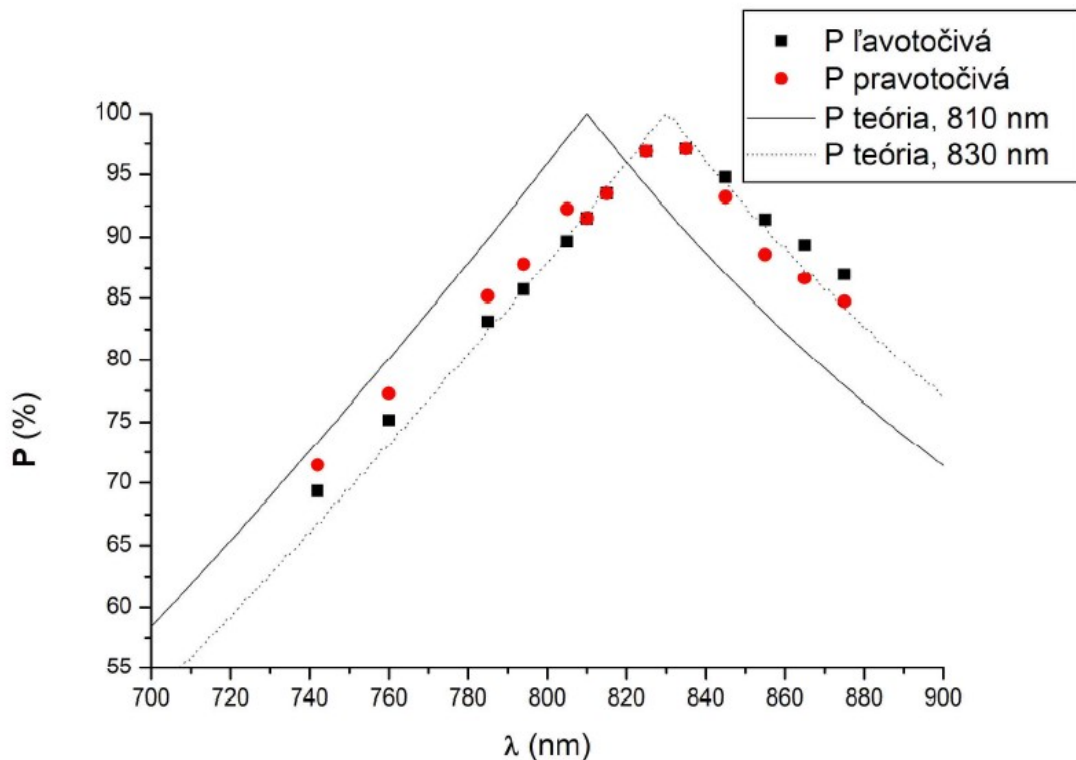
$$d(|n_o(\lambda_0) - n_e(\lambda_0)|) = (4m + 1)\lambda_0 / 4 \quad (9).$$

Zo vzťahu (9) vidíme, že závislosť na vlnovej dĺžke sa dá výrazne redukovať používaním vlnových doštičiek nultého rádu ($m=0$).

V praxi sa väčšinou používajú dva druhy vlnových doštičiek:

Štvrtvlnná (ŠVD), ktorá medzi svetlom v smere rýchlej osi doštičky a svetlom v smere pomalej osi zavádza fázový posun $\pi/2$ a *polvlnná* (PVD), ktorá zavádza fázový posun π .

Na obrázku 2.4 je zobrazený graf uverejnený v [6]. V [6] sa detailne študovali polarizačné vlastnosti svetla po prechode vlnovými doštičkami (šlo o štvrtvlnnú doštičku od firmy CVI nultého rádu konštruovanú na 810 nm). Značenie na obrázku 2.4 je odlišné od značenia používaného doposiaľ. P tu predstavuje percentuálny podiel zastúpenia ľavotočivej (čierne štvorce), alebo pravotočivej (červené kruhy) polarizácie v závislosti na vlnovej dĺžke λ . Z uvedeného grafu, je dobre vidieť aká výrazná je, napriek volenému nultému rádu, závislosť polarizačných vlastností VD na vlnovej dĺžke.



Obr. 2.4: Závislosť kvality kruhovej polarizácie na vlnovej dĺžke-vlnové doštičky [6].

3. MERANIE POLARIZAČNÉHO STAVU

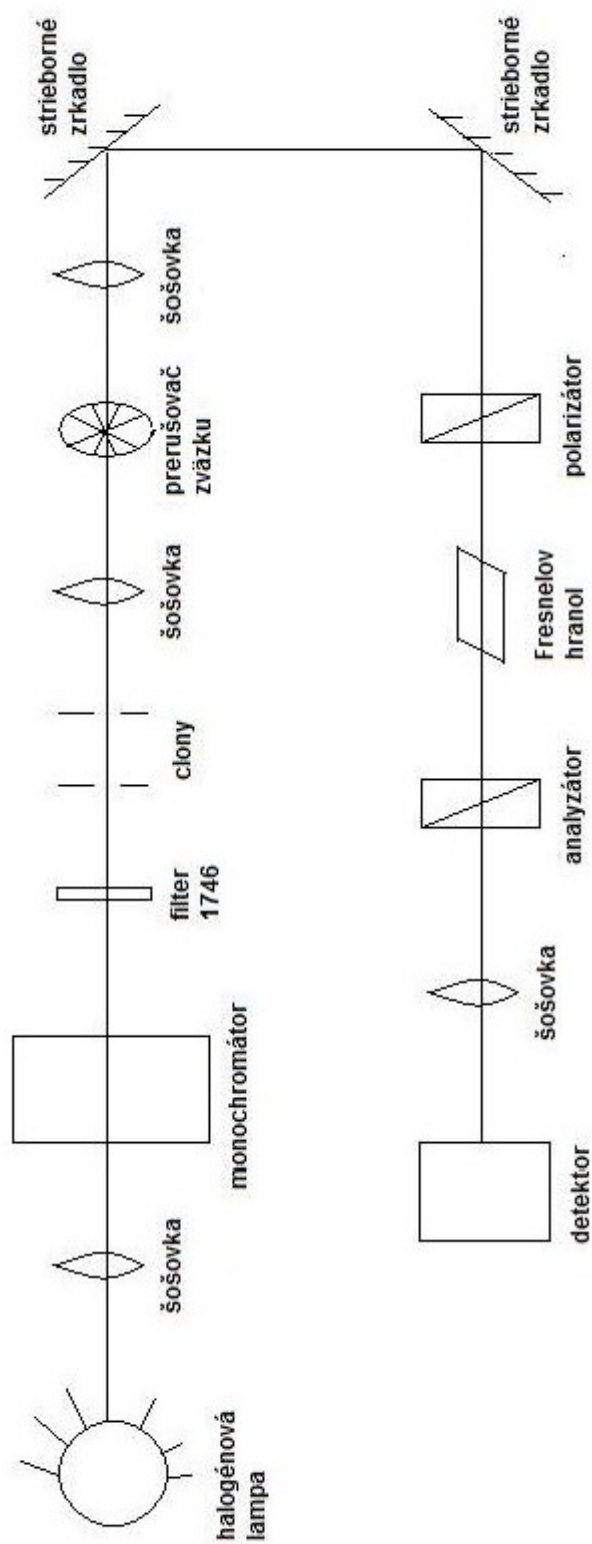
V tejto práci sa snažíme charakterizovať FH ako polarizačné zariadenie. Skúmame teda vlastnosti polarizovaného svetla po prechode FH. Na získanie údajov o svetle na výstupe z FH však potrebujeme vhodný experiment. V nasledujúcich podkapitolách popíšeme ako, a prečo sme volili dané usporiadanie experimentu, a taktiež postupy akými sme dané merania prevádzali.

3.1. EXPERIMENTÁLNE USPORIADANIE

Usporiadanie experimentu možno vidieť na obrázku 3.1.

Halogénová lampa vyrábala širokospektrálne svetlo, z ktorého následne monochromátor vyberal len svetlo s potrebnou vlnovou dĺžkou. Nato aby sme odstránili vplyv druhého rádu difrakcie svetla na mriežke sme použili filter, ktorý odfiltroval svetlo s vlnovou dĺžkou pod 500 nm (na meranie pri 442 nm a 500 nm sme ho nepoužívali). Na sfokusovanie paprsku slúžili clony a šošovky-spojky s ohniskovou vzdialenosťou 10 cm. Ďalej sme z dvoch polarizátorov Glan-Laser vytvorili sústavu polarizátor-analyzátor. Polarizátor (výrobca CVI, spektrálny rozsah 400-2300 nm) bol pevne umiestnený a otočný. Poloha analyzátora (výrobca Newport 2, spektrálny rozsah 400-2300 nm) sa dala nastaviť podľa toho kam paprsok (po prechode FH) smeroval. Analyzátor bol otočný a jeho otáčanie bolo riadené počítačom. Medzi polarizátor a analyzátor sme umiestnili buď ŠFH alebo PFH. Na detekciu slúžil prerušovač zväzku, fázovo citlivý zosilňovač a kremíkový detektor napojený na počítač.

Na určenie točivosti kruhovo polarizovaného svetla sme použili ŠVD , ktorá bola pri meraní umiestnená medzi FH a analyzátorom.

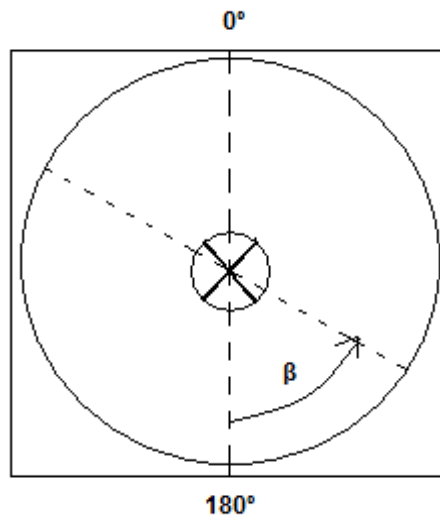


Obr. 3.1: Schéma experimentálneho usporiadania.

3.2. POSTUP MERANIA

Otočný analyzátor sa riadený počítačom otáčal so zvoleným krokom o 360° . Takto prepúšťal do detektoru svetlo v zvolených smeroch (uhloch). Keďže detektor v týchto smeroch meral množstvo svetla, získali sme takto informáciu o priestorovom rozložení intenzity svetla, a teda aj o polarizácii svetla.

Závislosť kvality a charakteru polarizácie na uhle dopadu β (definovaného podľa obrázku 3.2) sme získali tak, že sme menili uhol dopadu lineárne polarizovaného svetla na hranol β . Pre ŠFH sme otáčali polarizátorom (ak by sa otáčalo priamo ŠFH, tak by sme kvôli jeho tvaru museli súčasne meniť priestorové umiestnenie analyzátoru). Pre PFH sme otáčali priamo hranolom.



Obr. 3.2: Definovanie uhlu dopadu β .

Na zistenie miery závislosti kvality polarizačných vlastností FH na vlnovej dĺžke, sme si zvolili referenčné uhly dopadu β a následne sme už len na monochromátore nastavovali vlnové dĺžky, ktoré sme chceli premerať.

Točivosť kruhovo polarizovaného svetla sa zisťovala pomocou ŠVD. Keďže ŠVD zavádza fázový posun $\pm\pi/2$, dostávame po jej vložení do kruhovo polarizovaného svetla lineárne polarizované svetlo. Predpokladajme, že ŠVD zavedie fázový posun $+\pi/2$ a že na FH dopadá lineárne polarizované svetlo pod takým uhlom β , že vzniká

kruhovo polarizované svetlo. Po prechode tohoto svetla cez FH a ŠVD môžu na výstupe ŠVD nastať dve prípady:

-Svetlo je opäť lineárne polarizované pod uhlom β . To znamená, že fázový posun od FH sa vykompenzoval s fázovým posunom od ŠVD. Fázový posun zavádzaný FH teda musel byť $-\pi/2$, čo odpovedá LKP svetlu.

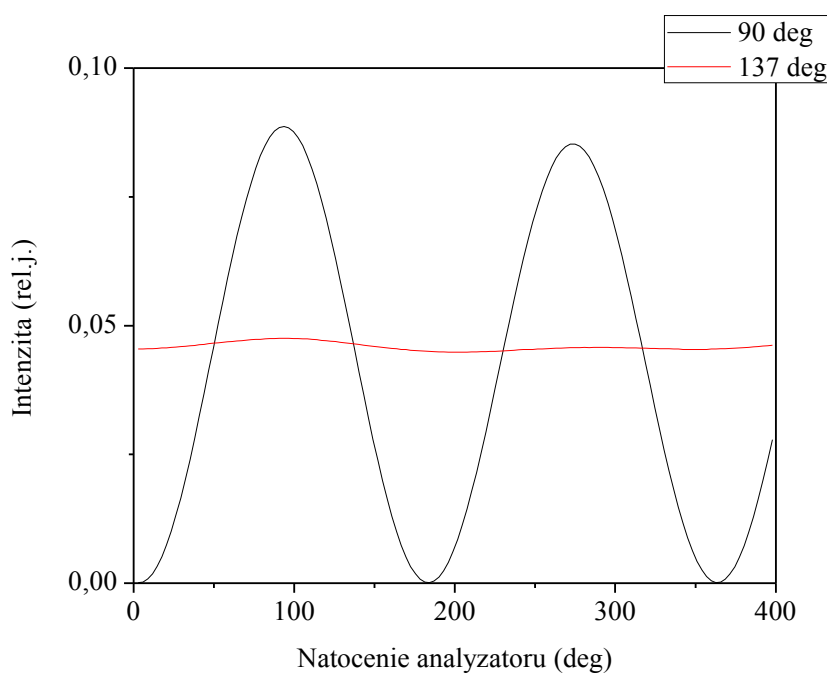
-Svetlo je lineárne polarizované pod uhlom 2β . To znamená, že fázový posun zavádzaný FH musel byť $+\pi/2$, čo odpovedá PKP svetlu.

4. VÝSLEDKY MERANIA

4.1. ŠTVRŤVLNNÝ FRESNELOV HRANOL

Pri tomto type FH nás zaujímalo, pod akým uhlom dopadu β musí na ŠFH dopadať lineárne polarizované svetlo, aby sme na výstupe dostali kruhovo polarizované svetlo.

Najskôr sme sa zamerali na vlnovú dĺžku 543 nm. Na obrázku 4.1 možno vidieť ukážku nameraných dát pre uhly dopadu β rovné 90° a 137° . Červená krivka odpovedá kruhovej polarizácii (intenzita je vo všetkých smeroch rozložená približne rovnako) a čierna lineárnej polarizácii (intenzita maximálna v jednom smere).



Obr.4.1: Ukážka nameraných dát pre uhly dopadu β rovné 90° a 137° . Vlnová dĺžka 543 nm.

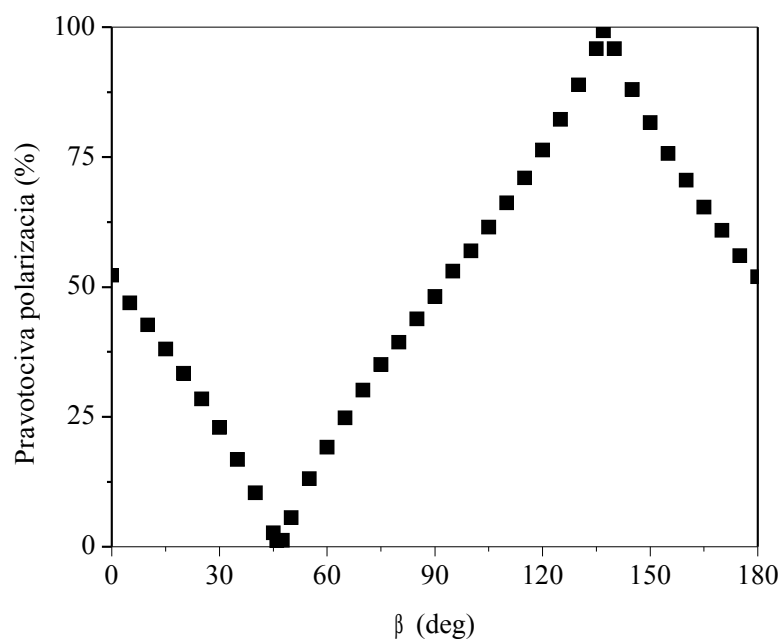
Pre jednotlivé uhly dopadu β sme zisťovali, ako polarizované svetlo po prehode ŠFH vzniká. Výsledky sú na obrázku 4.2. Vidno z nich, že v okolí 2° ($\pm 1^\circ$) dostávame lineárne polarizované svetlo, zložené z takmer rovnako percentuálne zastúpeného

PKP a ĽKP svetla. Zväčšovaním uhlu dopadu β , sa zvyšuje podiel zastúpenia ĽKP svetla, až pre uhol $46^\circ (\pm 1^\circ)$ dosiahne ĽKP svoje maximum. Podiel PKP svetla je teda v okolí 46° minimálny. Pri ďalšom zväčšovaní β sa naopak zvyšuje podiel zastúpenia PKP svetla (v rozmedzí $90^\circ - 93^\circ$ dostávame lineárne polarizované svetlo), až pre uhol $137^\circ (\pm 1^\circ)$ dosiahne svoje maximum percentuálny podiel zastúpenia PKP svetla. Ak naďalej zväčšujeme β dostáva prevahu opäť ĽKP svetlo a takto sa postupne situácia cyklicky opakuje.

V teoretickej časti už bolo spomenuté, že uhol dopadu β , musí byť (aby z lineárne polarizovaného svetla vzniklo po prechode ŠFH kruhovo polarizované svetlo) 45° , resp. 135° . Na stupnici meraného ŠFH sme dosiahli najlepšie hodnoty v jednostupňovom okolí uhlov 46° a 137° , čo odpovedá teoretickým predpokladom (ak uvážime, že stupnica polarizátora bola voči stupnici analyzátora mierne posunutá ($\sim 2^\circ$)).

To, že uhlu 46° odpovedá ĽKP a uhlu 137° odpovedá PKP sme zistili pomocou ŠVD spôsobom popísaným v podkapitole 3.2.

Kvalitnejšie kruhovo polarizované svetlo dosahoval hranol pre uhol 137° , pri ktorom bolo percentuálne zastúpenie PKP svetla 99,3 %. Zastúpenie ĽKP pre uhol 46° bolo 98,9 %.

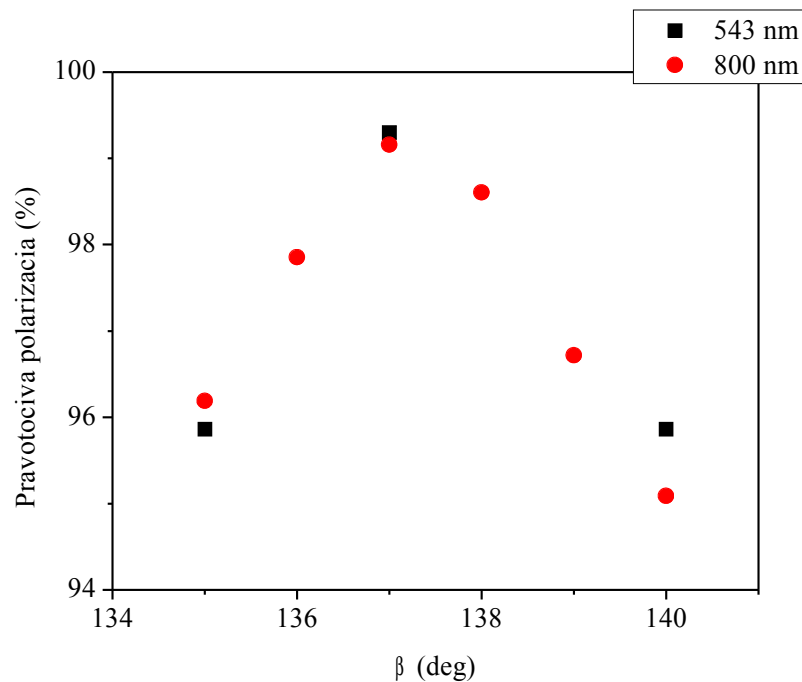


Obr. 4.2: Závislosť pravotočivej kruhovej polarizácie na uhle dopadu β pre štvrt'vlnný Fresnelov hranol. Vlnová dĺžka 543 nm.

Ďalšia vlastnosť, ktorá nás zaujímala bola závislosť kvality polarizácie na použitej vlnovej dĺžke λ . V podstate šlo o to, zistiť, či pri inej vlnovej dĺžke je zvolená kruhová polarizácia maximálna na rovnakom uhle ako pri vlnovej dĺžke 543 nm. Keďže kvalita kruhovo polarizovaného svetla bola lepšia na 137° , zvolili sme tento uhol pre ďalšie merania. Na monochromátore sme nastavili vlnovú dĺžku na 800 nm a premerali sme okolie maxima PKP (pre 543 nm), teda uhly od $135^\circ - 140^\circ$.

Výsledky tohoto merania sú graficky spracované na obrázku 4.3 a umožňujú nám vidieť, že aj pri výraznej zmene vlnovej dĺžky ostáva hodnota maxima PKP na rovnakom uhle (v rámci chyby natočenia $\beta \pm 0,5^\circ$).

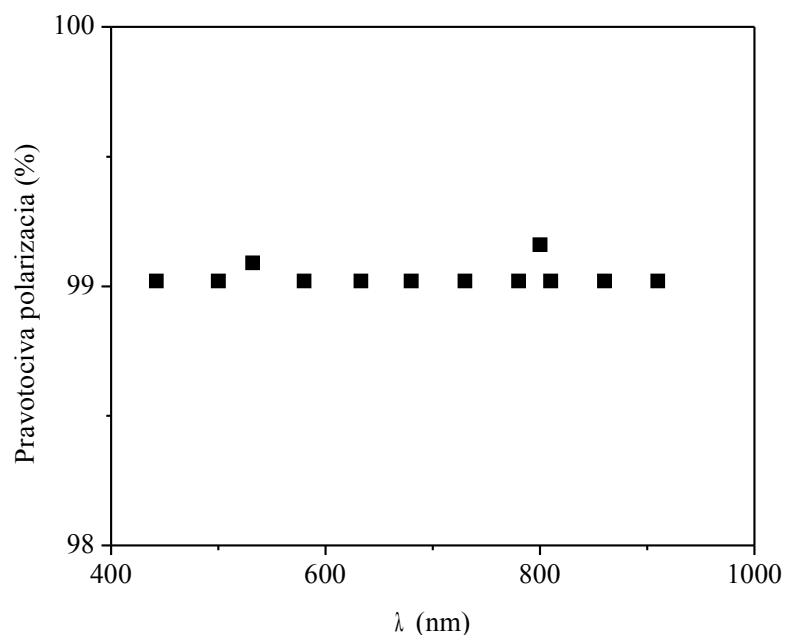
Na základe toho môžem konštatovať, že uhol na ktorom sa dosahuje maximálna PKP sa v širokom rozmedzí vlnových dĺžok meniť nebude.



Obr. 4.3: Závislosť maxima pravotočivej kruhovej polarizácie na uhle dopadu β pre štvrtvlnný Fresnelov hranol. Vlnové dĺžky 543 nm a 800 nm.

Dôležité je taktiež overiť, či sa v závislosti na vlnovej dĺžke nemení kvalita kruhovo polarizovaného svetla. Pre toto meranie sme na základe predchádzajúceho výsledku zvolili uhol $\beta = 137^\circ$.

Grafické spracovanie výsledkov merania je na obrázku 4.4. Vidíme z neho, že kvalita vzniknutého kruhovo polarizovaného svetla takmer vôbec na vlnovej dĺžke nezávisí.



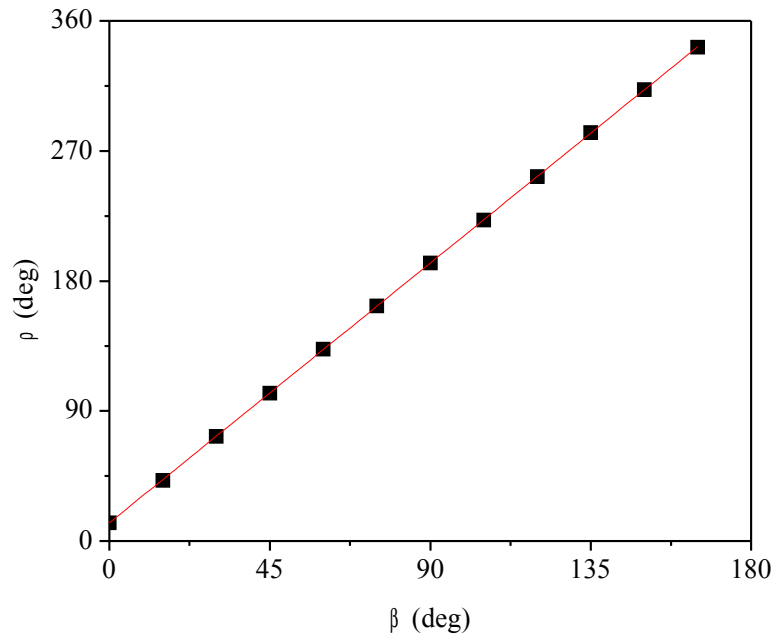
Obr. 4.4: Kvalita pravotočivo kruhovo polarizovaného svetla v závislosti na vlnovej dĺžke pre štvrtvlnný Fresnelov hranol. Zvolený referenčný uhol dopadu $\beta = 137^\circ$.

Premeriavali sme, čo sa stane ak hranol mierne otočíme doprava a doľava. Volili sme vlnovú dĺžku 543 nm a uhol $\beta = 137^\circ$. Pri pôvodnom natočení FH sme dosiahli PKP 99,3 %. Pri natočení (približne $3^\circ - 5^\circ$) v pravo, bola hodnota PKP rovnaká, zatiaľčo pri natočení vľavo bola 95,3 %. Rozdiel sa dá odôvodniť tým, že je veľmi ťažké natočiť FH tak, aby na neho paprsok dopadal presne kolmo, a teda nevieme pri ktorej z týchto konfigurácií bol natočený najpresnejšie.

4.2 POLVLNNÝ FRESNELOV HRANOL

Pri tomto type FH bol cieľ overiť charakter polarizácie, vznikajúcej po prechode lineárne polarizovaného svetla PFH pri rôznych uhloch β . Chceli sme totiž overiť, či sa PFH správa ako PVD, a teda že stáča rovinu polarizácie o uhol 2β .

Namerané hodnoty sme preložili lineárnou závislosťou $\rho = 2\beta$. Výsledky sú graficky spracované na obrázku 4.5.

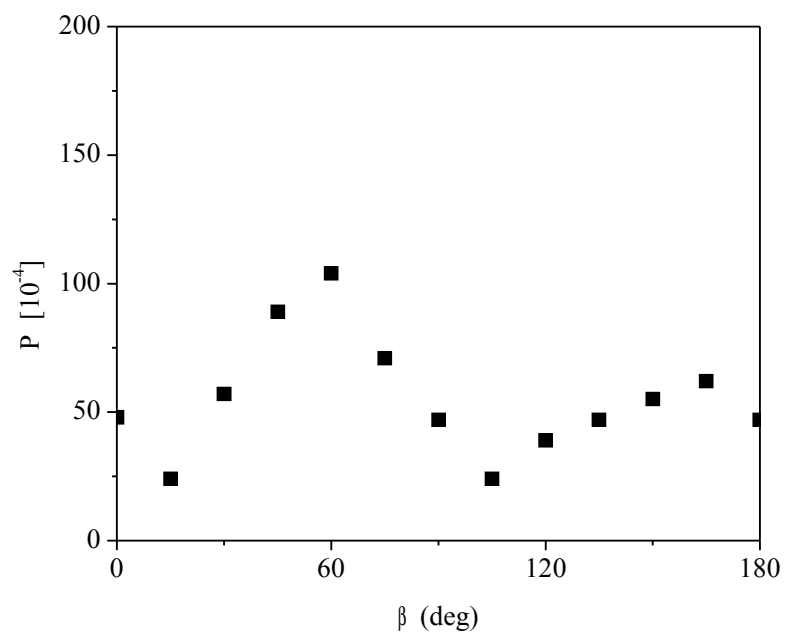


Obr. 4.5: Závislosť uhla natočenia polarizačnej roviny ρ po prechode polvlnným Fresnelovým hranolom na uhle dopadu β . Namerané hodnoty sú preložené priamkou so smernicou 2. Vlnová dĺžka 543 nm.

Namerané hodnoty sme preložili priamkou so smernicou 2, čo odpovedá vzťahu $\rho = 2\beta$. PFH teda stáča rovinu polarizácie o uhol 2β , a správa sa ako PVD.

Ďalej bolo potrebné zistiť aká presná je vzniknutá lineárna polarizácia v závislosti na uhle dopadu β . Na to využijem, ako som už spomenula v teoretickej časti extinkčný koeficient P.

Grafické spracovanie hodnôt sa nachádza na obrázku 4.6.

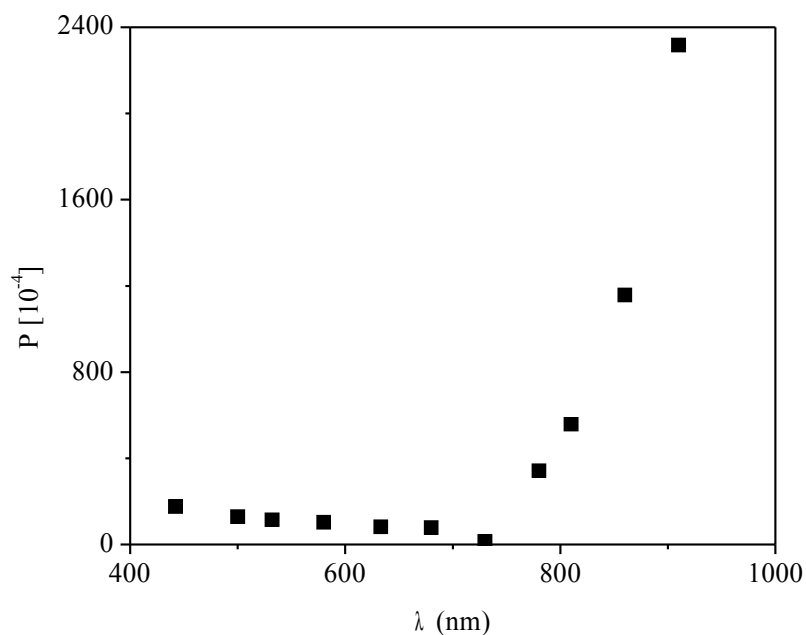


Obr. 4.6: Závislosť extinkčného koeficientu na uhle dopadu β pre polvlnný Fresnelov hranol. Vlnová dĺžka $\lambda = 543$ nm.

Z obrázku 4.6 vidno, že extinkčný koeficient na uhle dopadu β závisí, a že najkvalitnejšie lineárne polarizované svetlo dostávame pre uhly dopadu 15° a 105° .

Opäť, rovnako ako u ŠFH chceme overiť závislosť kvality polarizácie na vlnovej dĺžke. V tomto meraní volíme uhol dopadu $\beta = 60^\circ$.

Grafické spracovanie nameraných hodnôt je na obrázku 4.7.



Obr. 4.7: Závislosť kvality lineárne polarizovaného svetla na vlnovej dĺžke pre polvlnný Fresnelov hranol. Uhol dopadu $\beta = 60^\circ$.

Z obrázku 4.7 vidíme, že kvalita lineárne polarizovaného svetla je pomerne dobrá a na vlnovej dĺžke takmer nezávislá do hodnoty okolo 750 nm. Nad touto hodnotou sa kvalita prudko zhoršuje. FH nad touto hodnotou stráca výhodu nezávislosti na vlnovej dĺžke. To je najpravdepodobnejšie spôsobené faktom, že index lomu závisí na vlnovej dĺžke. Táto závislosť sa u PFH prejavila výraznejšie ako u ŠFH z toho dôvodu, že svetlo v ňom odráža viackrát, a teda odchýlka skutočného fázového posunu od teoretickej hodnoty $\pi/4$, sa znásobí.

5. DISKUSIA

5.1 ŠTVRŤVLNNÝ FRESNELOV HRANOL

V teoretickej časti bolo uvedené, že na výrobu kruhovo polarizovaného svetla z lineárne polarizovaného svetla musí byť uhol dopadu roviny lineárne polarizovaného svetla β rovný 45° alebo 135° . Nami namerané hodnoty (obrázok 4.2) sú 46° resp. 137° ($\pm 1^\circ$). To, ak uvážime mierne vzájomné natočenie stupníc analyzátoru a polarizátora ($\sim 2^\circ$), odpovedá teoretickým predpokladom.

Preukázala sa vysoká kvalita vzniknutého kruhovo polarizovaného svetla: pre PKP 99,3 % a pre LKP 98,9 %. Pre ŠVD (ŠVD od firmy CVI nultého rádu konštruovaná na 810 nm), ktorá bola charakterizovaná v [6] bola kvalita vzniknutého PKP aj LKP svetla 99,3 %. ŠVD a ŠFH sú teda, čo sa týka kvality vzniknutého polarizovaného svetla, polarizačné zariadenia rovnakej úrovne.

Zistili sme, že závislosť kvality polarizovaného svetla na vlnovej dĺžke je zanedbateľná (obrázok 4.4), čo odpovedá teoretickým predpokladom. U ŠVD bola ale závislosť na vlnovej dĺžke (napriek nultému rádu doštičky) výrazná [6], čo ju v porovnaní s ŠFH znevýhodňuje.

5.2 POLVLNNÝ FRESNELOV HRANOL

Potvrdilo sa, že PFH polarizuje svetlo rovnakým spôsobom ako PVD, a teda že stáča rovinu polarizácie o uhol 2β . To dokazuje smernica grafu na obrázku 4.5, ktorá je rovná 2. Kvalita lineárne polarizovaného svetla, a teda extinkčný koeficient P, na uhle dopadu β závisia. Táto závislosť je však minimálna (obrázok 4.6).

Nezávislosť polarizačných vlastností na vlnovej dĺžke, tu už nie je taká výrazná ako u ŠFH. To sa dá odôvodniť závislosťou indexu lomu na vlnovej dĺžke, znásobenú vyšším počtom odrazov ako u ŠFH. Z obrázku 4.7 vidno, že kvalita lineárne polarizovaného svetla nepatrne rastie od nižších vlnových dĺžok až ku hodnote okolo 730 nm, kedy dostávame najkvalitnejšie svetlo s extinkčným koeficientom $P = 14 \cdot 10^{-4}$. Tesne za touto hodnotou sa to však zmení a kvalita sa prudko zhoršuje.

V rozmedzí 400 -750 nm ale môžem konštatovať, že polarizačné vlastnosti PFH na vlnovej dĺžke nezávisia.

6. ZÁVER

Podarilo sa nám overiť a približne spektrálne ohraničiť polarizačné vlastnosti skúmaných Fresnelových hranolov. Ukázalo sa, že nimi vieme vytvoriť polarizované svetlo, ktoré kvalitou odpovedá polarizovanému svetlu vytvorenému vlnovými doštičkami. Potvrdilo sa, že po prechode lineárne polarizovaného svetla PFH vzniká rovnako polarizované svetlo ako po prechode lineárne polarizovaného svetla PVD. V širokom spektrálnom rozmedzí sa ukázala nezávislosť polarizačných vlastností oboch Fresnelových hranolov na vlnovej dĺžke. Práve táto nezávislosť na vlnovej dĺžke FH zvyhodňuje voči VD.

POUŽITÁ LITERATÚRA:

- [1] Born M., Wolf E.: *Principles of optics*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 7th ed., 1999.
- [2] Brom P.: *Polarizace světla a její ovlivnění optickými prvky*, bakalářská práce, Univerzita Karlova v Praze, 2006.
- [3] Nahálková P.: *Ultrarychlá dynamika nosičů náboje v nanokrystalech CdS, CdSe*, diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze, 2003.
- [4] <http://spie.org/x32381.xml>, 24.5.2011.
- [5] <http://www.klccgo.com/fresnelrhomb.htm>, 24.5.2011.
- [6] Dzurňák B.: *Štúdium vlastností štvŕvlnových doštičiek*, študentský projekt, Univerzita Karlova v Praze, 2003.
- [7] Saleh B., Teich M.: *Zaklady fotoniky sv. 2*, MATFYZPRESS, Praha, 1994.

POUŽITÉ SKRATKY:

FH – Fresnelov hranol

ŠFH – štvrt'vlnný Fresnelov hranol

PFH – polvlnný Fresnelov hranol

VD – vlnová doštička

ŠVD – štvrt'vlnná vlnová doštička

PVD – polvlnná vlnová doštička

PKP – pravotočivá kruhová polarizácia (pravotočivo kruhovo polarizované)

LKP – ľavotočivá kruhová polarizácia (ľavotočivo kruhovo polarizované)

KP – kruhová polarizácia