

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky



Měření vlastností tekutých krystalů

Meranie vlastností tekutých kryštálov

Bakalářská práce

Dominik Špilák

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Přístrojová optika

Vedoucí práce: Mgr. Radek Čelechovský, Ph.D.

Olomouc 2014

Prehlasujem, že bakalársku prácu som vypracoval samostatne s podporou školiteľa Mgr. Radka Čelechovského, Ph.D. a použitím literatúry citovanej v závere práce.

V Olomouci 04.07.2014

.....

Abstrakt

Tekuté kryštály sú látky, ktorých častice sa v elektromagnetickom poli chovajú ako dipóly a orientujú sa v smere jeho pôsobenia. Táto vlastnosť ponúka mnohé využiteľné optické aplikácie. Bakalárska práca je zameraná na meranie vlastností tekutých kryštálov. Popisuje závislosť priloženého napätia na fázovom posune v dvoch prípadoch. V prvom je modulátor z nematických tekutých kryštálov vložený do jednej vetvy Mach-Zehnderovho interferometra, kde je vyhodnotenie fázového posunu na základe vzniknutých interferenčných prúžkov. V druhom prípade je meranie fázového posunu pomocou polarimetra a prepočte zo Stoksových parametrov.

Kľúčové slová

tekuté kryštály, fázový posun, modulátor svetla, interferencia, polarimeter

Abstract

The liquid crystals are the substances, whose parts behave like the dipoles in the electromagnetic field and they are oriented in the direction of operating forces. This property offers many useful optical applications. The thesis is aimed at measuring the properties of the liquid crystals. It describes the dependence of the applied voltage on the phase retardance in two cases. There is in the first case when the nematic liquid crystal is retarded and inserted into one branch of the Mach-Zehnder's interferometer. The evaluation of the phase difference is from the generated interference fringes. The other case is the measurement of the phase retardance with the polarimeter and the evaluation from Stokes parameters.

Key words

the liquid crystals, the phase retardance, the light modulator, the interferometry, the polarimetry

Pod'akovanie:

Ďakujem Mgr. Radkovi Čelechovskému, Ph.D. za profesionálne vedenie bakalárskej práce, cenné rady, metodické, ako aj teoretické a praktické pripomienky a pomoc pri realizácii experimentálnej časti práce.

Obsah

Úvod.....	7
1. Popis činností tekutých kryštálov	8
2. Typy tekutých kryštálov	9
2.1. Smektická fáza	9
2.2. Nematická fáza	10
2.3. Cholestrická fáza	11
3. Polarizačné vlastnosti svetla	12
3.1. Stokesové parametre svetla	14
3.1.1 Poincarého sféra	15
3.2. Polarimeter	16
4. Kryštalová optika	18
4.1. Šírenie svetla v jednoosých kryštáloch	18
4.2. Fázové doštičky	20
5. Elektro-optická modulácia	24
5.1. Fázová modulácia	24
5.2. Amplitúdová modulácia	26
5.3. Elektro-optické vlastnosti nematických tekutých kryštálov	27
6. Princíp funkcie modulátora z nematických tekutých kryštálov	30
6.1. Napájanie modulátora z nematických tekutých kryštálov	31
6.2. Časová odozva v tekutých kryštáloch.....	31
7. Experimentálna časť.....	33
7.1. Závislosť fázového posunu na priloženom napätí.....	33
7.1.1. Interferometrická metóda.....	33
7.1.2. Polarimetrická metóda.....	34
7.2. Porovnanie	37
Záver	39
Zoznam použitej literatúry	43

Úvod

Bakalárska práca sa zaoberá problematikou vlastností tekutých kryštálov a využití v modulátore svetla . Teoretická časť obsahuje kapitoly s prehľadom a rozdelením tekutých kryštálov, ďalej popisuje polarizačné vlastnosti svetla, zahŕňa úvod do optiky kryštálov, kde je o modulátore z nematických tekutých kryštálov uvažované ako o jednoosom kryštáli.

Hlavnou úlohou v experimentálnej časti je zmerať dvoma meracími metódami fázový posun, ktorý je závislý na priloženom napätí. Metóda interferometrická je založená na princípe amplitúdovej modulácie. V tomto prípade je modulátor z nematických tekutých kryštálov vložený do jednej vetvy Mach-Zehnderovho interferometra. V druhom prípade ide o meranie pomocou polarimetra, kde sa využíva princíp merania Stokesových parametrov a polarizačných vlastností svetla. V závere práce sa nachádzajú grafy závislostí fázového posunu na priloženom napätí, popis oboch metód, ich porovnanie a vyhodnotenie.

1. Popis činností tekutých kryštálov

Tekuté kryštály sú z fyzikálneho hľadiska organické látky, ktoré svojimi vlastnosťami tvoria prechod medzi pevnými a kvapalnými látkami [1]. Molekuly týchto látok sa nazývajú mezogény, tie sú rozpustené v kvapaline a vytvárajú homogénny roztok. Ten je svojimi vlastnosťami podobný kryštálu. Sú tekuté podobné ako kvapaliny, ale ich molekuly sú usporiadané pravidelne, podobne ako majú pevné látky. U týchto látok je snaha udržať pravidelné vnútorné usporiadanie tak veľká, že ich kryštalická forma neprechádza ohrevom priamo do kvapalného stavu, ale prechádza istým medzistavom, označovaným ako mezomorfný, alebo parakryštalický [2]. Tekuté kryštály sú anizotropné látky pozostávajúce z dlhých molekulových reťazcov v tvare tyčíniek, doštičiek alebo diskov, ktoré sú vzájomne voči sebe orientované podľa rôznych pravidiel a zorganizované do väčších klastrov [3]. Svetlo sa totiž v takejto látke nešíri vo všetkých smeroch rovnako, t.j. látka nemá rovnakú priepustnosť a rovnaký index lomu.

Správanie roztoku je zapríčinené vplyvom vnútorného usporiadania a tvarom molekúl, tie sú dlhé a úzke. Usporiadanie a orientácia molekúl spôsobuje mnoho optických javov. Dochádza k zmene polarizácie svetla, v závislosti na orientácii molekúl materiálu. Jednou z ďalších využívaných vlastností je reakcia molekúl tekutých kryštálov na elektromagnetické pole. Molekuly sú neutrálne, ale elektrický náboj v jednotlivých častiach molekúl môže byť značne rozdielny. Molekula sa stáva dipólom ak je jedná časť molekuly nabitá kladne a druhá časť záporne, potom sa má dipól snahu natáčať v elektromagnetickom poli v jeho smere. Tento smer sa nazýva direktor a zároveň je to aj optická osa nematického tekutého kryštálu. Ich rýchle preorientovanie pod vplyvom mierneho elektrického poľa je výsledok ich tekutej povahy.

Fyzikálne vlastnosti taktiež závisia aj od teploty a tlaku, ako aj od typu tekutých kryštálov a stupňa usporiadania v tekutom kryštalickom stave. Ďalšou ich vlastnosťou je dvojlom, ktorý je zvyčajne spájaný s priehľadnými kryštálmi s nesymetrickou mriežkovou štruktúrou ako napríklad u islandského vápenca a kremeňa [4]. Hodnota dvojlomu je pritom premenlivá v závislosti na veľkosti priloženého elektrického napätia alebo magnetického poľa [5]. Preto priepustnosť svetla v takýchto materiáloch sa mení s orientáciou molekulových reťazcov.

2. Typy tekutých kryštálov

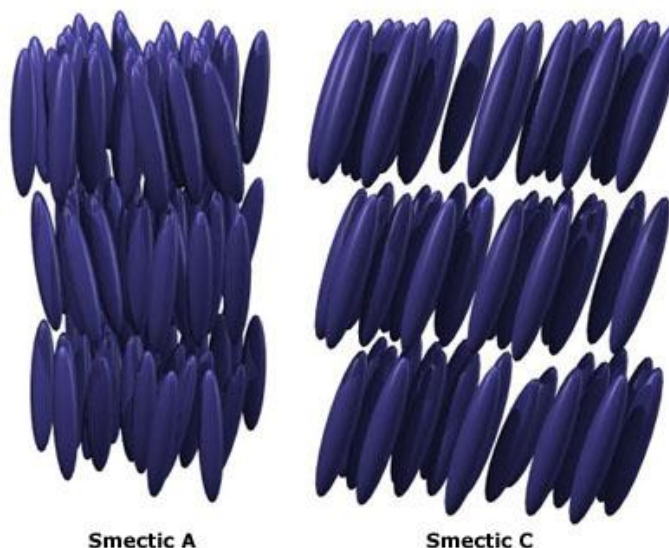
Tekuté kryštály rozdeľujeme podľa usporiadania molekúl :

2.1. Smektická fáza

Smektické kryštály Obr. 2.1-1 majú najbližšie k tuhým látkam vďaka vysokej viskozite a vrstevnatej textúre. Smektická fáza je tvorená podlhovastými vrstvami molekúl, ktoré sú pomerne tuhé a môžu po sebe veľmi ľahko klzať. Hlavnou črtou, ktorou sa líšia od nematickej fázy je jej rozvrstvenie. Táto fáza sa vyznačuje podlhovastými lineárnymi molekulami uloženými v rovnobežných vrstvách. Dlhšie osi molekúl s rozmerom asi 2nm majú vzhľadom na povrch kryštálu stálu orientáciu. Najčastejšie sú na povrch kolmé. V praxi však majú minimálne využitie a nenašli preto žiadne širšie uplatnenie [5].

Smektické kryštály sa ďalej delia na:

- *smektické A* - Podlhovasté molekuly sú usporiadané vo vrstvách, rovnobežné s normálou k vrstve.
- *smektické C* - Podlhovasté molekuly vo vrstvách sú odklonené od normály k vrstvám a zvierajú nenulový uhol.



Obr. 2.1-1: Smektické A a smektické C usporiadanie tekutých kryštálov [7].

2.2. Nematická fáza

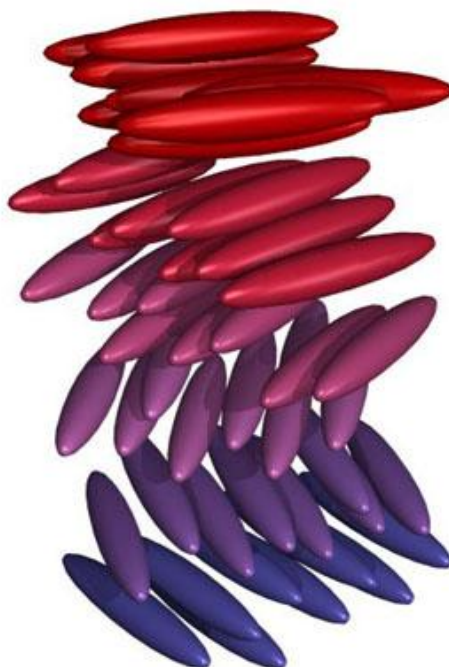
Podlhovasté molekuly tekutých kryštálov sa majú snahu orientovať usporiadane, prevažne v jednom smere a ich orientácia sa mení vplyvom mechanických, alebo elektrických síl. Väčšina nematických kryštálov má jednu os. Molekuly nematických kryštálov sú vysoko anizotropné a zvyčajne vytvárajú pevné elipsoidné častice, Obr. 2.2-1. Nie sú usporiadané do konkrétnych vrstiev, ale svoje ťažiská majú rozdelené podobne ako v kvapaline, teda náhodne. Molekuly sú tyčinkovitého tvaru a vyznačujú sa chaotickým pohybom. Medzimolekulové interakcie, ktoré sú za to zodpovedné majú tendenciu vyrovnávať dlhé molekuly rovnobežne spoločným smerom. Nematická fáza je najjednoduchšia z kvapalných kryštálov. Tieto kryštály majú najbližšie ku kvapalnej fáze, preto majú najširšie praktické využitie[5]. Využívajú sa najčastejšie na výrobu elektro-optických súčiastok.



Obr. 2.2-1: Nematické usporiadanie tekutých kryštálov [7].

2.3. Cholestrická fáza

Fáza bola prvýkrát pozorovaná pri derivátoch cholesterolu. Je tvorená podlhovastými molekulami, ktoré sú chirálne. Vyskytujú sa v dvoch modifikáciách ako pravotočivé a ľavotočivé. Špirálovito zatočené kryštály zodpovedajú stavu s najmenšou energiou. Považujú sa za špeciálny prípad nematických kryštálov [6]. Molekuly týchto kryštálov sú usporiadané do paralelných vrstiev vzdialených od seba približne 200 nm. V každej vrstve majú molekuly zhodnú orientáciu, odlišnú od dvoch susedných vrstiev o určitý uhol. V závislosti na type materiálu môže byť tento uhol rôzny, ale vo všeobecnosti sa pohybuje okolo hodnoty $0,18^\circ$ [5].



Obr. 2.3-1: Cholestrické usporiadanie tekutých kryštálov[7]

3. Polarizačné vlastnosti svetla

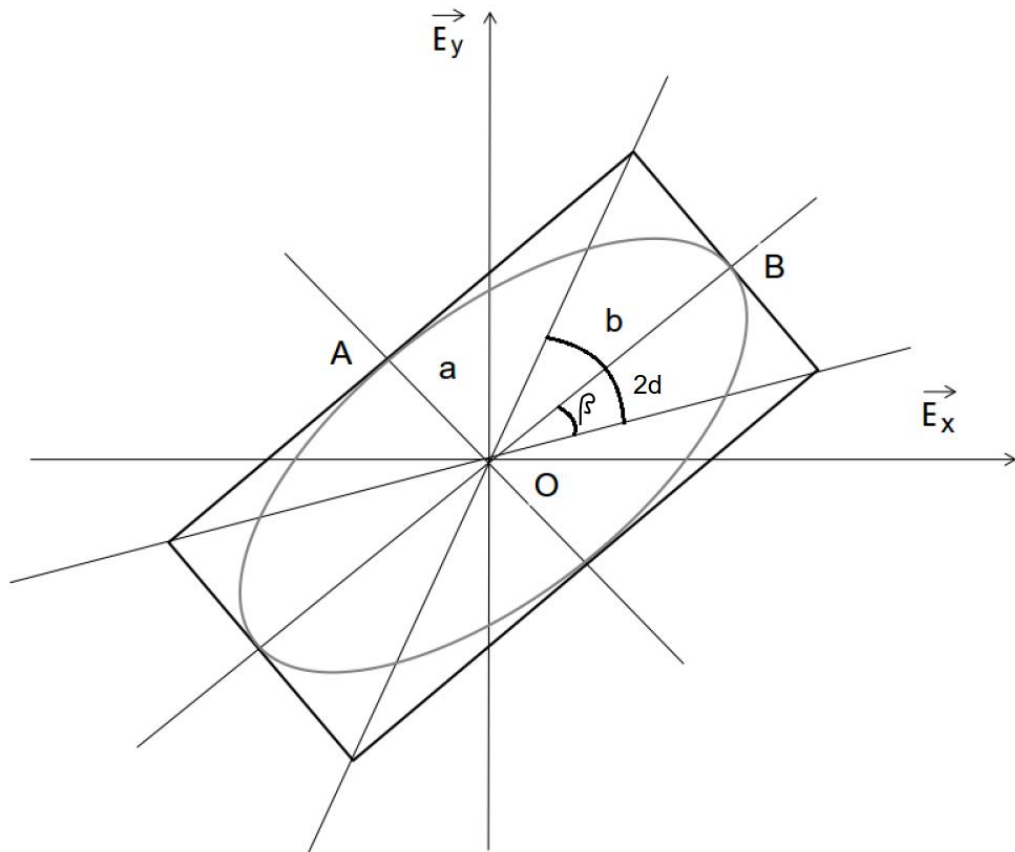
Polarizácia súvisí s vektorovým charakterom elektromagnetického vlnenia. Na určenie typu polarizácie je dôležité zistiť, ako sa správa koncový bod vektoru elektromagnetického poľa v priestore a čase. Na určenie polarizačného stavu vlny sa pracuje s vektorom elektrickej intenzity. Polarizačný stav sa definuje pre monochromatickú rovinnú vlnu, čo je vlastne transverzálna elektromagnetická vlna. Pri polarizovanom svetle sa koncový bod elektrickej intenzity \vec{E} pohybuje po dobre definovanej trajektórii. Vektor elektrickej intenzity leží v rovine kolmej k smeru šírenia z . Kmity vektoru elektrickej intenzity \vec{E} je možné vyjadriť pomocou dvoch kolmých zložiek E_x a E_y . Tie popisujú tieto rovnice:

$$\vec{E} \equiv (E_x, E_y, 0)$$

$$E_x = A_x \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \quad (3-1)$$

$$E_y = A_y \cos(\omega t - kz + \varphi_y).$$

Amplitúdy zložiek elektrickej intenzity A_x a A_y , rozdiel fáz je $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$, k je vlnové číslo, ω je kruhová frekvencia, z určuje smer šírenia vlny. Ak sa uvažuje s rovinnou harmonickou vlnou, ktorej smer šírenia je totožný s osou z , potom je možné rozložiť ľubovoľný smer kmitania vektoru \vec{E} na dve zložky, x -ovú a y -ovú. V závislosti na amplitúdach a fázovom rozdieli $\Delta\varphi$ kmitania oboch zložiek je možné rozlíšiť tri druhy polarizácie. Lineárna ak je $\Delta\varphi = 0$, alebo $\Delta\varphi = \pi$ a amplitúdy $A_x = 0$, alebo $A_y = 0$. Kruhová, ak je $\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$, amplitúdy zložiek sú $A_x \neq A_y$ a eliptickú, ak nenastane ani jeden z predchádzajúcich prípadov. Smer orientácie vektoru elektrickej intenzity je smere hodinových ručičiek pre znamienko kladné a proti smeru pre záporné [15].



Obr. 3-1: Polarizačná elipsa predstavuje najjednoduchší prípad polarizácie [13].

Úsečka a predstavuje dĺžku poloosi \overline{AO} , b predstavuje dĺžku poloosi \overline{BO} . Poloos \overline{BO} je pootočená oproti osi \vec{E}_x o uhol β .

Po vylúčení zložiek $\omega t - kz$ z rovníc (3-1), je možné získať rovnicu elipsy. Koncový bod vektoru elektrickej intenzity sa bude pohybovať v smere hodinových ručičiek v prípade, ak $\Delta\varphi > 0$ a proti smeru, ak $\Delta\varphi < 0$. Rovnica elipsy je potom:

$$\frac{E_x^2}{A_x^2} + \frac{E_y^2}{A_y^2} - \frac{2E_x E_y}{A_x A_y} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi, \quad (3-2)$$

3.1. Meranie Stokesových parametrov svetla

Meranie polarizácie svetla sa využíva vo viacerých vedeckých disciplínach. Polarizačný stav úplne polarizovaného svetla reprezentuje polarizačná elipsa, ktorá sa dá opísať taktiež Stokesovým vektorom. Keďže svetlo nie je nikdy úplne koherentné, používajú sa na určenie stupňa polarizácie tzv. Stokesové parametre, ktoré charakterizujú čiastočne polarizované svetlo. Úplne polarizované svetlo opisujú všetky štyri parametre. Zložky Stokesového vektora \vec{S} sú s_1, s_2, s_3 .

$$\vec{S} = |E_x|^2 + |E_y|^2 = s_1 + s_2 + s_3 = I$$

$$s_1 = |E_x|^2 - |E_y|^2 = I \cos 2\alpha \cos 2\sigma = I \cos 2\beta \quad (3.1-1)$$

$$s_2 = E_x^* E_y + E_x E_y^* = I \sin 2\alpha \cos 2\sigma = I \sin 2\beta \cos 2\delta$$

$$s_3 = -i(E_x^* E_y - E_x E_y^*) = I \sin 2\sigma = I \sin 2\beta \sin 2\delta,$$

kde I je celková intenzita $|\vec{E}|^2$, α a σ popisujú elipsu, β a δ je pár ekvivalentných parametrov. Vektor \vec{S} popisuje celkovú intenzitu, s_1 popisuje horizontálnu, alebo vertikálnu zložku, s_2 pri zvierajúcom uhle 45° , alebo uhle 135° . s_3 popisuje kruhovú zložku. Stokesov vektor úplne polarizovaného svetla leží na povrchu gule - Poincarého sféry. Vektor čiastočne polarizovaného svetla leží vnútri a nepolarizované svetlo má nulový vektor[9].

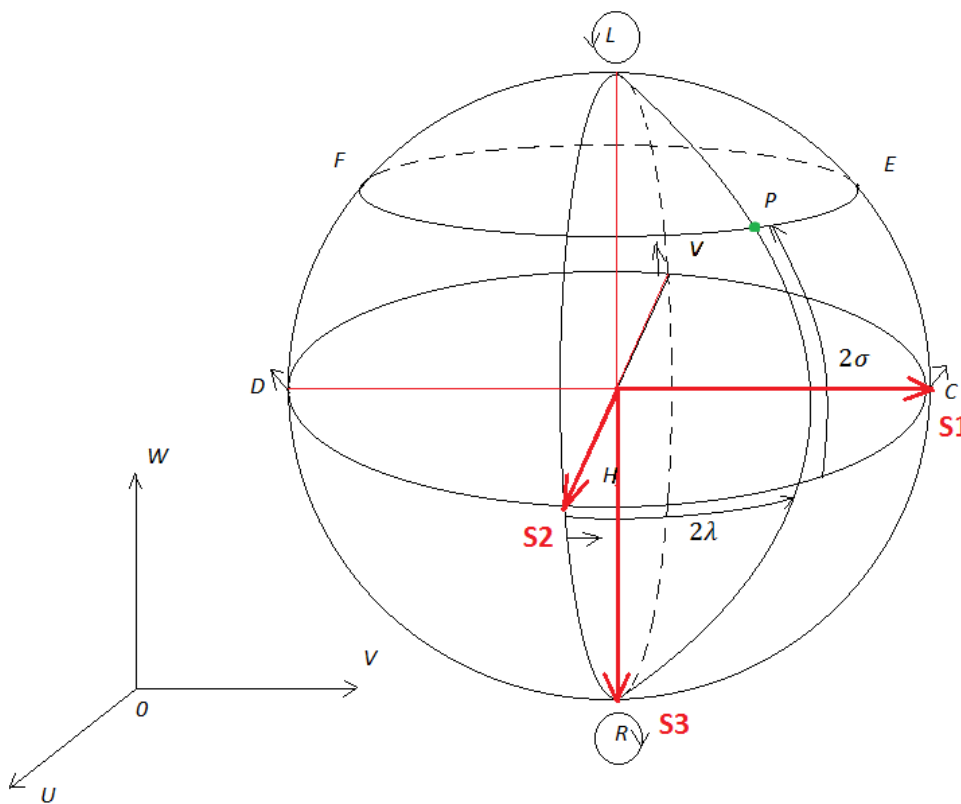
Veľkosť vektoru $|\vec{P}|$, predstavuje stupeň polarizácie svetla. Nepolarizovanému svetlu zodpovedá $|\vec{P}|=0$, úplne polarizovanému naopak $|\vec{P}|=1$. Čiastočne polarizovanému svetlu zodpovedajú hodnoty $|\vec{P}| \in (0; 1)$.

$$P_1 = \frac{\langle E_x^2 \rangle_r - \langle E_y^2 \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, \quad P_2 = \frac{\langle 2E_x E_y \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, \quad P_3 = \frac{\langle 2E_x(\omega t - \frac{\pi}{2})E_y(\omega t) \rangle_r}{\langle E_x^2 \rangle_r + \langle E_y^2 \rangle_r}, \quad (3.1-2)$$

K zisťovaniu polarizácie, a teda aj Stokesových parametrov je potrebné merať štyri intenzity, pri pootočení polarizačného filtra o 0° , 90° , 45° , $45^\circ + \lambda/4$ vlnová doštička, je možné zistiť stupeň polarizácie.

3.1.1. Poincarého sféra

Jednotlivé polarizačné stavy svetelného lúča môžu byť jednoznačne určené bodom na ploche sféry s rádiom , ktorý nadobúda hodnoty 2σ a 2λ . Toto zobrazenie je označované ako Poincarého sféra Obr. 3.1.1-1 [9]. Rozsah hodnôt 2ω a 2λ potrebný pre popis všetkých polarizačných stavov je potom $2\lambda = \langle 0; 2\pi \rangle$ a $2\sigma = \langle -\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \rangle$, ktoré úplne pokrýva plochy sféry.



Obr. 3.1.1-1: Poincarého sféra [9].

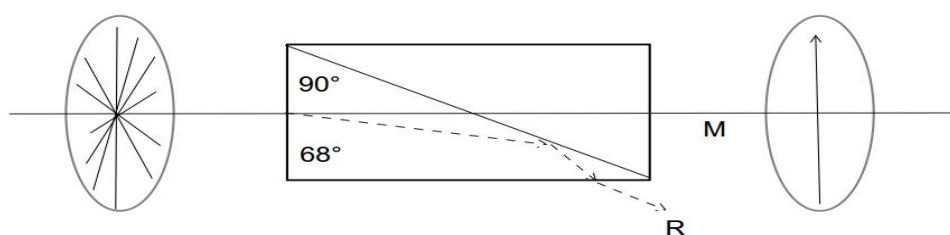
Body H a V predstavujú horizontálne a vertikálne lineárne polarizované svetlo. Oba sú na rovníku ($2\sigma = 0$). Body L a R sú póly sféry a predstavujú ľavé a pravé kruhové kmity. Všetky lineárne polarizačné stavy sa zobrazia ako body na rovníku $HCVD$.

Lúč polarizovaného svetla, ktorého stav je znázornený bodom P na Poincarého sfére sa nazýva svetlo s polarizačným stavom P . Jednoduché zariadenie, ktoré vytvára

polarizované svetlo so stavom P sa nazýva *polarizátor P* . Zariadenie, ktoré prepúšťa kompletne svetlo s polarizačným stavom P je potom *analyzér P* . V kryštálovej optike sa sledujú zmeny polarizačného stavu spôsobené prechádzaním svetelného lúča anizotropným prostredím [10]. Pomocou zistenia polohy koncového bodu na Poincarého sfére je možné zistiť polarizačný stav, jeho typ a fázový posun pre jednotlivé hodnoty po prechode modulátoru z tekutých kryštálov.

3.2. Polarimeter a jeho funkcia

Polarimeter Thorlabs PAX 5700 je zariadenie, ktoré je schopné určiť výsledný stav polarizovaného svetla, po prechode určitou látkou, v tomto prípade modulátoru z nematických kryštálov. Väčšinu polarimetrov tvorí dva a viac dvojlomných hranolov, najčastejšie Nicolových hranolov a to polarizátor a analyzátor. Je to špeciálny druh dvojlomného vápenca, ktorý rozdelí vstupný lúč svetla na riadny a mimoriadny. Polarizátor, ten je fixný a analyzátor otočný. Uhly hranolu sú volené tak, že riadny lúč sa odráža na ploche dotyku oboch častí hranolu a v priamom smere hranolom prechádza len mimoriadny lúč. Ten má tú vlastnosť, že vektor jeho elektrickej intenzity kmitá len v jednej rovine, na rozdiel od obyčajného žiarenia, ktoré obsahuje lúče kmitajúce v rôznych rovinách. Na Obr. 3.2-1, M predstavujem mimoriadny lúč, R predstavuje riadny lúč. Po prechode Nicolovým hranolom vznikne lineárne polarizovaný lúč svetla.



Obr. 3.2-1: Vznik lineárne polarizovaného svetla po prechode Nicolovým hranolom.

Typ polarimetra Thorlabs PAX 5700 Obr. 3.2-3 je schopný merať polarizovaný stav svetelnej vlny šíriacej sa voľným priestorom, alebo vlny naviazanej v optickom vlákne. Vyznačuje sa vysokou hodnotou dynamického rozsahu 70 dB a vzorkovaním 333 vzoriek za sekundu. Poskytuje externé detektory pre rozsah meraní vlnových dĺžok od 400- 1700 nm. Dodávaný software zaznamenáva jednotlivé hodnoty polarizačného stavu na povrchu Poincarého sféry s odchýlkou $\pm 0,2^\circ$ a hodnoty jednotlivých Stokesových parametrov.



Obr. 3.2-3: Polarimeter od firmy Thorlabs, použitý v experimentálnej časti [17].

4. Kryštalová optika

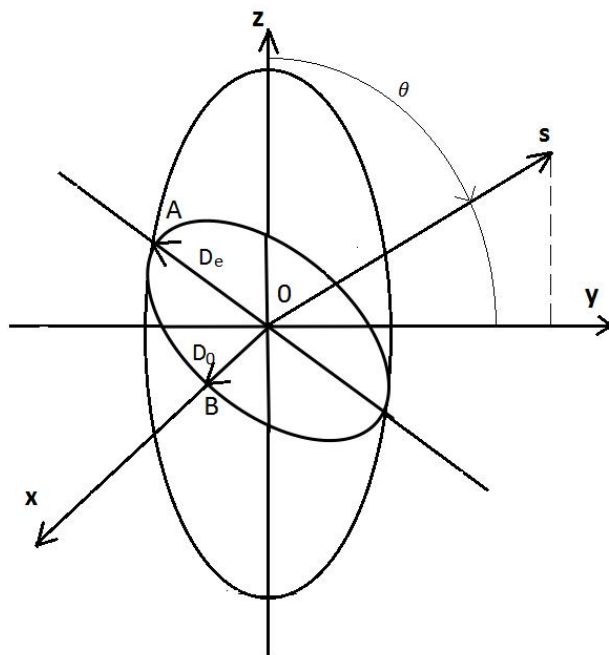
V anizotropných prostrediach závisí rýchlosť svetla na smere jeho šírenia a polarizácií. V kryštáloch existujú jeden, alebo dva smery, v ktorých nedochádza k dvojlomu. Tento prípad nastáva v oblasti optických os. Podľa ich počtu sa delia do skupín jednoosých(napr. kryštál GaAs, LiNbO₃, KDP...) a dvojosých (napr. aragonit, liadok, síra..) [14].

V modulátore z nematických tekutých kryštálov sa nachádza anizotropné prostredie. To znamená, že jeho vlastnosti sú rozličné v rôznych smeroch. Niektoré z príčin sú napríklad nesúmerná orientácia a tvar molekúl v látke, alebo ich rozmiestnenie. Vlastnosť prirodzenej anizotropie majú materiály s kryštalickou štruktúrou, výnimku tvoria kubické kryštály. Umelú anizotropiu môžu spôsobovať vonkajšie vplyvy ako teplotné výkyvy, pôsobenie elektrického a magnetického poľa, alebo mechanické namáhanie. Nematické a smektické tekuté kryštály sú opticky pozitívne (index lomu riadneho lúča je väčší ako index lomu mimoriadneho lúča), smer rýchlej osi molekúl súhlasí so smerom optickej osi [15].

Po prechode týmto prostredím dochádza k dvojlomu, napríklad v kryštáli islandského vápenca (kalcit, CaCO₃). Prirodzené svetlo dopadá na celu, pri jej prechode vzniknú dva lúče, riadny a mimoriadny. Tie sa šíria rôznymi smermi. Na výstupe sú obidva vzájomne posunuté a rovnobežné so vstupným lúčom. Riadny lúč sa šíri rovnako ako v izotropnom prostredí, jeho rýchlosť nezávisí na smere šírenia, splňuje zákon lomu. Mimoriadny sa neriadi zákonom lomu a je posunutý. Optická os a dopadajúci lúč určujú rovinu hlavného rezu [16].

4.1. Šírenie svetla v jednoosých kryštáloch

Jednoosé kryštály používa veľa optických zariadení. Kryštál rozdeľuje dopadajúce svetlo na dva špecifické polarizované lúče s rozdielnym polarizačným stavom, ktoré sa šíria rôznymi rýchlosťami. Ak je kryštál absorpčný, tak s rozdielnymi absorpčnými koeficientmi. Šírenie svetla v jednoosovom kryštáli pozostáva z dvoch vln, riadnej vlny a mimoriadnej vlny. Riadna vlna je polarizovaná kolmo na rovinu hlavného rezu, mimoriadna vlna je polarizovaná v rovine hlavného rezu. Pre tento prípad popisu šírenia vlny je najvýhodnejšie použiť model elipsoidu indexu lomu, Obr. 4.1-1.



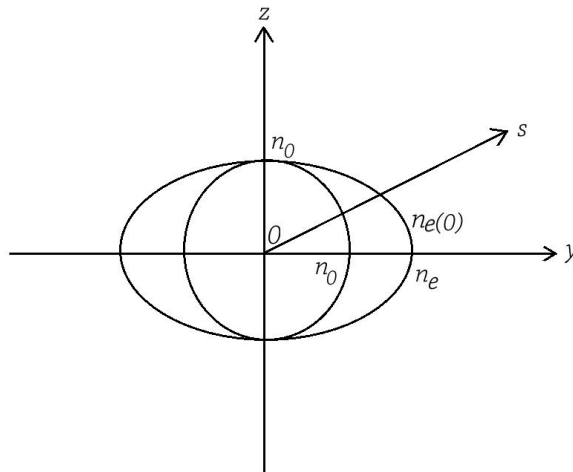
Obr. 4.1-1: Elipsoid indexu lomu [13].

Osi (x, y, z) sú hlavné osi indexy lomu. Elipsoid indexu lomu slúži na určenie oboch fázových rýchlostí, indexov lomu a smery polarizácie oboch nezávislých rovinných vln. Indexy lomu normalových módov šíriacich sa v smere s sú D_e a D_0 . V týchto kryštáloch je rovnica elipsoidu indexu lomu zjednodušená na

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1, \quad (4.1-1)$$

os s určuje smer šírenia vlny v elipsoide indexu lomu pre kladný jednoosý kryštál. Index lomu $n_e(\theta)$ mimoriadneho lúča je rovný veľkosti úsečky \overline{OA} , Obr. 4.1-1 a riadneho $n_0(\theta)$ udáva veľkosť úsečky \overline{OB} . Mimoriadny index lomu svetelného zväzku, šíriaceho sa rovnobežne na elektrické pole je daný

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2\theta}{n_0^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_e^2}. \quad (4.1-2)$$



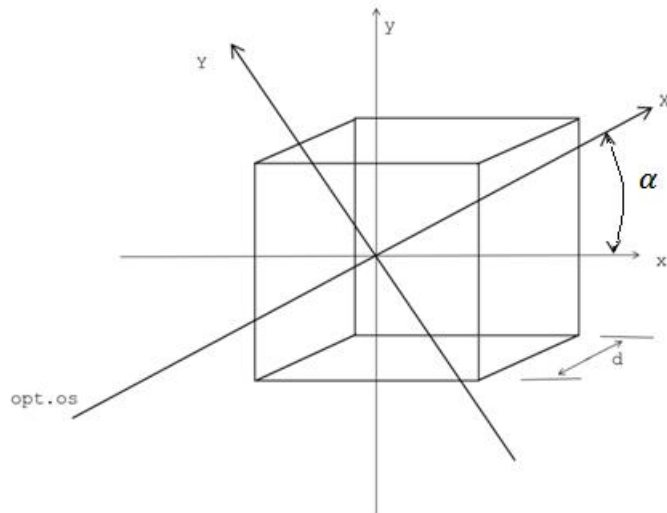
Obr.4.1-2: Priesečník roviny yz s normálou plochy v kladnom jednoosovom kryštáli [13].

Ak je priložené elektrické pole pozdĺž osi jednoosého kryštálu, ostáva kryštál jednoosí a jeho hlavné osi sa nezmenia. Priesečník yz roviny s normálovými plochami pre kladný jednoosí kryštál ($n_e > n_0$) je na Obr. 4.1-2.

Fázová rýchlosť pre riadnu vlnu je vždy c/n_0 , bez ohľadu na smer šírenia. Vektor elektrického poľa \vec{E} mimoriadnej vlny nie je kolmý na smer šírenia. Leží v rovine tvorenej vektorom šírenia a posunutým vektorom. Smery polarizácie normálových módov ostávajú rovnaké, ale prislúchajúce indexy lomu sú funkciami \vec{E} . Vektory elektrického poľa týchto dvoch vln sú navzájom ortogonálne[13]. Toto prostredie je možné využiť ako fázový modulátor, fázovú doštičku alebo intenzitný modulátor.

4.2. Fázové doštičky

Fázové doštičky sú planoparalelné doštičky vyrábané z jednoosého anizotropného materiálu, najčastejšie kryštálu. Sú vyrobené tak, že optická os kryštálu leží v rovine doštičky a zvierá s osou x uhol α . Slúžia k úprave stavu polarizovaného svetla. Po prechode fázovými doštičkami dochádza k fázovému rozdielu medzi polarizačnými zložkami šíriacimi sa pozdĺž os X a Y . Svetelný lúč sa v nich rozdelí na dva navzájom kolmo polarizované lúče, riadny a mimoriadny.



Obr. 4.2-1: Znáozornenie osi vo fázovej doštičke.

Rozlišujú sa tieto typy:

1. *Polvlnná fázová doštička* ($\lambda/2$ vlnová doštička). Platí pre ňu:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_e - n_o)d}{\lambda} \rightarrow d = \frac{\lambda}{2(n_e - n_o)}, \quad (4.2-1)$$

kde, λ je vlnová dĺžka, n_e a n_o sú indexy mimoriadnej a riadnej vlny a d je hrúbka doštičky, v ktorej smere sa šíri vstupná vlna. Lineárne polarizovaná vlna ostáva po prechode lineárne polarizovaná, ale jej kmitosmer je otočený o 2α . Kruhovo polarizovaná vlna ostáva po prechode rovnaká, mení sa len jej smer šírenia z pravotočivej na ľavotočivú a naopak.

2. *Štvrtvlnná fázová doštička* ($\lambda/4$ vlnová doštička). Platí pre ňu:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_e - n_o)d}{\lambda} \rightarrow d = \frac{\lambda}{4(n_e - n_o)}, \quad (4.2-2)$$

Transformuje svetlo lineárne polarizované na elipticky polarizované a naopak. Pre nastavenie $\alpha = \pm \frac{\pi}{4}$ na kruhovú polarizáciu je smer šírenia je pravotočivý, alebo ľavotočivý[10].

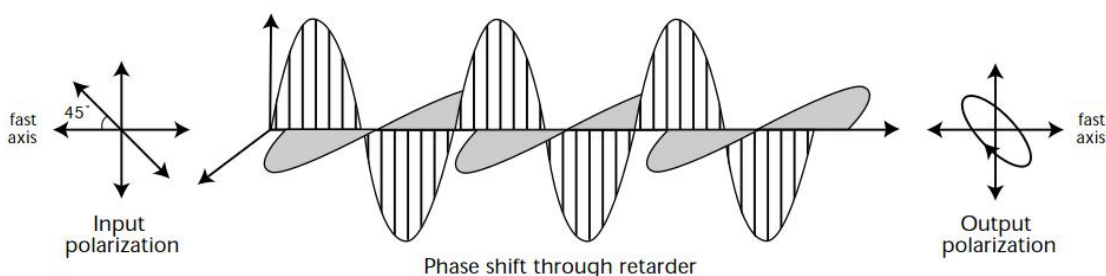
3. *Premenná fázová doštička*, jej funkcia spočíva v tom, že na základe vonkajšieho pôsobenia, napr. elektrického poľa sa mení indikatrix anizotropného materiálu. Môžu sa

meniť iba veľkosti os, čiže indexy lomu, ale taktiež orientácia elipsoidu indexu lomu. Taktiež sa môže sa meniť materiál z izotropného na anizotropný. Vďaka tomuto efektu je možné vytvárať premennú fázovú doštičku, ktorej retardanciu je možné riadiť vonkajším elektrickým poľom.

Výsledná svetelná vlna má rôzny polarizačný stav. Vyrába sa zvyčajne z jednoosého dvojlomného materiálu. Z definície $n_e > n_o$, ktorá platí pre kladný jednoosí kryštál. Svetlo prechádzajúce cez fázovú doštičku má rýchlosť v , závislej na jej polarizačnom stave danom

$$v = \frac{c}{n}, \quad (4.2-3)$$

kde c je rýchlosť svetla vo vákuu a n je index lomu rovnobežný a smer polarizácie. Pre kladný jednoosí materiál mimoriadna os, s indexom lomu n_e , nazývaná aj pomalá os, potom riadna os, s indexom lomu n_o sa nazýva ako rýchla os. Svetlo polarizované rovnobežne s rýchlou osou prechádza vyššou rýchlosťou ako svetlo rovnobežné s ortogonálnou pomalou osou.



Obr. 4.2-3: Nastavenie vstupného lúča k rýchlej osi fázovej doštičky [23].

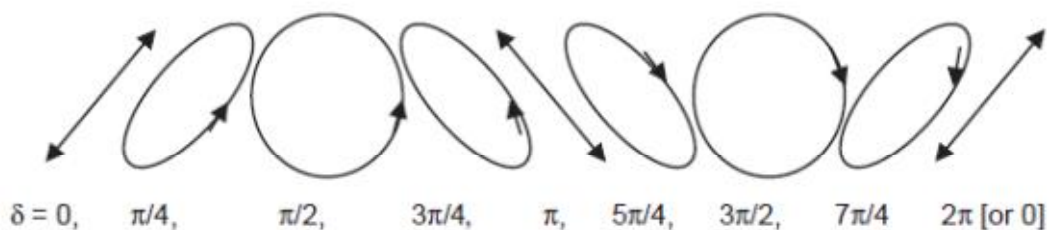
Vstupná svetelná vlna je lineárne polarizovaná a natočená o 45° voči rýchlej osi, potom na výstupe vznikne vlna s pravotočivou eliptickou polarizáciou. Ortogonálne polarizované zložky prechádzajú materiálom s rozdielnymi rýchlosťami a sú fázovo posunuté ku každému vytvárajúcemu polarizačnému stavu. Fázový posun je potom daný

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_e - n_o)d}{\lambda}, \quad (4.2-4)$$

potom d je hrúbka dvojlomného materiálu v [nm], λ vlnová dĺžka prechádzajúceho svetla a $(n_e - n_o)$ rozdiel indexov lomu mimoriadnej a riadnej vlny.

Dvojlom je spoločný pre anizotropné materiály, či už pevných elektro-optických alebo tekutých kryštáloch. Modulátor z tekutého kryštálu má funkciu premennej fázovej doštičky. Fázový posun sa v nej mení napájaním slabým napätím. Rozdielne materiály použité na výrobu tekutých kryštálov majú odlišné hodnoty rozdiely indexov lomu mimoriadnej a riadnej vlny.

Svetlo prechádzajúce cez fázové doštičky získa rôzne polarizačné stavy v závislosti na fázovom posuve. Pre $\frac{\pi}{2}$ lebo $-\frac{\pi}{2}$ to je štvrt'vlný fázový posun, stav polarizácie sa mení na kruhovo polarizované svetlo. Pre fázový posun π alebo $-\pi$ je svetlo opäť lineárne polarizované, ale pozdĺž smeru, ktorý je o 90° otočený k smeru lineárnej polarizácie. Pre iné hodnoty fázového posunu nadobúda svetlo eliptickú polarizáciu.



Obr.4.2-2: Polarizačný stav pre jednotlivé hodnoty fázového posunu [17].

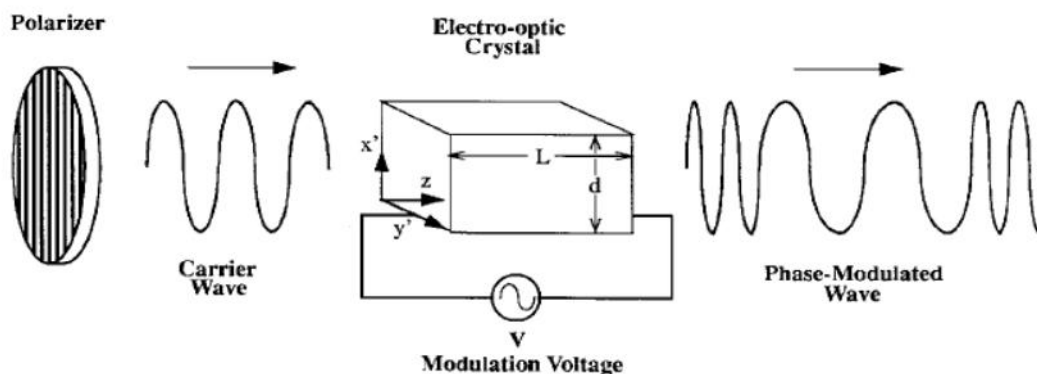
5. Elektrooptická modulácia

Elektrooptický modulátor je zariadenie fungujúce na princípe elektricky indukovanej zmeny v indexe lomu. V závislosti od konfigurácie zariadení, môžu byť vlastnosti svetelnej vlny modulované zmenou: fázy, polarizácie, amplitúdy, frekvencie, alebo smeru šírenia. Zariadenie je vždy konštruované pre optimálny výkon pre určenú vlnovú dĺžku.

Modulátor z nematických tekutých kryštálov, ktorý je použitý v experimentálnej časti slúži ako premenná fázová doštička. Pôsobením elektrického napätia medzi elektródami s hodnotou od niekoľko voltov na tekutý kryštál LC modulátoru dochádza k tomu, že molekuly tekutých kryštálov a ich optické osi sa začínajú orientovať v smere pôsobenia elektrického poľa. Tým dochádza aj k zmene polarizácie svetelnej vlny po prechode modulátoru. Po prechode svetla cez takéto anizotropné prostredie, ktoré sa v použitom modulátore z nematických kryštálov nachádza, sú zložky vektoru elektrickej intenzity rozložené v príslušných rovinách, kde sa šíria rôznou fázovou rýchlosťou. Na základe zistenia polarizačného stavu je možné zistiť hodnotu fázového posunu. Jedny z možných spôsobov modulácie, ktoré sa využívajú sú fázová a amplitúdová modulácia[20].

5.1. Fázová modulácia svetla

Fázový modulátor je jedným z najjednoduchších elektro-optických modulátorov. Pri fázovej modulácii dochádza k zmene fázy modulovanej vlny. Amplitúda modulovanej svetelnej vlny ostáva nezmenená. Modulácia nastáva pri zmenách napätia v kryštáli, cez ktorý prechádza svetlo [9]. Fázová modulácia v elektro-optických kryštáloch a tekutých kryštáloch funguje analogicky na podobnom princípe, viac kapitola 5.3 . Pri prechode svetla modulátorom z nematických tekutých kryštálov, ktorý má dĺžku L je medzi jeho koncami pomocou elektród priložené elektrické pole E . Aby došlo k fázovej modulácii, musí byť vstupný polarizátor natočený rovnobežne voči jednej z hlavných osí. Elektródy medzi koncami kryštálu slúžia na privedenie napätia.



Obr.5.1.-1: Fázová modulácia svetla pomocou elektro-optického kryštálu [18].

Po prechode kryštálu dochádza k fázovému posunu

$$\varphi = n(E)k_0L = 2\pi n(E)L/\lambda_0, \quad (5.1-1)$$

kde λ_0 je vlnová dĺžka vo vákuu.

$$\text{a } \varphi_0 = 2\pi nL/\lambda_0.$$

Elektrické napätie V je medzi stenami kryštálu a ich vzdialenosť je d , potom vlna po prejdení vzdialenosti L získava fázový posuv

$$\varphi = \varphi_0 - \pi \frac{V}{V_\pi}. \quad (5.1-2)$$

Parameter V_π sa nazýva pólvlňové napätie, pri ňom je hodnota fázového posunu π . Je závislý na vlastnostiach materiálu n a τ , na vlnovej dĺžke a na d/L ,

$$V_\pi = \frac{d}{L} \frac{\lambda_0}{\tau n^3}. \quad (5.1-3)$$

Modulátory zvyčajne pracujú na frekvenciách niekoľko sto MHz, ale je možné dosahovať aj modulačných rýchlostí niekoľko GHz. Riadny a mimoriadny index lomu majú parametre n_o a n_e . Kryštál s hrúbkou spôsobí fázový posun [11]

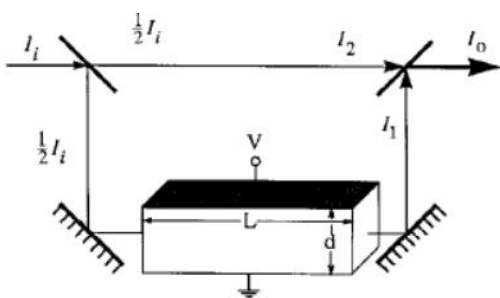
$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o + \Delta n_e)L = \varphi_o + \Delta\varphi_e, \quad (5.1-4)$$

kde φ_o a $\Delta\varphi_e$ sú fázové posuny pre riadnu a mimoriadnu vlnu. Iný spôsob ako je možné využiť fázovú moduláciu je pôsobenie elektrického poľa pozdĺž jednej z hlavných osí [18].

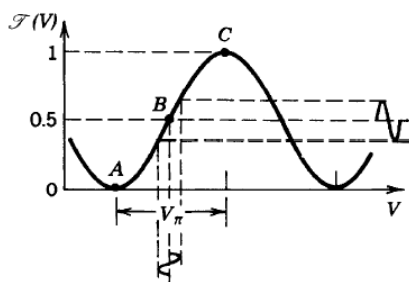
5.2. Amplitúdová modulácia

Pri amplitúdovej modulácii je amplitúda modulovaného svetelného signálu časovo závislá. Amplitúda vstupného signálu, veľkosť napätia, je priamo vyjadrená ako intenzita svetla. Preto je často označovaná ako intenzitná modulácia. Amplitúdová modulácia má dve základné nevýhody. Predovšetkým značná nelinearita optických súčiastok, pri ktorej dochádza pri prijíme k deformácii detekovaného signálu. Druhý problém súvisí s útlmom signálu vznikajúcim pri prenose, dochádza k zníženiu intenzity prijímaného signálu a tým aj k jeho degradácii. Fázový modulátor môže byť použitý ako amplitúdový modulátor vložení do jedného ramena Mach-Zehnderovho interferometra.

Intenzitu optickej energie svetelnej vlny je možné modulovať viacerými spôsobmi zapojenia, a to napríklad modulátor medzi dvoma skríženým polarizátormi, alebo konfigurácia fázový modulátor v jednej vetve Mach-Zehnderovho interferometra. Tento posledne spomenutý typ zapojenia bude použitý v experimentálnej časti. Svetelný lúč rozdelí na dva medzi ktorými dochádza k fázovému posunu, dôjde k interferencií konštruktívnej a deštruktívnej a na výstupe vznikajú interferenčné pružky. Táto konfigurácia vyžaduje nižšie riadiace napätie a umožňuje kratší čas prepínania svetla pre určený stupeň modulácie[14].



Obr. 5.2-2: Pozdĺžny modulátor vo vetve Mach-Zehnderovho interferometra [9].

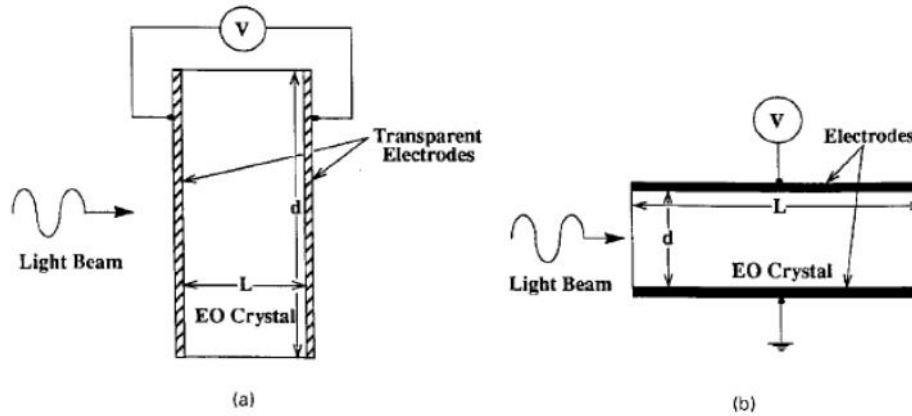


Obr. 5.2-3: Graf periodického striedania priepustnosti na priloženom napätí [9].

Na obrázku Obr.5.2-2 je fázový modulátor umiestnený v jednej vetve Mach-Zehnderovho interferometra, ktorý môže pracovať ako intenzitný modulátor. Pri prechode svetelnej vlny v tejto konfigurácii dochádza k periodickému striedaniu intenzity, platí pre prípad ak je modulačný signál periodický. V obmedzenej oblasti okolo pracovného bodu B funguje toto zariadenie ako lineárny intenzitný modulátor. Pri prepínaní medzi bodmi A a C pracuje ako optický spínač [9].

5.3. Elektro-optické vlastnosti nematických tekutých kryštálov

Dôležitým objavom bol vplyv elektrického poľa na molekulovú orientáciu tekutých kryštálov (LC). Fázové LC modulátory sú zvyčajne používané ako elektricky laditeľné fázové doštičky [19]. Po vstupe svetelnej vlny na fázovú doštičku dôjde k rozdeleniu lineárne polarizovaného svetla na dva komponenty pozdĺž týchto osí. V závislosti rozdielneho indexu lomu súvisiacimi s rýchlymi a pomalými osami, budú tieto zložky vnímané ako odlišné fázové posuvy. Tekuté kryštály, ktoré sa používajú na výrobu elektro-optických prvkov majú obvykle dostatočne veľký elektrický odpor, aby mohli byť používané ako ideálne dielektriká [21]. Usporiadanie podlhovastých molekúl sa prejavuje v anizotropii dielektrických vlastností s jednoosou symetriou. Ak na molekuly pôsobí statické alebo nízkofrekvenčné elektrické pole, indukujú sa elektrické dipóly a výsledné elektrické sily vychylujú molekuly takým smerom, aby na ne pôsobila minimálna voľná elektrostatická energia. Rovnaký účinok má aj použitie striedavého elektrického poľa [9].



Obr.5.3-1: Pozdĺžny a priečný modulátor z LC kryštálov sa líšia spôsobom umiestnenia napájacích elektród [19]. Pozdĺžny modulátor Obr. 5.3-1 (b) sa využíva len v spojení s elektro-optickými kryštálmi.

Modulátor z tekutých kryštálov s dĺžkou L a šírkou d zapríčiní fázový posun

$$\Gamma = \frac{2\pi(n_e - n_o)L}{\lambda_0}, \quad (5.3-1)$$

kde n_o , n_e sú riadny a mimoriadny index lomu, $(n_e - n_o)$ sa označuje ako retardancia, L je dĺžka modulátora a λ je vlnová dĺžka prechádzajúceho svetla [9].

Rovnovážny uhol vyklonenia θ je pre väčšinu molekúl monotónne rastúca funkcia napätia U , potom je jeho hodnota

$$\theta = \begin{cases} 0 \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left[\exp \left(-\frac{V - V_c}{V_0} \right) \right], \end{cases} \quad \begin{matrix} V \leq V_c \\ V > V_c \end{matrix} \quad (5.3-2)$$

kde V je stredná kvadratická hodnota priloženého napätia, V_c je kritické napätie, pri ktorom začína vychýlenie molekúl a V_0 je konštanta.

Molekuly, ktoré sú vychýlené o uhol θ . Normálové módy vlny šíriacej sa v smere osi z , polarizované v smeroch x a y a majú indexy lomu $n(\theta)$ a n_o ,

$$\frac{1}{n^2(\theta)} = \frac{\cos^2\theta}{n_e^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_o^2} \quad (5.3-3)$$

Vlna, ktorá sa šíri pozdĺž optickej osi z a je lineárne polarizovaná rovnobežne v smere osi x je fázový posun rovný

$$\varphi = \frac{2\pi n(\theta)L}{\lambda_0}. \quad (5.3-4)$$

Vlny, ktoré majú vektor polarizácie zvierajúci uhol 45° s osou x v rovine $x - y$, potom funguje tento modulátor ako riadená fázová doštička.

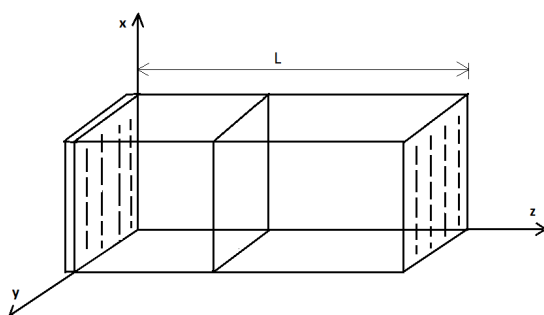
Maximálny fázový posun nastane pre

$$\Gamma_{max.} = \frac{2\pi[n_e - n_o]L}{\lambda}, \quad (5.3-5)$$

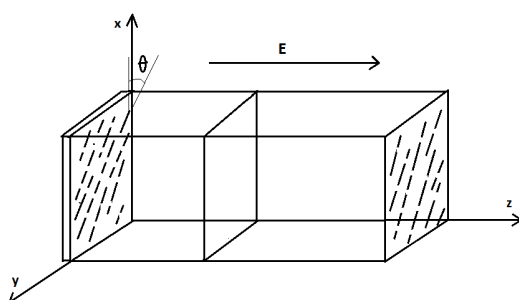
6. Princíp funkcie modulátora z nematických tekutých kryštálov

V experimente použitý modulátor (LCVR- Liquid Crystal Variable Retarder) využíva celu naplnenú nematickými tekutými kryštálmi a plní funkciu premennej fázovej doštičky. Tenká vrstva roztoku nematického tekutého kryštálu je vložená medzi dve rovnobežné sklenené doštičky. Obidve paralelné steny cely sú potiahnuté priesvitnou vodivou fóliou, ktorá slúži ako napájacie elektródy.

Takáto cela pôsobí ako jednoosý kryštál s optickou osou rovnobežnou s osami molekúl. Vlny šíriace sa v smere kolmom na sklenené doštičky majú módy lineárne polarizované v rovnobežnom smere a kolmo na smer molekúl. Orientácia molekúl tekutých kryštálov bez napájania je taká, že sú molekuly usporiadané vo vrstvách.



Obr. 6-1: Modulátor je v pokoji, molekuly LC kryštálu sú usporiadané rovnobežne vo vrstvách.



Obr. 6-2: Vyklonený stav molekúl v elektrickom poli, molekuly sa orientujú v smere pôsobenia elektrického poľa.

Neprítomnosť pohyblivých mechanických častí umožňuje rýchle časy odozvy, radovo v milisekundách. Povrchy sú upravené antireflexnými vrstvami pre použitie v troch rôznych intervaloch vlnových dĺžok a to: 350 - 700 nm, 650 - 1050 nm, alebo 1050 - 1620 nm. Vďaka tomu premenné modulátory z tekutých kryštálov poskytujú nízke svetelné straty.

6.1. Napájanie modulátora z nematických tekutých kryštálov

Nematické LC modulátory musia byť napájané striedavým napätím, aby sa zabránilo kumulácií energie a ich znehodnoteniu. Pri použití striedavého napätia molekuly zmenia orientáciu zo svojej východiskovej, ktorá je závislá od veľkosti efektívnej hodnoty napájaného napätia. Fázový posun lineárne polarizovaného svetla je preto možné ovládať zmenou použitého napätia.

Riadiace napätie musí mať obdĺžnikový priebeh s frekvenciou desiatok Hz až niekoľko kHz a amplitúdou, ktorá môže nadobúdať hodnoty efektívneho napätia od 0 do 25 V_{rms} . Na zdroji Obr. 7.4.1-2 sa nastavujú dve hodnoty napätia V_1 a V_2 . Ak regulátor pracuje v modulačnom režime, bude mať výstup 2 kHz. Elektromechanické javy pri nižších frekvenciách narúšajú molekulárne usporiadanie a znižujú životnosť modulátora. Pri frekvenciách väčších ako 100 Hz rastie spotreba energie následkom rastúcej vodivosti. Typické hodnoty kritického napätia sú niekoľko voltov. Obdĺžnikový priebeh je modulovaný amplitúdou medzi dvoma nastaveniami napätia s modulačným kmitočtom, ktorý musí byť v rozmedzí 0,5 až 150 Hz. Modulovaný režim môže byť použitý pre meranie času odozvy LC modulátora[17].

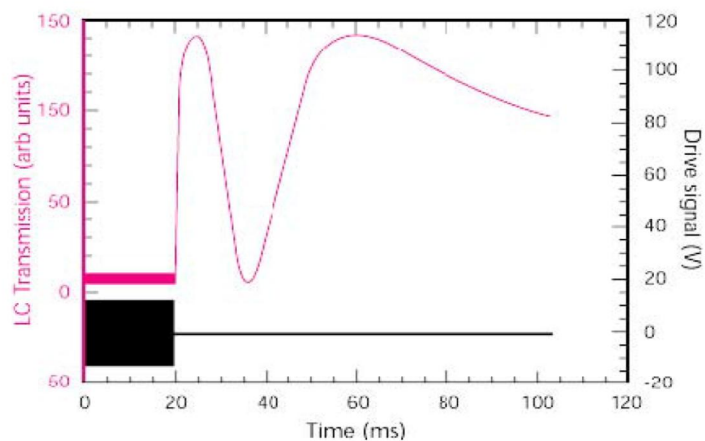
6.2. Časová odozva v tekutých kryštáloch

Čas odozvy tekutých kryštálov závisí na viacerých faktoroch, a to hrúbky vrstvy LC kryštálov, viskozity, teploty a povrchovej úpravy, ako aj prechádzajúcej formy vlny. Doba odozvy je taktiež citlivá aj na zmenu smeru fázového posunu.

Všeobecne platí, že doba odozvy modulátorov z tekutých kryštálov je oveľa

rýchlejšia pri použití vyššej hodnoty napätia . Ak je elektrické pole zoslabené, alebo vypnuté, interakcie medzi molekulami LC zabezpečujú dominantné vratné sily. Interaktívne sily sú oveľa slabšie, než je krútiaci moment v dôsledku vonkajšieho elektrického poľa, čo vedie k pomalšej relaxačnej dobe.

Relaxačná doba molekúl dominuje celú dobu odozvy modulátorov z nematických tekutých kryštálov. Molekuly nachádzajúce sa v blízkosti povrchu reagujú najväčšou silou a majú najrýchlejšiu časovú odozvu. Taktiež vyžadujú najvyššie napätie na moduláciu. Obr. 7.1-1 ukazuje priepustnosť modulátora umiestneného medzi skrížený polarizátor s pozdĺžnymi osami molekúl otočenými o 45° voči osám polarizátoru. K minimálnej priepustnosti dochádza pri prechode celých vlnových bodov a maximálnej ak je fázový posun pólvlňých bodov.



Obr. 6.2-1: Graf závislosti priepustnosti na napätí a času odozvy[17].

Použitie elektrické pole asi $15 V_{rms}$ je pre prípad experimentu dostatočné na riadenie fázového posunu od nulovej hodnoty k $2,25\lambda$. Potom, čo je pole vypnuté, zmena fázového posunu približne 5 ms, to je čas na dosiahnutie prvého maxima. Čas potrebný na dosiahnutie maxima druhej pólvlňy je 10 ms. Molekuly v blízkosti povrchu spínajú rýchlejšie viac ako päťkrát ako molekuly v strede tejto konkrétnej bunky.

7. Experimentálna časť

Úvod:

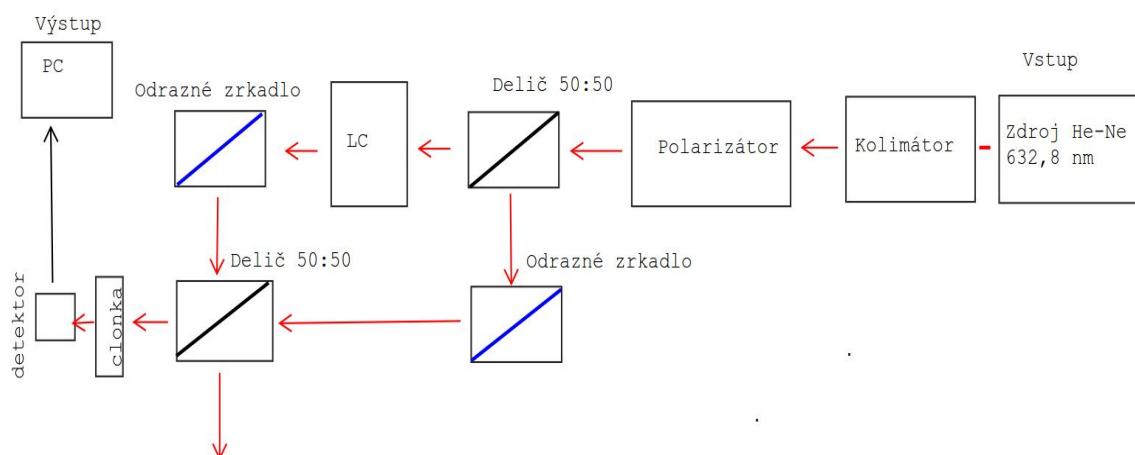
Táto časť práce sa zaoberá experimentálnym overením závislosti fázového posunu na priloženom napätí po prechode svetla cez modulátor z nematických tekutých kryštálov dvomi metódami a následne ich porovnaním. V prvej interferometrickej metóde bol vložený modulátor do jedného ramena Mach-Zehnderovho interferometra a výsledný interferenčný obrazec snímaný meračom výkonu svetelného zväzku. V druhej metóde bol polarizačný stav svetla zaznamenávaný pomocou polarimetra Thorlabs PAX 5700 a pomocou softwaru na prepočet Stokesových parametrov vypočítaná hodnota fázového posunu.

7.1. Závislosť fázového posunu na priloženom napätí

7.1.1. Interferometrická metóda

Modulátor z nematických kryštálov bol vložený do jedného ramena Mach-Zehnderovho interferometra. Ten pozostáva z dvoch úplne odrazných zrkadiel a dvoch deličov svetelných zväzkov 50:50.

Ako svetelný zdroj bol použitý 632,8 nm He-Ne laser, ktorého výstupný lúč bol objektívom kolimovaný, následne pomocou polarizátora lineárne polarizovaný a nastavený rovnobežne s rýchlou osou modulátora.



Obr. 7.1.1-1: Schéma zapojenia pri interferometrickej metóde.

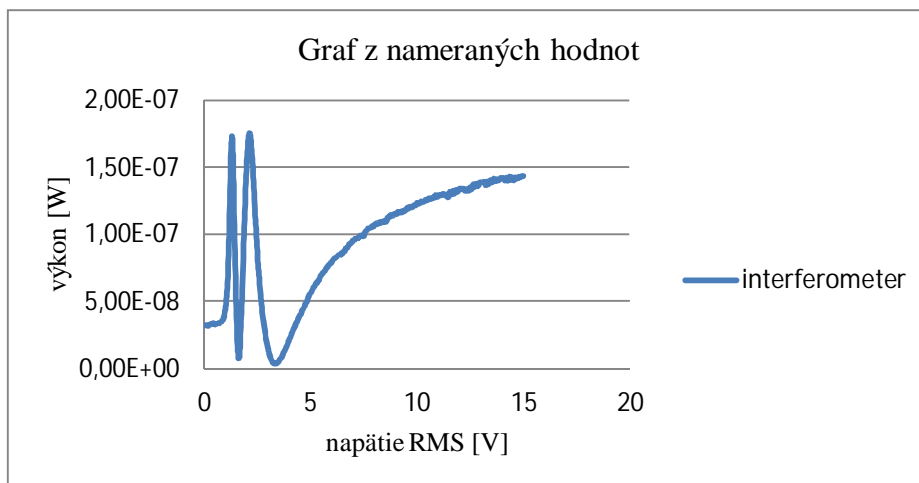
Po justácii setupu podľa schémy na Obr. 7.1.1-1 vznikol po prechode interferometra interferenčný obrazec s dostatočne kontrastnými minimami a maximami. Z neho bol vybratý pomocou clonky dostatočne hrubý interferenčný prúžok. Veľkosť clonky ovplyvnila množstvo svetla dopadajúceho na detektor meraču výkonu svetelného zväzku. Menšia clonka obmedzila množstvo svetla dopadajúceho na detektor.

Napájanie modulátoru bolo pomocou zdroja na riadenie LC modulátora Obr. 7.1.1-2 na hodnoty $\sim 0-15 V_{\text{rms}}$ - Obr. 7.1.1-2 so striedavým napätím 2 kHz a obdĺžnikovým priebehom. Riadená kontrola napätia s krokom $0,05 V_{\text{rms}}$ a časom medzi jednotlivými krokmi 0,5 ms. Získavanie dát z merača výkonu svetelného zväzku riadil software v počítači, ktorý následne ukladal namerané hodnoty napätia a intenzity. Výsledná intenzita a z nej získaný fázový posun je daný rovnicou $I_0 = I_1 + I_2 = \frac{1}{2}I_i + \frac{1}{2}I_i \cos \Gamma_0 = I_i \cos^2 \frac{\Gamma_0}{2}$.



Obr. 7.1.1-2: Zdroj, ktorým bol napájaný modulátor z nematických kryštálov [17].

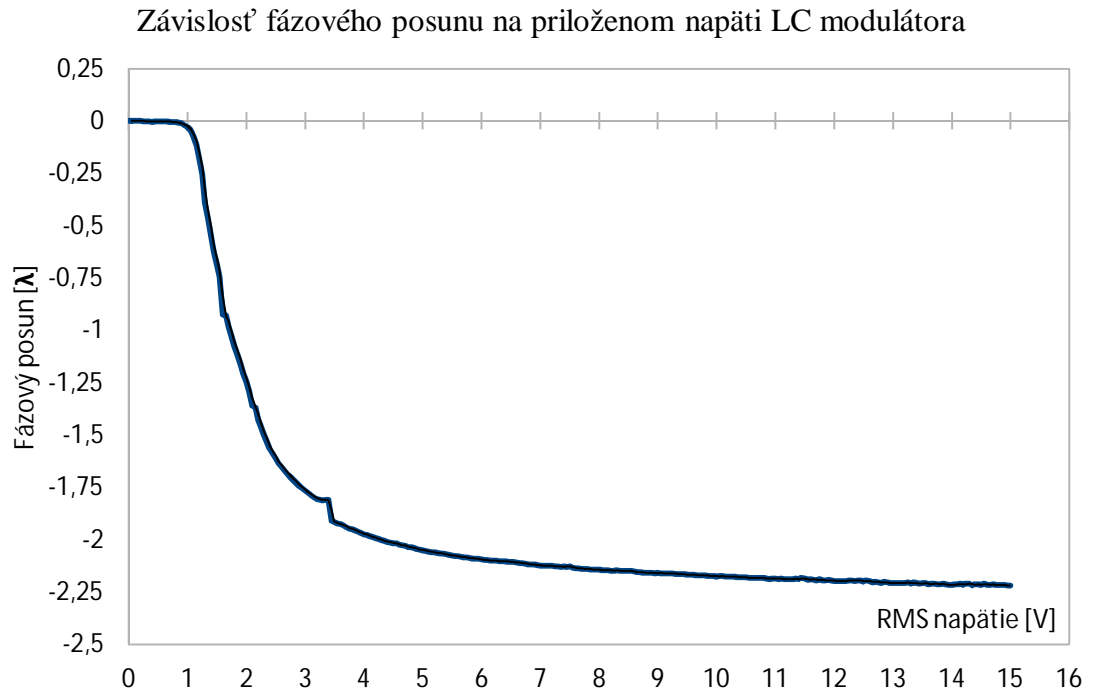
Získané výstupné dáta z počítača obsahovali hodnoty fázového posunu. Pre výsledný graf závislosti fázového posunu na priloženom napätí bolo potrebné získané dáta prepočítať (viz. príloha tabuľky na CD) a jednotlivé úseky navzájom naviazať ručne.



Obr. 7.1.1-3: Graf z nameraných dát pre interferometrickú metódu.

Vplyv na presnosť nameraných výsledkov zohrával snímaný kontrast interferenčného obrazca, ktorý sa menil v čase. Možnou príčinou vzniku interferenčného obrazca s nižším kontrastom bola zapríčinená odchýlkami pri justáži. Šum z napájacieho zdroja má dopad na zmenu intenzity optického signálu a tiež citlivosť detektora. Táto meracia metóda je náročná na zabezpečenie stabilných podmienok v laboratóriu, pretože interferometer je zariadenie veľmi citlivé.

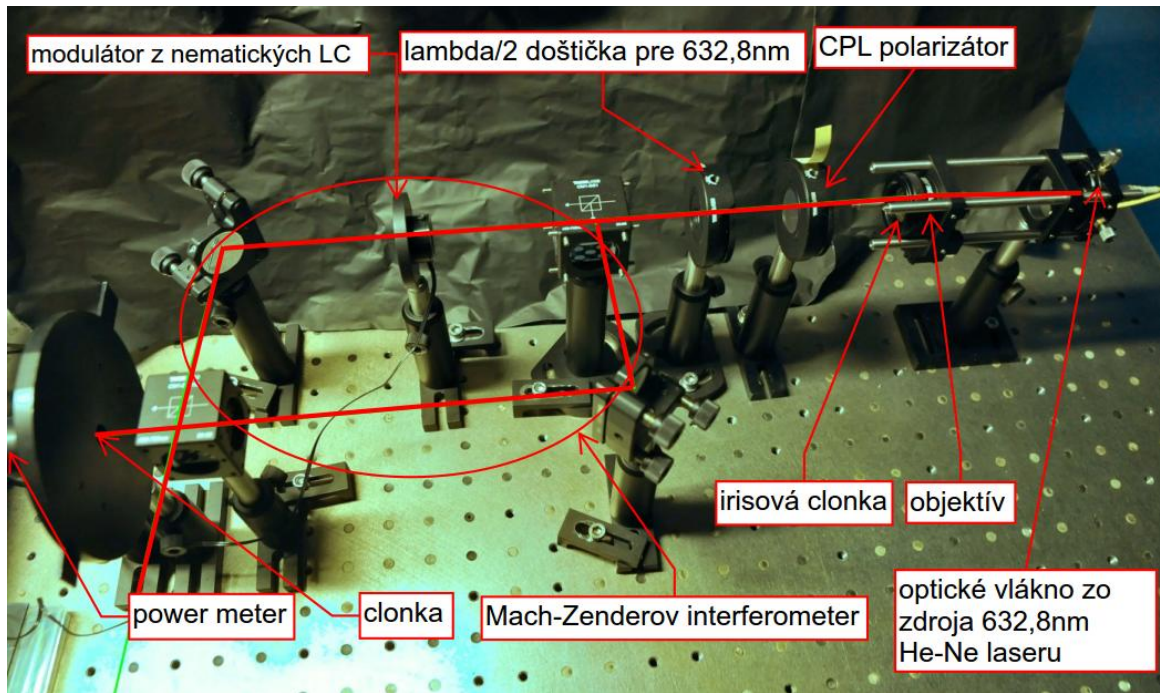
Bolo potrebné minimalizovať vonkajšie vplyvy, najväčší význam zohrávalo zabezpečenie stálej teploty, prúdenia vzduchu a zamedzenie prístupu okolitého parazitného svetla na detektor merača výkonu svetelného zväzku, pretože časová odozva tekutých kryštálov je náchylná aj na teplotné výkyvy.



Obr. 7.1.1-4: Graf závislosti fázového posunu na priloženom napätí.

Zostrojený graf obr. 7.4.1-4 vznikol použitím hodnôt meniaceho sa napätia od 0-15 V_{rms} a intenzity meniaceho sa interferenčného obrazca, z ktorej bol určený fázový posun. Pri zmene napätia dochádzalo k fázovému posunu takmer $2,25 \lambda$.

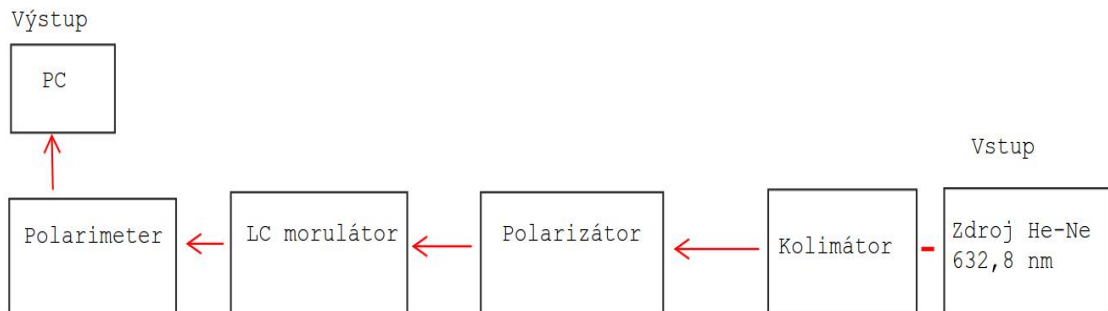
Od hodnoty napätia 0 po približne 1 V_{rms} nedochádzalo takmer k žiadnej zmene posunu. Od tejto hodnoty začala krivka prudko klesať až po hodnotu približne 3 V_{rms} , po ďalšom zvyšovaní sa hodnoty fázového posunu pozvoľna menili, od vyšších hodnôt ako 15 V_{rms} už nenastali takmer žiadne zmeny fázového posunu.



Obr.7.4.1-2: Foto experimentu zapojenia modulátora v jednej vetve Mach-Zehnderovho interferometra.

7.1.2. Polarimetrická metóda

Meranie bolo uskutočnené pomocou schémy zapojenia na Obr. 7.1.2-1.



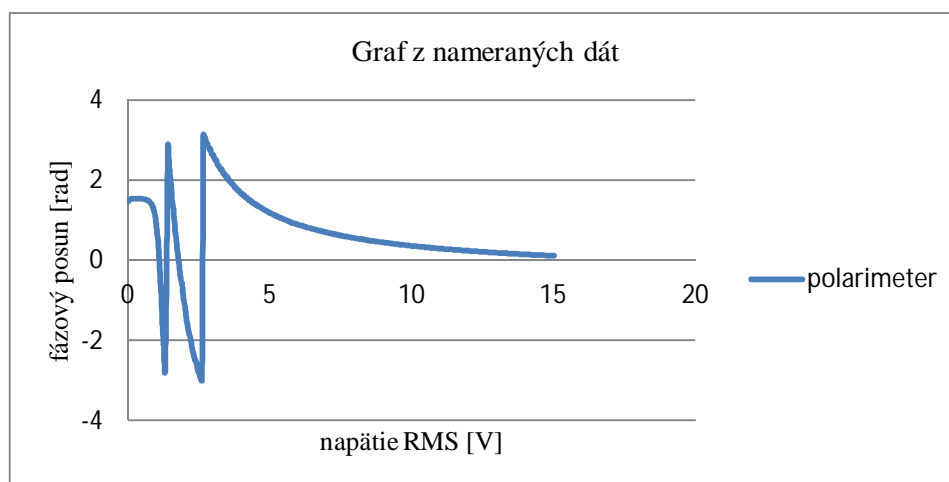
Obr. 7.1.2-1 Schéma zapojenia s polarimetrom.

Ako svetelný zdroj bol použitý He-Ne 632,8 nm laser. Prikladané napätie zo zdroja na riadenie LC modulátoru malo obdĺžnikový priebeh a hodnotu napätia $\sim 0-15_{\text{rms}}$ s krokom 0,01 V_{rms} a časom medzi jednotlivými hodnotami napätia 5 ms. Výstupný lúč bol kolimovaný objektívom a pomocou polarizátora bola nastavená lineárna polarizácia svetelného zväzku, ktorý bol otočený o 45° vzhľadom k rýchlej osi

modulátoru. Detekcia polarizačného stavu vlny prechádzajúcej modulátorom bola pomocou polarimetra Thorlabs PAX 5700. Polarizačný stav bol určený pomocou softwaru na prepočet Stokesových parametrov, ktorý je súčasťou polarimetra.

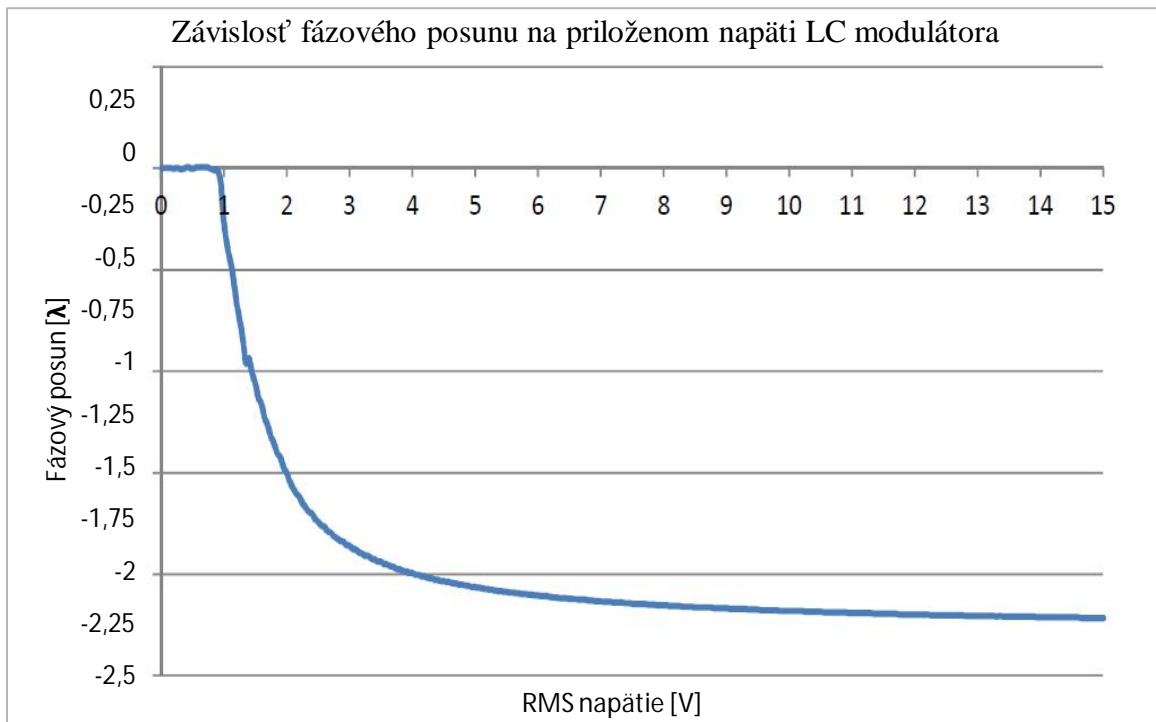
Pri meniacom sa napätí dochádzalo k zmenám polarizačného stavu a menila sa poloha bodu na Poincarého sfére. Získané výstupné dáta z polarimetra obsahovali hodnoty fázového posunu.

Pre výsledný graf závislosti fázového posunu na priloženom napätí bolo potrebné získané dáta prepočítať (viz. príloha tabuľky na CD) a jednotlivé úseky naviazať na seba ručne.

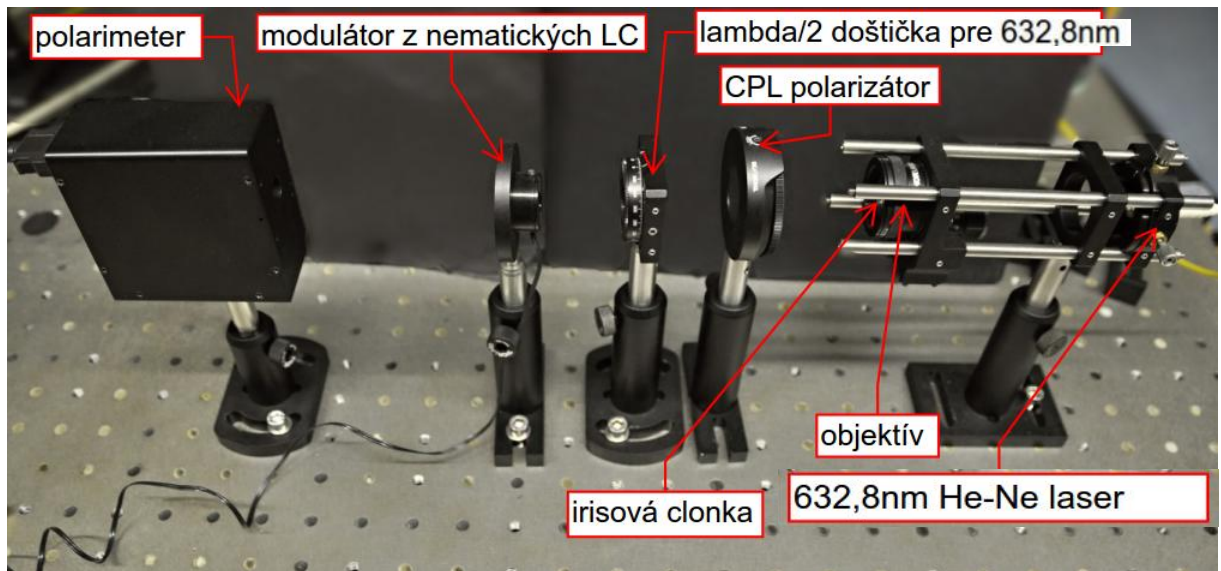


Obr. 7.1.2-2: Graf z nameraných dát pre polarimetrickú metódu.

Z vyhodnotených dát vznikol graf závislosti fázového posunu na priloženom napätí, Obr. 7.1.2-3. Boli použité namerané dáta meniaceho sa fázového posunu, ktorý vypočítal software k polarimetru a počítačom riadená zmena hodnôt napätia. Od hodnoty napätia 0 po približne $1 V_{\text{rms}}$ nedochádzalo takmer k žiadnej zmene posunu. Od tejto hodnoty začala krivka prudko klesať až po hodnotu približne $3 V_{\text{rms}}$, po ďalšom zvyšovaní sa hodnoty fázového posunu pozvoľna menili, od vyšších hodnôt ako $15 V_{\text{rms}}$ už nenastali takmer žiadne zmeny. Montáž a justáž experimentu polarimetra je pomerne jednoduchá a menej náchylná na podmienky prostredia, stabilita celého systému je stálejšia.



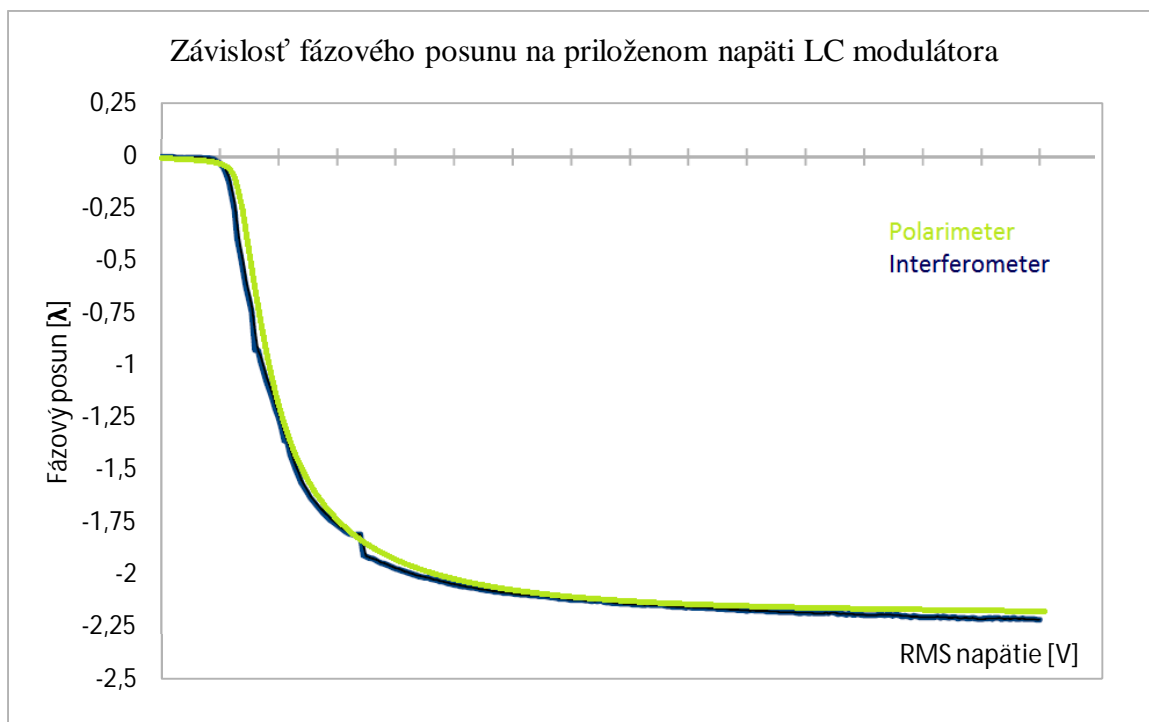
Obr. 7.1.2-3: Graf závislosti fázového posunu na priloženom napätí.



Obr. 7.1.2-1: Foto zapojenia s polarimetrom.

7.2. Porovnanie

Porovnaním výsledných grafov závislosti fázového posunu na priloženom napätí Obr. 7.1.1-4 v prípade metódy interferometrickej a polarimetrickej Obr. 7.1.2-3 je možné vidieť, že grafy majú v určitých hodnotách malé vzájomné odchýlky Obr. 7.2-1.



Obr. 7.2-1: Porovnanie grafov pri polarimetrickej a interferometrickej metóde.

Priebeh z grafu Obr.7.2-1: ukazuje, že pre hodnotu napätia približne do $1 V_{\text{rms}}$ sa fázový posun nemení, potom začína krivka exponenciálne klesať a s narastajúcou hodnotou napätia sa približuje k hodnote $2,25 \lambda$.

Každá použitá meracia metóda je založená na inom princípe. Interferometrická metóda využíva intenzitnú moduláciu amplitúdy, polarimetrická moduláciu fázy. Interferometer je zariadenie citlivé na teplotné výkyvy, prúdenie vzduchu, kvality svetelného zdroja a mnoho ďalších faktoroch.

Meranie prebiehalo v laboratórnych podmienkach, ale aj napriek tomu dochádzalo k miernemu prúdeniu vzduchu, čo malo značný vplyv na stabilitu interferenčného obrazca. Ako svetelný zdroj bol použitý 632,8nm He-Ne laser, z dôvodu väčšej koherenčnej dĺžky a lepšej stability interferenčného obrazca.

Merač intenzity výkonu svetelného zväzku zaznamenal intenzitu interferenčných prúžkov, kolísanie ich kontrastu zapríčiňovala stabilita setupu a kvalita svetla z He-Ne

laseru. Ďalší faktor ovplyvňujúci namerané výsledky bol vplyv šumu detektora powermetra, veľkosť clonky a parazitné svetlo z okolia.

Pri polarimetrickej metóde, bol fázový posun získaný z dát polarimetra, ktoré na základe prepočtu zo Stokesových parametrov vypočítali zmenu fázy v radiánoch. Manipulácia s polarimetrom je oproti interferometru v laboratórnych podmienkach jednoduchšia na justáž a obsluhu.

Polarimetrická metóda dávala presnejšie výsledky, krivka z grafu Obr.7.1.2-3 mala plynulejší priebeh, ktorý je možné považovať za referenčný a hodnovernejší oproti interferometru.

Záver

Táto práca mala oboznámiť čitateľa so základnými princípmi, typmi tekutých kryštálov, ich fungovaním a správaním sa v elektromagnetickom poli, amplitúdovou a fázovou moduláciou svetla po prechode modulátorom z nematických tekutých kryštálov.

Dvoma metódami bola overovaná závislosť fázového posunu na prikladanom napätí. Z nameraných hodnôt je zrejmé, že každá z použitých metód vyžaduje špeciálne podmienky merania, ktoré zabezpečia čo najpresnejšie výsledky.

Bolo overené, že fázový posun vzniknutý po prechode modulátora z nematických tekutých kryštálov súvisí s polarizačným stavom svetla.

Zoznam použitej literatúry:

- [1] D. Demus, J. W. Goodby, G. W. Gray, H.-W. Spiess, and V. Vill. Eds., "Handbook of Liquid Crystals." Wiley, New York, 1997.
- [2] MOORE W. J.: Fyzikální chemie. 4. vydanie, SNTL, Praha, (1979), ISBN 04-608-79
- [3] GENNES P. G., PROST J.: The Physics of Liquid Crystals. 2nd edition, Oxford University Press, (1995), ISBN 0198517858.
- [4] P.G. de Gennes, The Physics of Liquid Crystals, Clarendon, Oxford, 1974.
- [5] MIHÁLKA P.: Optoelektronika. Alfa, Bratislava, (1981), ISBN 63-114-81.
- [6] A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, Wiley, New York, 1991, chap. 18.
- [7] Chandrasekhar, S. (1992). *Liquid Crystals* (2nd ed.). Cambridge University Press. ISBN 0-521-41747-3.
- [8] P. Malý, Optika, Karolinum Praha, (1998), ISBN 978-80-246-1342-0.
- [9] Florian Flossmann, Ulrich T. Schwarz and Max Maier, Stokes parameters in the unfolding of an optical vortex through a birefringent crystal, 13 November 2006 / Vol. 14, No. 23 / OPTICS EXPRESS 11411
- [10] G.N. Ramachandran and S. Ramasehan, Crystal Optics, Handbuch der Physik V25, (1961) sect 1.
- [11] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics*, Pergamon Press, (1965) New York,.
- [12] Internetová stránka: Oddělení fyziky biomolekul, Fyzikální ústav UK, zdroj dostupný na: http://biomolecules.mff.cuni.cz/files/courses/Svetlo_v_anizotropnim_prostredi.pdf
- [13] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, Wiley, New York, 1984.
- [14] E. Hecht, *Optics*, 2nd ed., Addison-Wesley, Reading, MA, 1990.
- [15] J. Šesták, Z. Štrand, A. Tříška, *Speciální technologie a materiály*, Academia Praha, s. 317, (1993)
- [16] Khoo. *Liquid Crystals*. Second ed. N.p.: John Wiley & Sons, (2007), 124-50. Print. ISBN 978-0-471-75153
- [17] Internetový katalóg firmy Thorlabs, zdroj dostupný na: http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4182

- [18] Born, M.; Wolf, E. 1980. Principles of Optics. Oxford: Pergammon Press.
- [19] Bass, Michael, Jay M. Enoch, Van Stryland Eric W., David R. Williams, and William L. Wolfe. "13." *Handbook of Optics*. 2nd Ed. New York: McGraw-Hill, (1995). ISBN 0-07-047974-7 N. Pag. Print.
- [20] S. E. Gilman, T. G. Baur, D. J. Gallagher, and N. K. Shankar, "Properties of tunable nematic liquid-crystal retarders," Proc. SPIE 1166, 461–471 (1990).
- [21] M. Hareng, G. Assouline, and E. Leiba, "La birefringence electriquement controlee dans les cristaux liquides nematiques," Appl. Opt. 11, 2920–2925 (1972).
- [22] C . F . Buhner , D . Baird , and E . M . Conwell , "Optical Frequency Shifting by Electro-optic Effect," *Appl. Phys. Lett.* 1 (2) : 46 – 49 (1962).
- [23] Zdroj: http://fp.optics.arizona.edu/opti471B/Reading/Lab11/Meadowlark_Retarders_principles.pdf