

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

Katedra optiky



Elektrooptická manipulace s fotonickými kvantovými bity

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Martin Bielak

2017

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

Katedra optiky



**Elektrooptická manipulace
s fotonickými kvantovými bity**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval:

Studijní program:

Studijní obor:

Forma studia:

Vedoucí bakalářské práce:

Martin Bielak

B1701 Fyzika

Optika a optoelektronika

prezenční

RNDr. Miroslav Ježek, Ph.D.

FACULTY OF SCIENCE
PALACKÝ UNIVERSITY OLOMOUC

Department of Optics



Electro-optic control of photonic quantum bits

BACHELOR THESIS

Author:

Martin Bielak

Study program:

B1701 Physics

Field of study:

Optics and Optoelectronics

Form of study:

Full-time

Supervisor:

RNDr. Miroslav Ježek, Ph.D.

Abstrakt

Polarizační stupeň volnosti světla je hojně využívána v optických komunikacích, metrologii i v moderních metodách kvantového zpracování informace. Polarizační příprava a analýza jsou jejich nedílnou součástí. Standardní polarizační analýza využívá natáčení půlvlnných a čtvrtvlnných fázových destiček. Tekuté krystaly představují jednu z technologií, kterou je možné použít k urychlení polarizační analýzy, jako náhradu fázových destiček.

Tato práce se věnuje charakterizaci modulů z tekutých krystalů a jejich využití v polarizační přípravě a analýze. V práci je popsána výroba modulů z tekutých krystalů z displejů z tekutých krystalů a návrh jejich vhodné kombinace s fázovými destičkami pro využití v minimální i šesti stavové analýze polarizačního stavu. Řešena je i příprava polarizačních stavů H, V, D, A, R a L s jednou fyzickou konfigurací takového zařízení.

Výsledky, prezentované v této práci, ukazují možnosti využití komerčně dostupných displejů z tekutých krystalů v polarizační přípravě a analýze, v pokročilých kvantových experimentech, včetně využití zařízení z kapalných krystalů v kvantovém Fredkinově logickém hradle.

Klíčová slova

Polarizace, tekuté krystaly, modul z tekutých krystalů, zařízení z tekutých krystalů, segmentové displeje z tekutých krystalů, minimální analýza stavu, polarizační analýza, polarizační příprava.

Abstract

The polarization degree of freedom of light is frequently used in optical communication and metrology as well as in quantum information processing. Polarization preparation and analysis are their integral part. Standard polarization preparation uses rotating half wave plate and quarter wave plate. The liquid crystals represent one of the technologies which can be used to speed up polarization preparation and analysis.

This thesis deal with characterization of module made from liquid crystals and its application in polarization preparation and analysis. In this thesis, we discuss how to make the liquid crystal module from liquid crystal display and proposal of their appropriate combination with wave plates. Using this device in the minimal and six state analysis of polarization state with one physical configuration are discussed too. This device can be used for prepare polarization states H, V, D, A, R and L too.

The results which are presented in this thesis shows possibility of using commercially available liquid crystal display in quantum experiments, polarization analysis and preparation, including using liquid crystal device in quantum Fredkin gate.

Key words

Polarization, liquid crystal, liquid crystal modele, liquid crystal device, segment liquid crystal display, minimal analysis, polarization analysis, polarization prepartarion.

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu RNDr. Miroslavu Ježkovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat všem kolegům za jejich podporu a za příjemné a kreativní pracovní prostředí. Také bych chtěl poděkovat za spolupráci Mgr. Michalu Dudkovi za vývoj elektronických řídicích prvků TN LC modulů a Mgr. Robertu Stárkovi a Mgr. Michalu Mičudovi, Ph.D. při aplikaci TN LC zařízení pro analýzu kvantového entanglovaného stavu na výstupu z Fredkinova hradla. V neposlední řadě bych rád poděkovat své rodině za jejich trpělivost a ochotu.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Elektrooptická manipulace s fotonickými kvantovými bity“ vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Miroslava Ježka, Ph.D. s využitím uvedené literatury a pramenů na konci této práce. Souhlasím, aby byla práce použita pro potřeby výuky a prezentována na internetových stránkách katedry optiky.

V Olomouci dne

.....
Martin Bielak

Obsah

1	Motivace	1
2	Polarizace světla	3
2.1	Popis a vizualizace polarizace	3
	Jonesův popis	3
	Stokesovy vektory a Blochova sféra	4
	Matice hustoty	5
2.2	Analýza polarizačního stavu	6
3	Popis a princip TN displeje z kapalných krystalů	7
3.1	Ovládání TN LC	8
3.2	Úprava TN LCD k využití pro modulaci polarizačního stavu světla	9
3.3	Matematický model TN LC modulu	9
3.4	Charakterizace TN LC modulu	10
4	TN LC zařízení složené z dvojice TN LC modulů	13
4.1	Návrh	13
	4.1.1 Nalezení vhodné konfigurace TN LC zařízení	13
	4.1.2 Konstrukce TN LC zařízení	13
4.2	Kalibrace TN LC zařízení	14
	4.2.1 Nalezení stavů H, V, D, A, R a L pomocí TN LC zařízení	15
	4.2.2 Nalezení čtyřstěnu pro minimální čtyřstavovou analýzu	17
4.3	Ověřovací měření provedená s TN LC zařízením	18
	4.3.1 Analýza polarizačního stavu připraveného fázovými destičkami	18
4.4	Časová odezva nastavení projekcí	20
5	TN LC zařízení složené z trojice TN LC modulů	22
6	Aplikace TN LC zařízení z dvojice TN LC modulů v analýze entanglovaných stavů	24
7	Shrnutí	27
	Literatura	30

1 Motivace

Tekuté krystaly, díky své schopnosti měnit polarizační stav prošlého svazku, spolu s polarizátory nacházejí značné uplatnění jako zobrazovací zařízení. Jejich použití je velmi běžné v předmětech denní potřeby, od kalkulaček přes digitální hodinky až po mobilní telefony, notebooky a televizory. V mnoha oblastech výzkumu a vývoje zobrazovacích metod nalézají zařízení vyrobená z tekutých krystalů své uplatnění. Moduly z tekutých krystalů, společně s čtvrtvlnnými fázovými destičkami před a za modulem, mohou tvořit fázový modulátor [1, 2]. Takováto zařízení vyrobená z pixelových modulů s tekutými krystaly je možné využít jako prostorové fázové modulátory světla [3]. Moduly z tekutých krystalů je možné využít k přípravě a analýze polarizačního stavu v polarimetrii. Polarizační přípravu a analýzu lze realizovat destičkami v motorizovaných rotačních montážích. Tekuté krystaly mají však hned několik výhod. Rychlost změny projekce či připravované polarizace, nebo libovolné prostorové rozložení aktivní plochy. Další výhodou představuje možnost provádění různých polarizačních změn na více blízkých svazcích separátně. Společně s polarizátory mohou tvořit amplitudové modulátory a přepínače [4, 5], nebo lze moduly z tekutých krystalů využít k tvorbě Lyotova a dalších interferenčních filtrů [6]. Tekuté krystaly je možné využít také v spektrometrii [7]. Tekuté krystaly nejsou jedinými zařízeními, u kterých lze měnit fázové zpoždění v závislosti na přiloženém napětí. Takovéto vlastnosti mají například i Pockelsovy cely, které využívají elektrotického jevu (index lomu se mění úměrně přiloženému elektrickému poli). Výhodou Pockelsových cel je rychlost přechodu mezi jednotlivými stavy, která je násobně vyšší než u modulů z tekutých krystalů. Nevýhodou těchto cel je složité řízení z důvodu nutnosti přikládat napětí v řádech kV.

Vzhledem k výhodám a univerzálnosti použití, které tekuté krystaly přinášejí, jsme se rozhodli otestovat jejich použití pro polarizační přípravu a analýzu, studovat jejich chování a prozkoumat jejich vliv v experimentu. V případě analýzy polarizačního stavu lze využít buď minimální analýzy, kdy se provádí projekce do čtyř stavů, a nebo použít postup analogický s fázovými destičkami a provést projekce do stavů horizontální (H), vertikální (V), diagonální (D), antidiagonální (A), pravotočivé kruhové (R) a levotočivé kruhové (L) polarizace. Minimální analýza má výhodu v nižším počtu potřebných projekcí a tím i kratším času potřebném pro provedení analýzy jednoho vstupního stavu. Další výhodou minimální analýzy je snadnější nalezení čtyř stavů k projekci pomocí TN LC zařízení, jelikož tato čtveřice stavů může být otočena na Blochově sféře téměř libovolně, při zachování své vzájemné polohy. Na první pohled projekce do stavů H, V, D, A, R a L přináší negativa v podobě náročnějšího hledání konfigurace TN LC zařízení a delší doby analýzy vstupního stavu. Avšak tyto negativní dopady jsou vynahrazeny několika výhodami. V experimentech se obvykle využívají stavy H, V, D, A, R a L připravované pomocí fázových destiček a při kalibraci experimentu se pak provádí hledání minimální nebo maximální projekce do jednoho z těchto stavů. Což se zařízením projektujícím jen do čtyř stavů provést nelze. Další, a neméně podstatnou, výhodou je možnost těchto šest základních stavů H, V, D, A, R a L připravit, což umožňuje použít TN LC zařízení v polarizační přípravě. Navíc pokud TN LC zařízení podporuje projekci do stavů H, V, D,

A, R a L, je možné takovýmto zařízením nahradit destičkovou H, V, D, A, R, L analýzu v již sestaveném experimentu mnohem jednodušším způsobem, než v případě minimální analýzy. Pro zkombinování výhod minimální analýzy i H, V, D, A, R a L analýzy jsme se rozhodli pokusit se nalézt takovou konfiguraci TN LC zařízení, která umožňuje jen na základě různých kombinací přiložených napětí přepínat mezi těmito dvěma druhy analýz.

2 Polarizace světla

Polarizace světla je určena způsobem kmitání vektoru elektrické intenzity \vec{E} . Pro příčnou (transverzální) elektromagnetickou vlnu popisuje polarizace vývoj vektoru \vec{E} v rovině kolmé na směr šíření, daný vlnovým vektorem.

Definujeme 6 základních stavů polarizace světla: H, V, D, A, R a L, viz tabulka 1. Jejich Jonesův a Stokesův popis je diskutován dále.

Polarizace		Stokesův vektor (S_1, S_2, S_3)	Jonesův vektor $\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$
Lineární	Horizontální (H)	(1, 0, 0)	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
	Vertikální (V)	(-1, 0, 0)	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
	Diagonální (D)	(0, 1, 0)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
	Antidiagonální (A)	(0, -1, 0)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$
Kruhová	Pravotočivá kruhová (R)	(0, 0, 1)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$
	Levotočivá kruhová (L)	(0, 0, -1)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$

Tabulka 1: Základní druhy polarizace, jejich Stokesovy a Jonesovy vektory. i je komplexní jednotka.

2.1 Popis a vizualizace polarizace

Jonesův popis

Uvažujme rovinnou monochromatickou vlnu o frekvenci ν a šířící se prostředím ve směru osy z . Tato vlna je zcela popsána svými komplexními obálkami, x složkou elektrického pole E_x a y složkou E_y .

$$\begin{aligned} E_x &= a_x e^{i\gamma_x}, \\ E_y &= a_y e^{i\gamma_y}, \end{aligned} \tag{1}$$

kde a_x a a_y jsou amplitudy a γ_x a γ_y jsou fáze. Jonesův vektor pak definujeme jako sloupcový vektor:

$$\vec{J} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Podle poměru amplitud a_x a a_y a fázového posunu $\Delta\gamma = \gamma_y - \gamma_x$ určujeme konkrétní stavy polarizace (viz. tabulka 1).

Pokud vlna prochází optickou soustavou, která mění její polarizaci, můžeme transformaci polarizace vyjádřit pomocí Jonesova počtu pomocí součinu Jonesovy matice 2×2 a Jonesova vektoru,

$$\vec{J}_{OUT} = M_{OS} \cdot \vec{J}_{IN}, \quad (3)$$

kde \vec{J}_{IN} je Jonesův vektor popisující polarizační stav vlny vstupující do soustavy, M_{OS} je Jonesova matice popisující transformaci polarizačního stavu v optické soustavě a \vec{J}_{OUT} je Jonesův vektor stavu vystupujícího ze soustavy.

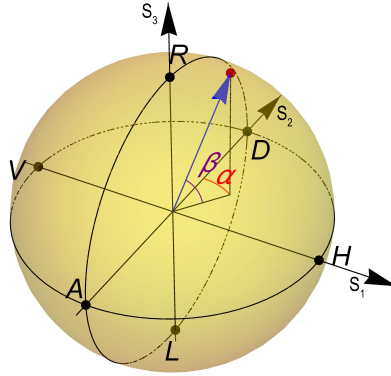
Stokesovy vektory a Blochova sféra

Stokesovy vektory, obdobně jako Jonesovy vektory, slouží k popisu polarizačního stavu světla. Oproti Jonesovým vektorům však umožňují popsat i stavy nepolarizované, nebo částečně polarizované. Každý polarizační stav popsaný Stokesovým vektorem lze graficky znázornit v 3D prostoru jako bod o souřadnicích (S_1, S_2, S_3) , nebo ve sférických souřadnicích:

$$\begin{aligned} S_1 &= P_s \sin \alpha \cos \beta, \\ S_2 &= P_s \cos \alpha \cos \beta, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} S_3 &= P_s \sin \alpha, \\ P_s &= \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Parametry S_1 , S_2 a S_3 nazýváme Stokesovými parametry, parametr P_s udává délku Stokesova vektoru. Ta je úměrná stupni polarizace (někdy též čistota) stavu, kdy hodnota $P_s = 1$ odpovídá plně polarizovanému stavu a hodnota $P_s = 0$ stavu plně nepolarizovanému. Ke znázornění polarizačních stavů vyjádřených pomocí Stokesových vektorů se využívá Blochova sféra. Blochova sféra je jednotková koule na jejímž povrchu leží stavy plně polarizované a v jejím objemu stavy částečně polarizované.



Obrázek 1: Blochova sféra.

Matice hustoty

Jedná se o matici 2×2 , která nám dovoluje popsat světlo polarizované i částečně polarizované pomocí stejné symboliky. Pokud uvažujeme libovolný plně polarizovaný stav $|\psi_i\rangle$, zapsán Diracovou notací, potom p_i vyjadřuje pravděpodobnost stavu $|\psi_i\rangle$ a platí $\sum_i p_i = 1$, pak matici hustoty definujeme jako

$$\rho = \sum_i p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i|. \quad (6)$$

Matice hustoty je normovaná

$$\text{Tr } \rho = 1. \quad (7)$$

Stupeň polarizace vypočteme z matice hustoty jako stopu její druhé mocniny.

$$P(\rho) = \text{Tr } \rho^2. \quad (8)$$

V případě, že známe dva stavy popsané maticemi hustoty ρ a Ψ je jejich překryv dán vztahem

$$F(\rho, \Psi) = \left[\text{Tr} \left(\sqrt{\sqrt{\rho} \Psi \sqrt{\rho}} \right) \right]^2. \quad (9)$$

Při praktickém využití je vhodné mít možnost přecházet mezi jednotlivými parametrizacemi polarizačního stavu. V případě matice hustoty a Stokesových vektorů je možný přechod oběma směry

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\sigma_0 + \sum_{i=1}^3 S_i \sigma_i \right), \quad (10)$$

$$S_i = \text{Re} [\text{Tr} (\sigma_i \rho)], \quad i = \{1, 2, 3\}. \quad (11)$$

Kde $\sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $\sigma_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, $\sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ a $\sigma_3 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$.

V případě Jonesových vektorů lze vyjádřit jen stavy plně polarizované pomocí vztahu

$$\rho = \vec{J} \cdot (\vec{J}^T)^*, \quad (12)$$

kde $(\vec{J}^T)^*$ je komplexně sdružený transponovaný Jonesův vektor \vec{J} .

2.2 Analýza polarizačního stavu

Při využití polarizačního stupně volnosti světla potřebujeme nejen dané stavy popsat, ale je třeba tyto stavy i měřit. Pokud z aparatury vystupuje stav o neznámé polarizaci, můžeme ji určit projekcí tohoto stavu do bazových stavů. Uvažujme nezávislé báze stavů H/V, D/A a R/L, potom pravděpodobnost p_i stavu $|\psi_i\rangle$ získáme jako intenzitu snímanou detektorem I_i po projekci neznámého stavu do stavu $|\psi_i\rangle$,

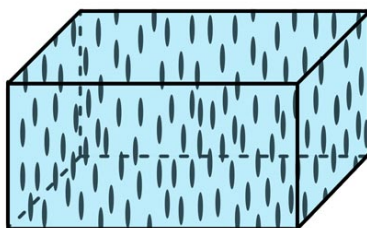
$$p_i = \langle \psi_i | \rho | \psi_i \rangle, \quad i = \text{H, V, D, A, R, L} \quad (13)$$

kde ρ představuje matici hustoty neznámého stavu.

Pokud známe pravděpodobnost projekce v daném stavu, můžeme ρ vypočítat metodou maximální věrohodnosti [8]. Analogicky můžeme aplikovat tento postup i s využitím minimální analýzy stavu [9], kdy stačí provést projekce do čtyř stavů. Výhodou je nutnost menšího počtu projekcí a tím pádem i nižší časová náročnost. Nevýhoda minimální analýzy se projeví v případě, kdy měření jedné z pravděpodobností projekcí je zatíženo chybou, pak se tato chyba více přenáší do konečného výsledku.

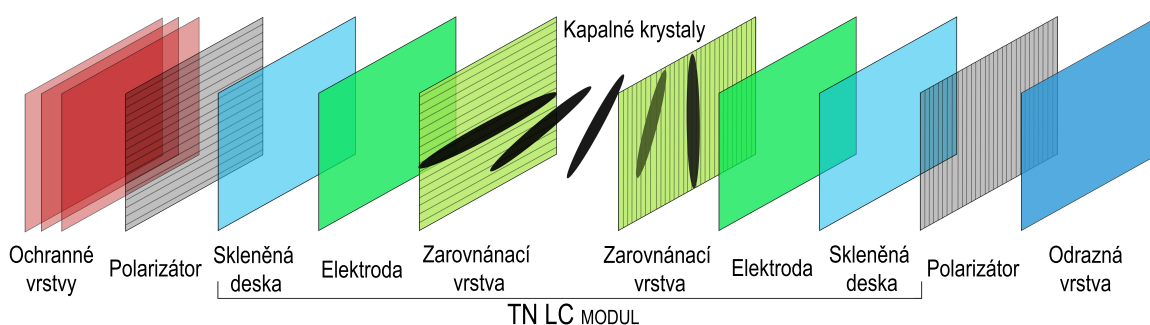
3 Popis a princip TN displeje z kapalných krystalů

Kapalný krystal (LC) je složen z podlouhlých organických molekul doutníkového tvaru, jako na obrázku 2. V případě nematických tekutých krystalů je podobně jako v kapalině poloha jednotlivých molekul náhodná, ale jejich orientace, podobně jako u krystalů, náhodná není [10].



Obrázek 2: Orientace molekul v nematických kapalných krystalech.

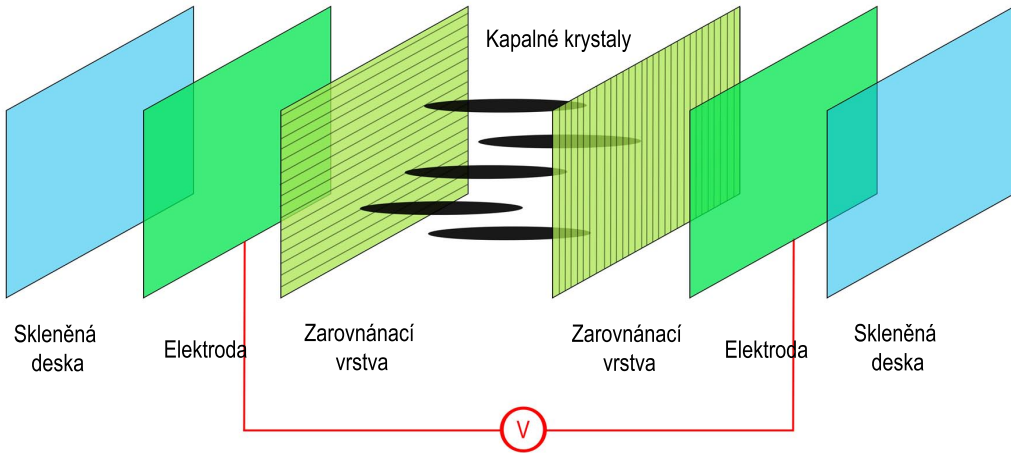
Stočené nematické krystaly, z anglického *twisted nematic* (TN), jsou jednou z nejrozšířenějších technologií pro výrobu displejů z kapalných krystalů. Stočení (twist) vzniká při umístění tenké vrstvy kapalného krystalu mezi zarovnávací vrstvy. Tyto zarovnávací vrstvy jsou tvořeny polymerními vrstvami vyleštěnými v různých směrech [10]. Krajní vrstvy molekul kapalného krystalu se zorientují dle těchto zarovnávacích vrstev. Každá další vrstva krystalu je ovlivněna orientací předchozí vrstvy a tím vzniká šroubovitě zkroucení podél osy kolmé k zarovnávacím vrstvám (obrázek 3).



Obrázek 3: Základní struktura TN LC displeje a modulu bez přiloženého napětí.

Pokud do TN LC modulu vstupuje lineární polarizace, sleduje polarizační rovina orientaci jednotlivých vrstev molekul doutníkového tvaru. V případě, že na elektrody přiložíme napětí, dochází k postupnému sklápění molekul kapalných krystalů ve směru vzniklého pole (obrázek 4). Tím dochází ke změně polarizačního stavu světla na výstupu a schop-

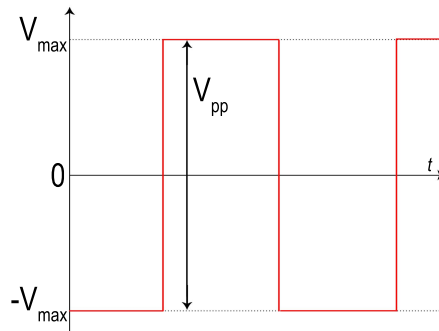
nost modulu stáčet rovinu polarizace pro vysoká napětí mizí. Po vypnutí elektrického pole dochází vlivem zarovnávacích vrstev ke zpětnému vytvoření šroubovitě struktury.



Obrázek 4: Struktura TN LC po přiložení napětí na elektrody.

3.1 Ovládání TN LC

TN LC modul je řízen střídavým napětím s obdélníkovým průběhem, jak je znázorněno na obrázku 5.



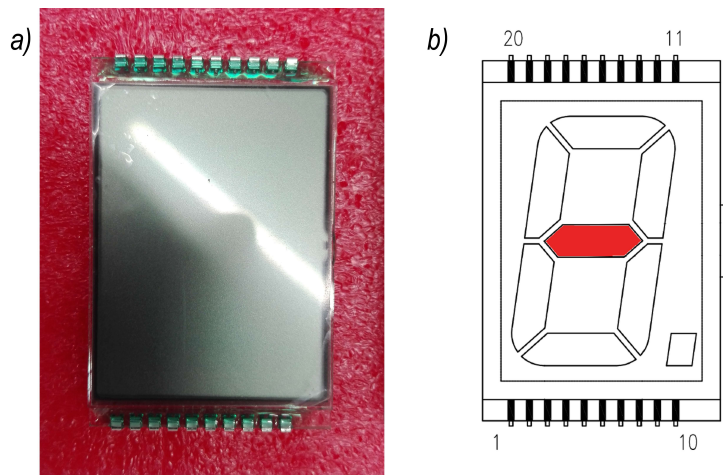
Obrázek 5: Řídící signál pro TN LC modul. V_{\max} - amplituda napětí, V_{pp} - peak-to-peak napětí.

Přiložením stejnosměrného napětí na elektrody, dochází ke změně chemického složení a tím k poškození modulu [11]. Proto je důležité zajistit, aby řídicí signál měl nulovou stejnosměrnou složku. Všechna napětí uvedená v této práci v souvislosti s LC zařízeními a moduly jsou hodnoty napětí peak-to-peak,

$$V_{pp} = |V_{\max}| + |V_{\min}| = 2V_{\max} = 2|V_{\min}|. \quad (14)$$

3.2 Úprava TN LCD k využití pro modulaci polarizačního stavu světla

Pro experimenty popsané dále v této práci byly využity komerčně dostupné TN LC displeje LUMEX LCD-S101D14TR. Schéma displeje je vyobrazeno na obrázku 6b, červeně je na tomto obrázku zvýrazněn segment který byl použit jako aktivní plocha v následujících experimentech.



Obrázek 6: Použitý display a) a schéma displeje s vyznačenými segmenty b).

TN LC displej je složen z TN LC modulu, na který jsou dále připevněny polarizátory, další ochranné vrstvy na jedné straně modulu a vrstva odrazná na straně druhé (viz. obrázek 3). Polarizátory jsou umístěny z vnějších stran skleněných desek modulu a mají funkci transformace polarizačního stavu do podoby intenzitního spektra segmentu. Pro řízení polarizace je třeba všechny tyto vrstvy z displeje odstranit, tak aby vznikl samotný TN LC modul. Skleněné plochy modulu je třeba následně očistit od zbytků lepidla pomocí isopropyl alkoholu. Takto připravené moduly byly nalepeny na závitové kroužky (ThorLabs) a následně umístěny do rotačních montáží pro snadnější manipulaci a použití v experimentech.

3.3 Matematický model TN LC modulu

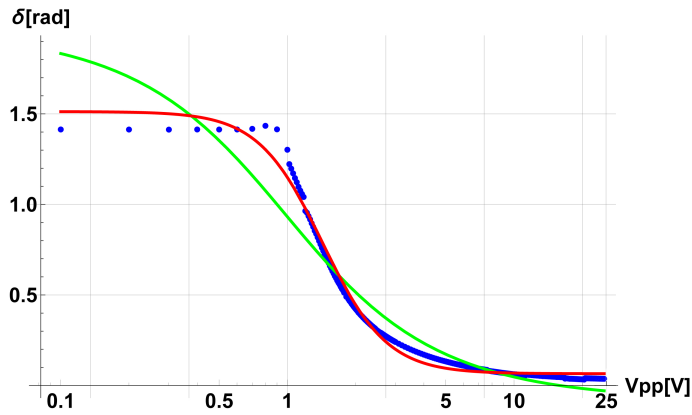
K popisu transformace polarizačního stavu prováděné TN LC modulem je vhodné využít Jonesova popisu. Matici pro TN LC modul můžeme odvodit jako posloupnost infinitezimálních fázových destiček, kdy každé dvě jsou vůči sobě pootočený o infinitezimální úhel [12, 13]. Výsledná matice má následující tvar:

$$M_{\text{TLCN}} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \chi + i \frac{\delta}{\chi} \sin \chi & -\frac{\varphi}{\chi} \sin \chi \\ \frac{\varphi}{\chi} \sin \chi & \cos \chi - i \frac{\delta}{\chi} \sin \chi \end{pmatrix}, \quad (15)$$

kde φ je pevný úhel stočení vrstev a δ představuje fázové zpoždění závislé na přiloženém napětí V . Parametr χ svazuje φ a δ pomocí následujícího výrazu:

$$\chi = \sqrt{\varphi^2 + \delta^2}. \quad (16)$$

Na obrázku 7 je znázorněn jako příklad průběh fázového zpoždění pro LC modul vyráběný společností ThorLabs. Jak je z obrázku vidět, průběh fázového zpoždění není lineární. Pro malá přiložená napětí je fázové zpoždění konstantní, až po překročení prahového napětí dochází k silně nelineárnímu poklesu fázového zpoždění. V literatuře je někdy průběh fázového zpoždění reprezentován pomocí funkce arctan [14]. Funkce arctan je však symetrická, což pro fázové zpoždění reálného TN LC modulu znázorněnou na obrázku 7 neplatí.



Obrázek 7: Průběh fázového zpoždění v závislosti na přiloženém napětí při 25°C pro ThorLabs LCC1113-B pro vlnovou délku 780 nm. Modře jsou vynesena nameřená data [15]. Zelená křivka představuje proložení funkcí arctan, červená proložení logistickou křivkou (17).

Nalezením vhodné funkce popisující tvar křivky pro fázové zpoždění TN LC modulu se zabýval V. Krčmarský ve své diplomové práci [16]. Funkce dostatečně dobře popisující závislost fázového zpoždění na napětí se nazývá logistická křivka a je dána vztahem:

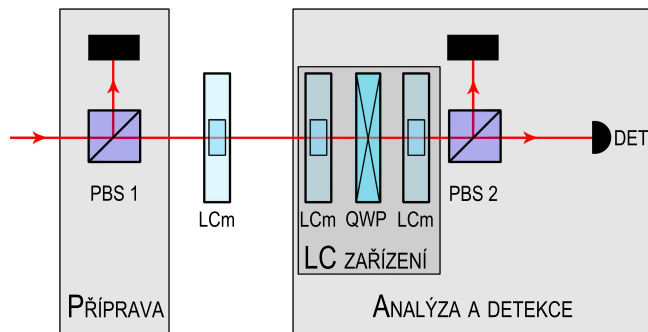
$$\delta = a + \frac{1}{b + e^{d-cV^f}}, \quad (17)$$

kde a , b , c , d , a f jsou konstanty a V je napětí přiložené k elektrodám.

3.4 Charakterizace TN LC modulu

Pokud chceme TN LC moduly využít při tvorbě zařízení pro přípravu a analýzu polarizačních stavů, je třeba prvně charakterizovat transformaci prováděnou jedním TN LC modulem. Charakterizace TN LC modulu byla prováděna pro vlnovou délku $\lambda=810$ nm,

stejně jako veškerá další měření. K analýze bylo využito již nakalibrované LC zařízení využívající minimální analýzu. Toto zařízení je složeno z dvojice TN LC modulů, mezi něž je vložena čtvrtvlnná fázová destička.



Obrázek 8: Schéma experimentální aparatury pro charakterizaci TN LC modulu. Polarizační dělič svazku (PBS), TN LC modul (LCm), čtvrtvlnná fázová destička (QWP), detektor (DET).

Schéma experimentální aparatury je vyobrazeno na obrázku 8. V první části aparatury je připravena horizontální polarizace, svazek se dále šíří skrz aktivní segment TN LC modulu (červeně na obrázku 6b). V poslední části aparatury je prováděna minimální analýza polarizačního stavu. Obdobný experiment s využitím fázových destiček je popsán v [16, 17]. Na měřený TN LC modul bylo postupně přikládáno 200 napětí z intervalu $\langle 0, 10 \rangle V_{pp}$. Toto měření bylo opakováno pro tři nastavení úhlu natočení TN LC modulu v rotační montáži, $\alpha_{15} = 15^\circ$, $\alpha_{30} = 30^\circ$ a $\alpha_{45} = 45^\circ$. Naměřená data byla zpracována a byl nimi proložen teoretický model v podobě rovnice

$$J_{OUT} = R(-\vartheta - \alpha_i) \cdot M_{TNLC} \cdot R(\vartheta + \alpha_i), \quad (18)$$

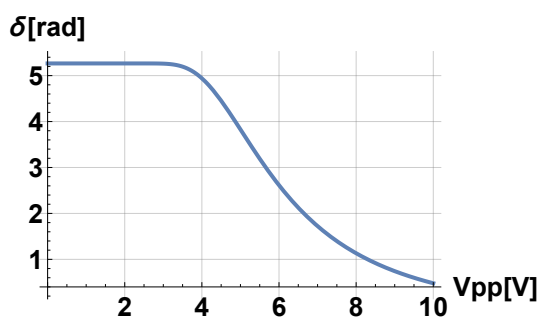
kde je matice TN LC modulu vynásobena zleva i zprava maticí rotace

$$R(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Úhel ϑ představuje počáteční natočení vrstev modulu, které je neznámé a je dáno výrobní technologií. Právě pro bezpečné určení tohoto úhlu bylo třeba provést měření pro tři úhly natočení modulu α_i , kde $i = \{15, 30, 45\}$. Jako model fázového zpoždění $\delta(V)$ byla použita logistická funkce (17), viz. obrázek 9.

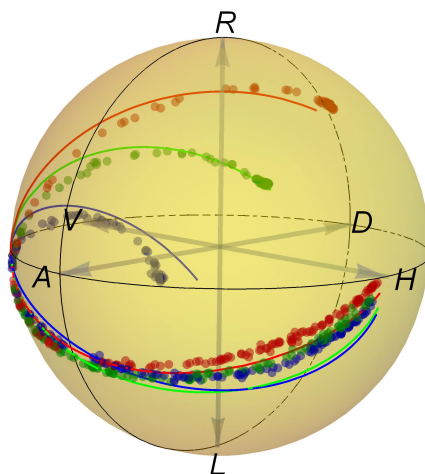
Proložení teoretického modelu naměřenými daty bylo provedeno pro všechny tři úhly α_i současně. Výsledné nalezené parametry jsou následující: $a = -8,31$, $b = 7,36 \cdot 10^{-2}$, $c = 174,92$, $d = -2,97$, $f = -2,85$, $\varphi = -295,07^\circ$, $\vartheta = -146,68^\circ$.

Pro určení nejistoty parametrů modelu a opakovatelnosti kalibrace bude třeba měření opakovat pro několik kombinací natočení úhlů a pro několik kusů LC modulů.



Obrázek 9: Závislost fázového zpoždění $\delta(V)$ na přiloženém napětí podle rovnice (17) a nalezených parametrů.

Model použitý pro popis transformace TN LC modulem představuje pouze přiblížení. V tomto modelu je uvažováno stejné chování všech vrstev molekul LC. V reálném TN LC modulu však po přiložení napětí nedochází k stejnoměrnému sklápění všech molekul LC, molekuly v blízkosti zarovnávacích vrstev mění svou orientaci jen velmi málo [18, 19]. Proto lze na obrázku 10 pozorovat odchylky mezi naměřenými daty a matematickým modelem.



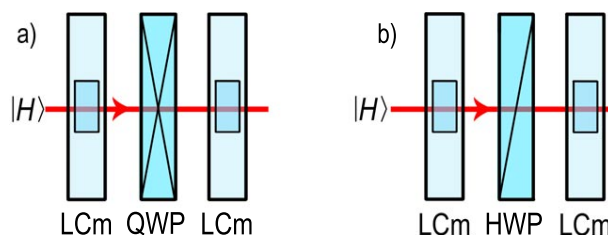
Obrázek 10: Grafické znázornění transformace prováděné jedním TN LC modulem pro úhly $\alpha_{15} = 15^\circ$ (červená), $\alpha_{30} = 30^\circ$ (zelená) a $\alpha_{45} = 45^\circ$ (modrá). Tečkovaně jsou na Blochově sféře vynesena naměřená data, křivky představují výsledky získané z teoretického modelu po charakterizaci.

4 TN LC zařízení složené z dvojice TN LC modulů

4.1 Návrh

4.1.1 Nalezení vhodné konfigurace TN LC zařízení

Po charakterizaci TN LC modulu bylo možné přistoupit k hledání optimální konfigurace zařízení. Jako základní konfigurace byly zvoleny dva LC moduly a mezi ně vložena fázová destička.



Obrázek 11: Schématické znázornění obou uvažovaných konfigurací. a) zařízení s čtvrtvlnnou fázovou destičkou (QWP), b) zařízení s půlvlnnou fázovou destičkou (HWP). Červeně je znázorněn průchod svazku, TN LC moduly (LCm).

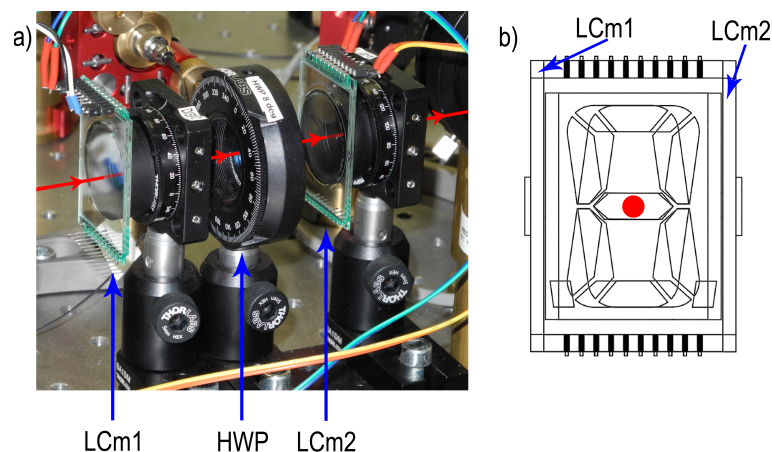
Pro co největší aktivní plochu, tak aby jedno TN LC zařízení mohlo být použito i pro více rovnoběžných svazků, byl úhel obou TN LC modulů nastaven pevně a to tak, aby oba segmenty byly orientovány horizontálně. Jako volné parametry k hledání byly použity úhel natočení fázové destičky mezi TN LC moduly a napětí přiložené na modulech. Vyhodnocována byla jak konfigurace s půlvlnnou, tak i čtvrtvlnnou fázovou destičkou vloženou mezi moduly.

Hledání optimální konfigurace probíhalo numerickou simulací na základě charakterizovaného matematického modelu, vyhodnocován byl maximální překryv s horizontální, vertikální, diagonální, antidiagonální polarizací a polarizacemi pravotočivě a levotočivě kruhovými.

Na základě těchto simulací byla zvolena konfigurace s HWP mezi TN LC moduly (obrázek 11b), umístěná v rotační montáži a nastavena na úhel -30° .

4.1.2 Konstrukce TN LC zařízení

Oba displeje byly upraveny dle postupu uvedeném v kapitole 3.2. Připravené TN LC moduly byly umístěny do rotačních montáží. Mezi takto připravené moduly byla vložena půlvlnná fázová destička, jak je znázorněno na schématu 11b). Veškeré komponenty TN LC zařízení byly umístěny na samostatné desce, aby bylo možné se zařízením snadněji manipulovat a přemísťovat jej mezi jednotlivými experimenty. Na příslušné kontakty vyvedené na TN LC modulu pro prostřední segment, byly připojeny vodiče potřebné k jejich řízení.

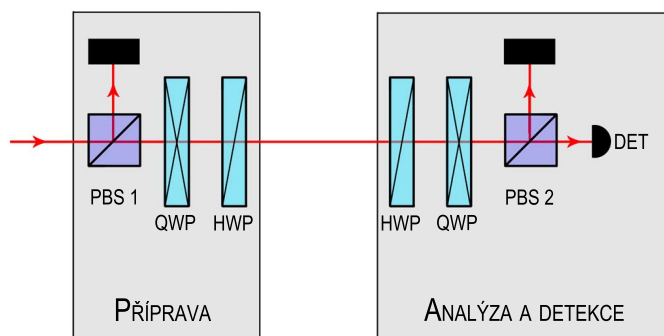


Obrázek 12: Fotografie TN LC zařízení a). Na obrázku b) je znázorněna schématická orientace TN LC modulů. V obou případech je červeně znázorněn průchod svazku.

4.2 Kalibrace TN LC zařízení

Pro kalibraci bylo třeba zvolit vhodnou referenci. Jako reference byla zvolena analýza pomocí dvojice fázových destiček, půlvlnné a čtvrtvlnné, umístěné v rychlých motorizovaných rotačních montážích PR50CC (Newport). Jako první bylo provedeno ověřovací měření, kde stavy byly připravovány pomocí dvojice fázových destiček v manuálních rotačních montážích. Schéma experimentu je znázorněno na obrázku 13.

Toto měření bylo prováděno za účelem získání referenčních dat pro pozdější měření a porovnání analýzy stavu pomocí fázových destiček s analýzou pomocí TN LC zařízení.

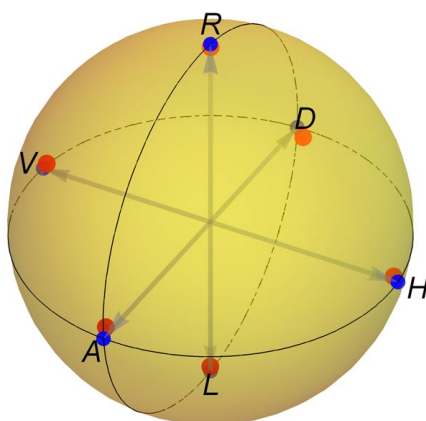


Obrázek 13: Schéma experimentu pro ověření polarizační přípravy a analýzy před kalibrací. Polarizační dělič svazku (PBS), čtvrtvlnná fázová destička (QWP), půlvlnná fázová destička (HWP), detektor (DET).

Svazek z laserové diody je navázán do jednomódového optického vlákna, jehož část je navinuta v polarizačním kontroléru. Svazek je vyvážen z vlákna za pomoci kolimátoru do

volného prostoru a dále se šíří skrz polarizační dělič. Horizontální polarizace projde dále do experimentu a vertikální polarizace je odražena. Svazek s horizontální polarizací se šíří přes čtvrtvlnnou a půlvlnnou fázovou destičku. Pomocí změny úhlu jejich natočení jsou připravovány různé polarizační stavy. Následná analýza probíhá opět pomocí půlvlnné a čtvrtvlnné fázové destičky, polarizačního děliče svazku a detektoru v podobě zesilované PIN diody.

Postupně bylo na první dvojici fázových destiček nastaveno všech šest základních stavů polarizace H, V, D, A, R a L. Takto připravené stavy byly následně analyzovány s využitím metody maximální věrohodnosti. Změřené polarizační stavy jsou vyneseny na Blochovu sféru v obrázku 14. Průměrná polarizovanost naměřených stavů je $P = 0,990(3)$ a nejnižší $P_{\min} = 0,985$ pro kruhově pravotočivou polarizaci. Průměrný překryv s ideálními stavy H, V, D, A, R a L je $F = 0,995(1)$ a minimální $F_{\min} = 0,992$, opět pro kruhově pravotočivou polarizaci.

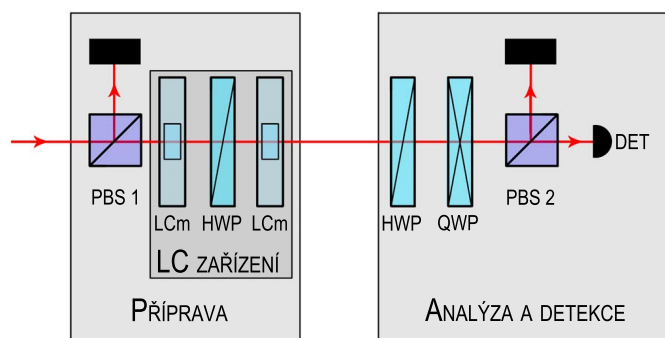


Obrázek 14: Blochova sféra s vyneseními připravenými stavy pomocí dvojice fázových destiček, analýza pomocí fázových destiček (červeně). Modře jsou na sféře vyznačeny stavy H, V, D, A, R a L.

4.2.1 Nalezení stavů H, V, D, A, R a L pomocí TN LC zařízení

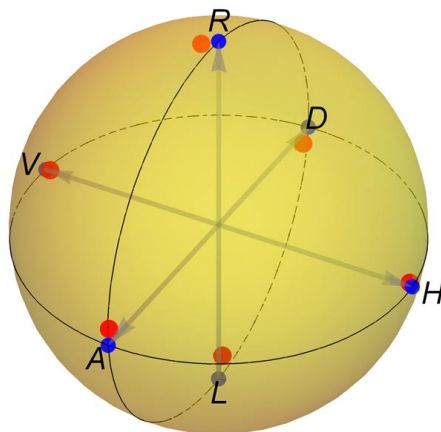
Nyní bylo možné přistoupit k hledání napětí, které je třeba na TN LC moduly přiložit, tak aby ze vstupní horizontální polarizace byly připraveny všechny základní polarizační stavy H, V, D, A, R a L. Fyzická konfigurace zařízení byla již popsána v kapitole 4.1.2.

Schéma experimentu je znázorněno na obrázku 15. Svazek po vstupu do experimentu prochází polarizačním děličem, kde je V polarizace odražena a H polarizace prochází dále do TN LC zařízení (LC zařízení). Přiložením různých napětí na TN LC moduly v zařízení dochází ke změně polarizace na výstupu ze zařízení. Výstupní polarizace je následně analyzována pomocí dvojice půlvlnné a čtvrtvlnné fázové destičky a polarizačního děliče svazku.



Obrázek 15: Schéma experimentu pro kalibraci TN LC zařízení. Polarizační dělič svazku (PBS), čtvrtvlnná fázová destička (QWP), půlvlnná fázová destička (HWP), detektor (DET), TN LC modul (LCm).

Protože přesné proměření mnoha kombinací přiložených napětí by bylo časově velmi zdlouhavé, bylo prvně provedeno měření, kdy byly fázové destičky nastaveny na projekci do stavu H a na TN LC moduly byla postupně přikládána napětí a byla zaznamenána napětí na detektoru. Z takto naměřených dat byla vybrána dvojice přiložených napětí, kdy na detektoru bylo maximální napětí. V okolí této dvojice napětí pak byla provedena kompletní analýza stavu připraveného TN LC zařízením a vybrán stav s maximálním překryvem s H polarizací. Obdobně byla provedena měření pro zbývajících pět polarizací V, D, A, R a L.



Obrázek 16: Blochova sféra s vyneseními připravenými stavy pomocí TN LC zařízení, analýza pomocí fázových destiček (červeně). Modře jsou na sféře vyznačeny stavy H, V, D, A, R a L.

Pro názornost byly změřené stavy znázorněny na Blochově sféře (obrázek 16). Průměrná polarizovanost připravených stavů je $P=0,995(7)$, nejnižší $P_{\min}=0,984$ pro kru-

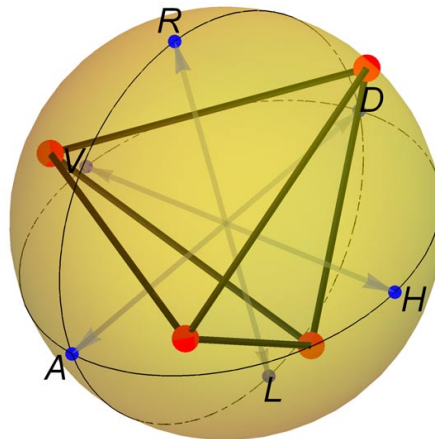
hově levotočivou polarizaci. Průměrný překryv s ideálními stavy H, V, D, A, R a L je $F=0,995(4)$ a minimální $F_{\min}=0,989$, opět pro kruhově levotočivou polarizaci.

4.2.2 Nalezení čtyřstěnu pro minimální čtyřstavovou analýzu

Při hledání čtyřstěnu pro využití v minimální analýze byla zachována fyzická konfigurace zařízení jako v případě hledání stavů H, V, D, A, R a L z důvodu zachování možnosti přepínat mezi oběma způsoby analýzy a přípravy polarizace TN LC zařízením bez fyzických zásahů do jeho konfigurace. Měření bylo prováděno na stejné aparatuře jako při hledání stavů H, V, D, A, R a L (obrázek 15).

Hledání vhodných stavů probíhalo náhodným rozstřelem napětí přiložených na TN LC moduly. Stavby byly rekonstruovány pomocí fázových destiček a byla z nich vybrána čtveřice stavů, která do Blochovy sféry vepíše čtyřstěn o maximálním objemu. Kritérium maximálního objemu bylo voleno vzhledem k cíli nalezení čtyřstěnu, který je co nejbližší pravidelnému čtyřstěnu. Ze všech čtyřstěnů vepsaných do jednotkové koule má právě pravidelný čtyřstěn maximální objem. Pravidelných čtyřstěnů vepsaných do jednotkové koule existuje nekonečně mnoho, ale ne všechny body na Blochově sféře lze pomocí TN LC zařízení pokrýt, proto je třeba hledat čtyřstěn o maximálním objemu v napětovém podprostoru TN LC zařízení.

Nalezený čtyřstěn je znázorněn na obrázku 17, poměr jeho objemu k pravidelnému čtyřstěnu vepsanému do Blochovy sféry je $V_{\text{tet}}=0,988V_{\text{ideal}}$. Průměrná polarizovanost připravených stavů tvořících vrcholy čtyřstěnu je $P=0,99(1)$, nejnižší $P_{\min}=0,98$.

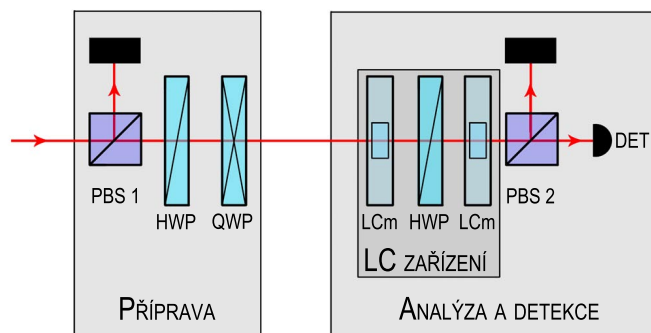


Obrázek 17: Blochova sféra s vneseným čtyřstěnem, připraveným pomocí TN LC zařízení, analýza pomocí fázových destiček (červeně). Modře jsou na sféře vyznačeny stavy H, V, D, A, R a L.

4.3 Ověřovací měření provedená s TN LC zařízením

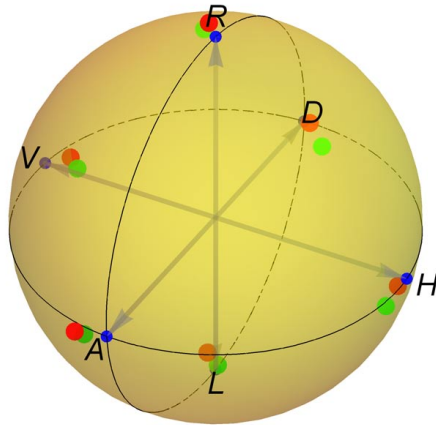
4.3.1 Analýza polarizačního stavu připraveného fázovými destičkami

Po kalibraci bylo možné přistoupit k ověření funkce TN LC zařízení v analýze polarizačních stavů. Schéma experimentální aparatury je znázorněno na obrázku 18.



Obrázek 18: Schéma experimentu pro ověření polarizační analýzy pomocí TN LC zařízení. Polarizační dělič svazku (PBS), čtvrtvlnná fázová destička (QWP), půlvlnná fázová destička (HWP), detektor (DET).

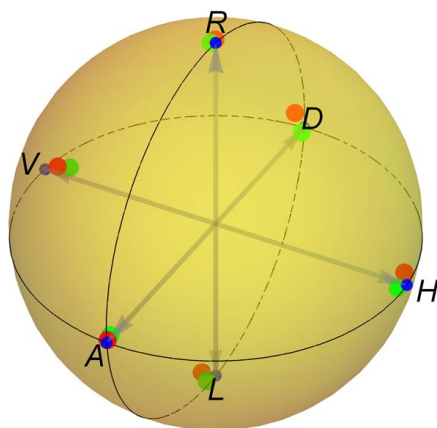
Fázovými destičkami byly připraveny polarizační stavy H, V, D, A, R a L. Tyto připravené stavy pak byly analyzovány TN LC zařízením, jak v režimu minimální čtyř stavové analýzy, tak v režimu H, V, D, A, R a L analýzy, v obou případech byla použita rekonstrukce za pomoci metody maximální věrohodnosti. Na přípravu stavů byly použity dvě různé dvojice fázových destiček, jednou umístěné v rychlých motorizovaných rotačních montážích, podruhé v manuálních.



Obrázek 19: Stavy připravené pomocí fázových destiček v rychlých motorizovaných rotačních montážích, analýza pomocí TN LC modulu. Červeně jsou na Blochově sféře vyneseny stavy analyzované projekcí do stavu H, V, D, A, R a L, zeleně stavy analyzované projekcí do čtyř stavů tvořících čtyřstěn.

Výsledky měření s fázovými destičkami v rychlých motorizovaných rotačních montážích jsou znázorněny na obrázku 19. V případě analýzy pomocí projekce do stavů H, V, D, A, R a L je průměrná polarizovanost naměřených stavů $P=0,998(4)$ a nejnižší $P_{\min}=0,993$ pro diagonální polarizaci. Průměrný překryv s ideálními stavy H, V, D, A, R a L je $F=0,993(3)$ a minimální, pro diagonální polarizaci, $F_{\min}=0,989$.

Za použití analýzy pomocí projekce do čtyř stavů tvořících čtyřstěn je průměrná polarizovanost analyzovaných stavů $P=0,98(1)$ a nejnižší $P_{\min}=0,961$ pro polarizaci diagonální. Průměrný překryv s ideálními stavy H, V, D, A, R a L je $F=0,98(1)$, minimální $F_{\min}=0,97$ pro stav diagonální polarizace.



Obrázek 20: Stavů připravené pomocí fázových destiček v manuálních montážích, analýza pomocí TN LC modulu. Červeně jsou na Blochově sféře vyneseny stavy analyzované projekcí do stavů H, V, D, A, R a L, zeleně stavy analyzované projekcí do čtyř stavů tvořících čtyřstěn.

V případě přípravy stavů pomocí fázových destiček v manuálních montážích (výsledky měření znázorněny na obrázku 20), je průměrná polarizovanost stavů měřených pomocí projekce do stavů H, V, D, A, R a L $P=0,99(1)$ a nejnižší $P_{\min}=0,98$ pro diagonální polarizaci. Průměrný překryv s ideálními stavy H, V, D, A, R a L je $F=0,993(6)$ a minimální, pro polarizaci diagonální a to $F_{\min}=0,986$.

S využitím projekce do čtyř stavů byla průměrná polarizovanost naměřených stavů $P=0,97(3)$ a nejnižší $P_{\min}=0,92$ pro stav vertikální polarizace. Překryv se stavy H, V, D, A, R a L je v průměru $F=0,99(2)$ a minimální $F_{\min}=0,96$ pro polarizaci vertikální.

Z naměřených výsledků lze konstatovat, že TN LC zařízení je plně kompatibilní s destičkovou analýzou, lze jím připravit polarizační stavy H, V, D, A, R a L a je též možné jej použít k polarizační analýze. Z provedených měření lze říci, že pro toto konkrétní TN LC zařízení je vhodnější využití analýzy pomocí projekce do šestice stavů H, V, D, A, R a L, jelikož takto změřené stavy mají vyšší stupeň polarizace a dosahují i většího překryvu s ideálními stavy. Jak je možné si z provedených měření povšimnout, při použití dvou různých dvojic půlvlnných a čtvrtvlnných destiček pro přípravu polarizačního stavu, se změřené výsledky liší. Je to z důvodu použití manuálních montáží, kde nastavení úhlu natočení fázové destičky není přesně opakovatelné. Druhým důvodem je rozptyl parametrů optických komponent, hlavně v případě čtvrtvlnných fázových destiček.

4.4 Časová odezva nastavení projekcí

Jednou z výhod využití tekutých krystalů při přípravě a analýze polarizačních stavů je rychlost nastavování projekce do požadovaných stavů. Při analýze jednoho vstupního polarizačního stavu je třeba provést minimálně čtyři projekce do stavů tvořících čtyřstěn (minimální analýza), nebo do šesti stavů H, V, D, A, R a L. Ale na posloupnosti těchto

projekcí nezáleží, proto je vhodné hledat takovou posloupnost stavů, pro níž je celková doba analýzy minimální.

K měření bylo využito stejné aparatury jako při testování TN LC zařízení (obrázek 18). Na detektor byl připojen rychlý A/D převodník a po změně napětí na TN LC modulech byla data vyčítána A/D převodníkem do té doby, než došlo k ustálení. Takto byla měřena celková doba analýzy, jako počáteční stav bylo na oba moduly vždy přiloženo napětí 0V. Pro TN LC zařízení bylo proměřeno všech 720 posloupností projekcí do stavů H, V, D, A, R a L a všechny posloupnosti stavů při projekci do čtyř stavů. Výsledná data byla zpracována a výsledky byly zaneseny do tabulky 2.

Pro porovnání bylo změřeno i prvních 100 posloupností projekcí za použití fázových destiček v rychlých motorizovaných rotačních montážích.

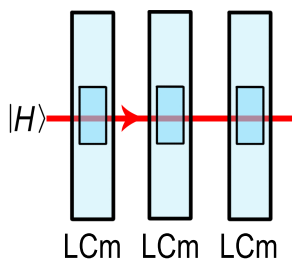
Použitá analýza stavu		Minimum	Maximum	Průměr	Medián
TN LC zařízení	H, V, D, A, R a L	4,48 s	8,80 s	6,00 s	5,93 s
	Body čtyřstěnu	3,54 s	6,64 s	4,47 s	3,99 s
Destičky v rychlých motorizovaných rotačních montážích		27,90 s	42,77 s	32,89 s	32,43 s

Tabulka 2: Celková doba analýzy jednoho vstupního stavu.

Při využití nejlepší posloupnosti projekcí je doba analýzy pomocí TN LC zařízení 6,2× rychlejší než analýza za použití fázových destiček v případě využití projekcí do stavů H, V, D, A, R a L a téměř 8× rychlejší pro projekce do čtyř stavů tvořících čtyřstěn.

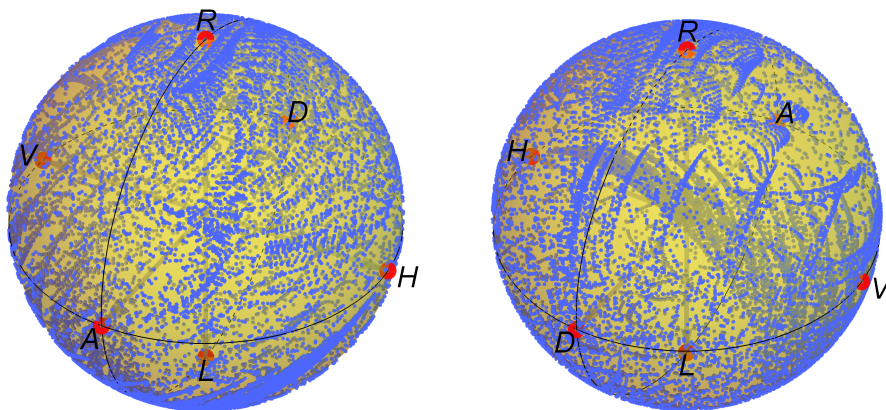
5 TN LC zařízení složené z trojice TN LC modulů

V předchozí části byla popsána konstrukce TN LC zařízení složeného z dvojice TN LC modulů a jedné fázové destičky. Jak se ukázalo, tato konfigurace je dostatečná pro pokrytí všech šesti základních polarizačních stavů H, V, D, A, R a L. Další možností, jak dosáhnout dostatečného pokrytí Blochovy sféry je použití tří TN LC modulů.



Obrázek 21: Schématické znázornění zařízení složeného z trojice TN LC modulů (LCm). Červeně je znázorněn průchod svazku.

Numerická simulace toho zařízení byla provedena na základě charakterizovaného matematického modelu, který popisuje transformaci prováděnou jedním TN LC modulem. Na základě předchozích měření a simulací byla uvažována konfigurace s TN LC moduly bez vložených fázových destiček (obrázek 21). Orientace TN LC modulů byla volena pevně, s vodorovnou orientací aktivního segmentu, z důvodu možnosti využití s více rovnoběžnými svazky.



Obrázek 22: Pokrytí obou polokoulí Blochovy sféry stavy připravenými pomocí TN LC zařízení tvořeného třemi TN LC moduly bez fázových destiček (modře). Červeně jsou na sféře vyznačeny stavy H, V, D, A, R a L.

Dle provedených numerických simulací je tato konfigurace vhodná pro přípravu stavů H, V, D, A, R a L i pro přípravu čtyř stavů tvořících pravidelný čtyřstěn. Pokrytí Blo-

chovy sféry TN LC zařízením složeného z trojice TN LC modulů bez fázových destiček je znázorněno na obrázku 22. Zařízení tvořené jen samotnými TN LC moduly je vhodnější pro použití, jelikož v experimentu vyžaduje méně prostoru a také je tvořeno méně prvky.

Zařízení tvořené trojicí TN LC modulů má ve srovnání se zařízením zkonstruovaným ze dvou TN LC modulů a jedné fázové destičky výhodu ve větším pokrytí Blochovy sféry a tím ve větší variabilitě stavů, které je zařízením možné připravit. Díky tomu je možné najít čtyřstěn s objemem blíže ideálnímu pravidelnému čtyřstěnu a také je možné přesněji nalézt polarizační stavy H, V, D, A, R a L. Nevýhodou zvyšování počtu TN LC modulů je stoupající složitost jejich řízení a složitost seřízení celého TN LC zařízení v experimentu.

6 Aplikace TN LC zařízení z dvojice TN LC modulů v analýze entanglovaných stavů

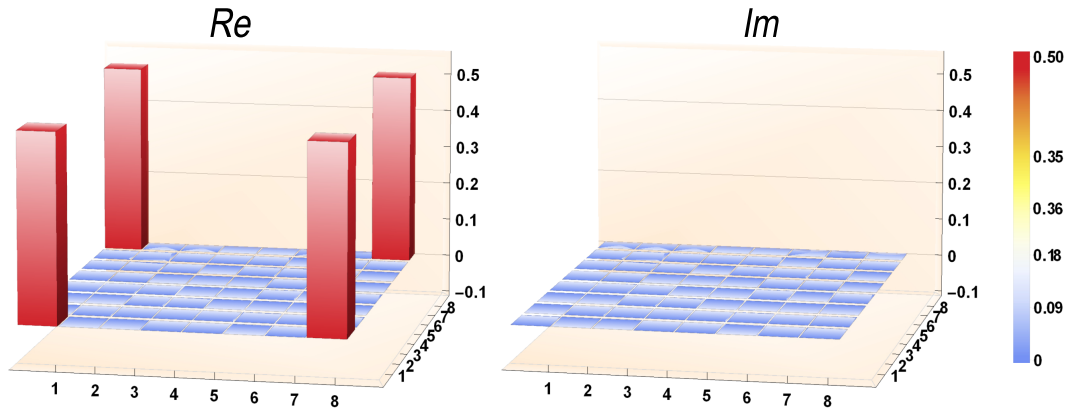
Pro ověření funkce TN LC zařízení jsme se rozhodli použít toto zařízení pro analýzu komplikovanějšího stavu několika kvantových bitů (qubitů), který vykazuje kvantové vlastnosti, například kvantovou provázanost (entanglement). Takovýto druh experimentu jsme volili s ohledem na otestování přenositelnosti TN LC zařízení mezi jednotlivými experimenty a také z důvodu otestování funkce zařízení na úrovni jednotlivých fotonů, abychom ověřili přenositelnost kalibrace provedené na silném signálu.

Více qubitové entanglované stavy je možné připravovat přímou generací [20], nebo jako výsledek aplikace univerzálních kvantových hradel, například kontrolované negace (CNOT) [21], Toffoliho hradlo (CCNOT) [22] a Fredkinovo hradlo (CSWAP) [23]. Všechna tato tři univerzální hradla mají společnou vlastnost, pokud jsou ovládána stavem superpozice, vytváří na svých výstupech entanglované stavy.

Aktuálně je v naší laboratoři vyvíjeno fotonické kvantové Fredkinovo hradlo. Toto hradlo jsme využili k přípravě entanglovaného GHZ (Greenberger–Horne–Zeilinger) stavu [24, 25] a provedli jeho analýzu pomocí TN LC zařízení. GHZ stav je dán maticí

$$\rho_{\text{GHZ}_{\text{ideal}}} = \frac{1}{2}(|000\rangle\langle 000| + |111\rangle\langle 111|) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Reálnou a imaginární část této matice můžeme znázornit graficky pomocí histogramu v podobě 3D grafu.

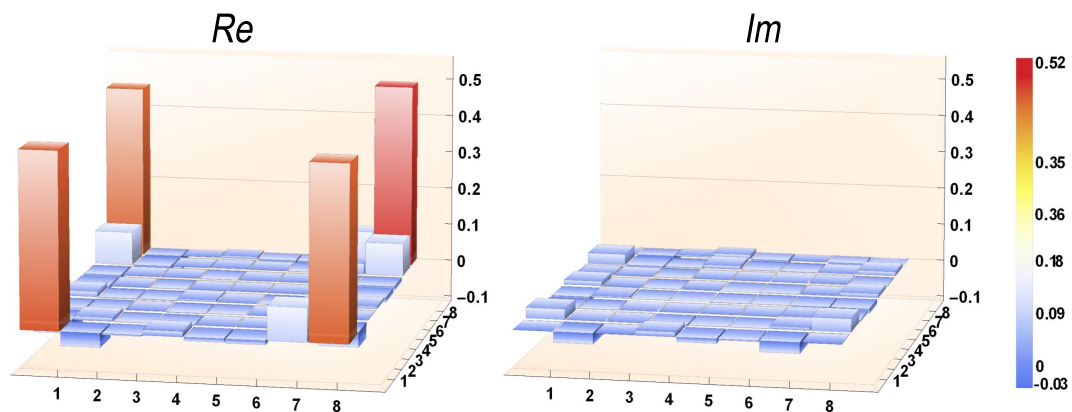


Obrázek 23: Reálná (Re) a imaginární (Im) část matice ideálního stavu GHZ.

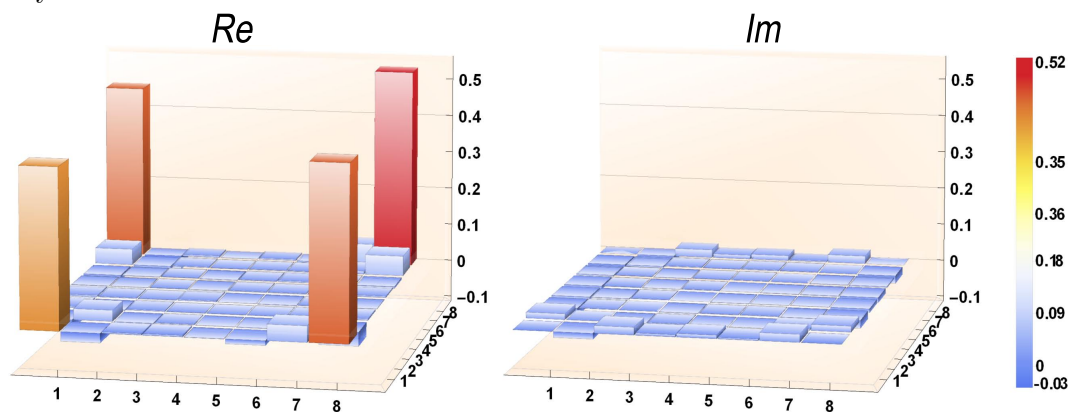
První bylo provedeno měření pomocí tří analýz realizovaných pomocí fázových destiček

v rychlých motorizovaných rotačních montážích. K analýze byla použita posloupnost projekcí H, V, D, A, R a L. Výsledný naměřený stav je znázorněn na obrázku (24). Následně byla jedna ze tří destičkových analýz nahrazena TN LC zařízením. Aby byla zachována kompatibilita s předchozími měřeními, zvolili jsme na TN LC zařízení projekce do sekvence stavů H, V, D, A, R a L. Následně bylo spuštěno stejné měření jako v předchozím případě, výsledná matice GHZ stavu je znázorněna na obrázku (25).

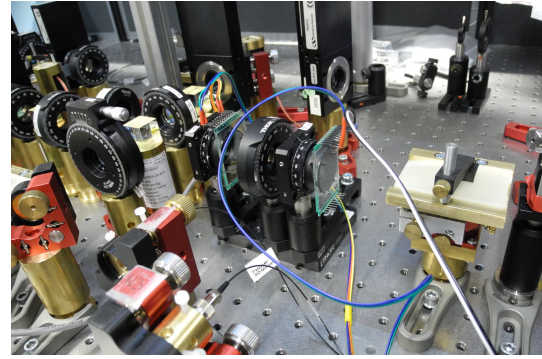
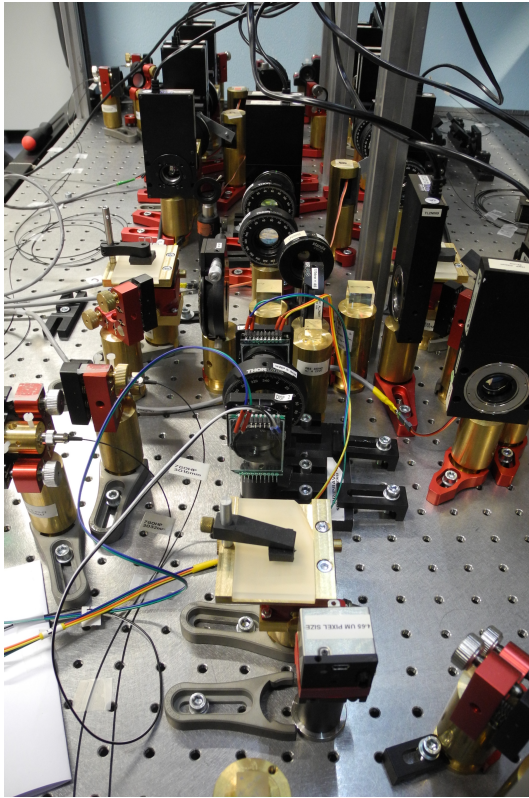
V případě destičkové analýzy se překryv stavů s ideálním pohybuje při opakovaných měřeních mezi hodnotami 0,90 a 0,94. V případě měření s TN LC zařízením byl překryv s ideálním GHZ stavem 0,94. Čistota stavů měřených destičkovou analýzou se pohybovala v rozmezí 0,89 a 0,92, s použitím TN LC zařízením byla čistota stavu 0,90. Měření s TN LC zařízením proběhlo zatím pouze jednou. S ohledem k typické opakovatelnosti tohoto experimentu s destičkovou analýzou nejsme schopni říct, zda výsledky s analýzou pomocí TN LC zařízením jsou lepší, či horší. Můžeme konstatovat, že analýza s využitím TN LC zařízením dává výsledky kompatibilní s destičkovou analýzou.



Obrázek 24: Reálná (Re) a imaginární (Im) část matice GHZ při rekonstrukci pomocí fázových destiček.



Obrázek 25: Reálná (Re) a imaginární (Im) část matice GHZ při rekonstrukci pomocí TN LC zařízení.



Obrázek 26: Umístění TN LC zařízení v experimentu kvantového Fredkinova hradla.

Průměrná doba nastavení jedné projekce pomocí destiček v rychlých motorizovaných rotačních montážích je 5,5 s. Nastavení všech šesti stavů pro analýzu jednoho qubitu tedy trvá 33 s. S využitím TN LC zařízení byla jedna projekce nastavena v průměru za 1 s, celá analýza jednoho qubitu tedy trvala 6s. Tímto došlo ke zkrácení režie nastavování měřících projekcí faktorem 5,5 \times . Ukazuje se, že celkový čas měření je negativně ovlivněn také režii komunikace s čítači Ortec. Tento problém je v současnosti v řešení s využitím čítače vyrobeným M. Dudkou. Eliminováním, či zmenšením režii nastavení projekcí a ovládání čítače předpokládáme urychlení celé analýzy.

7 Shrnutí

Cílem práce bylo studovat chování TN LC modulů a jejich možného použití v analýze a přípravě polarizačních stavů. V práci byl popsán postup úpravy sedmissegmentového displeje LUMEX LCD-S101D14TR k využití v optických experimentech, principy jeho řízení a charakterizace matematického modelu pro tento druh TN LC modulu. V práci byla popsána konstrukce a praktické použití TN LC zařízení složeného z dvojice TN LC modulů a jedné půlvlnné fázové destičky. Dále je v práci popsána konstrukce TN LC zařízení z trojice TN LC modulů na základě numerické simulace z charakterizovaného matematického modelu.

TN LC zařízení tvořené dvojicí TN LC modulů bylo sestrojeno na základě provedených numerických simulací. Vzhledem k uvažovanému využití tohoto zařízení, jak v minimální analýze, tak v analýze pomocí projekce do stavů H, V, D, A, R a L, byla provedena měření, jejichž cílem bylo prohledat napěťový podprostor TN LC zařízení a nalézt vhodné dvojice napětí. Tato měření byla provedena na základě výsledků z numerické simulace, bez fyzické změny natočení TN LC modulů nebo fázových destiček v TN LC zařízení. Pro zařízení, které bylo realizováno se podařilo nalézt vhodné nastavení pro pokrytí stavů H, V, D, A, R a L s průměrným překryvem s ideálními stavy 0,995, průměrná polarizovanost těchto šesti stavů byla 0,995. V případě hledání čtyř stavů tvořící čtyřstěn se povedlo najít stavy tvořící čtyřstěn, který zaujímá 0,988 objemu ideálního čtyřstěnu a průměrná polarizovanost těchto stavů byla 0,994.

Poté jsme provedli ověřovací měření, kdy jsme pomocí fázových destiček připravili požadované stavy H, V, D, A, R a L a provedli jejich analýzu pomocí TN LC zařízení. Z těchto měření lze vyvodit, že s kalibrací provedenou na tomto TN LC zařízení je vhodnější použít H, V, D, A, R a L analýzu, jelikož měřené stavy jsou polarizovanější.

Dále jsme ověřili aplikovatelnost TN LC zařízení v jiných experimentech, ve kterých je využita destičková analýza a pracují na jednofotonové úrovni s kvantovými bity. Na tomto bylo ověřeno, že integrace TN LC zařízení do dalších experimentů není složitá a nevyžaduje speciální úpravy experimentu.

Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že měření s TN LC moduly dává výsledky kompatibilní s výsledky získanými pomocí fázových destiček. Další výhodou je zkrácení časové náročnosti analýzy a tím i celého experimentu. Z naměřených časů analýzy vyplývá, že faktor urychlení je $5-8\times$ v závislosti na použité posloupnosti projekcí a volbě čtyř a šesti stavové analýzy. Avšak, aby se tato časová úspora projevila, je třeba aplikovat TN LC zařízení v experimentech, kde je právě příprava nebo analýza polarizačního stavu úzkým hrdlem experimentu. Jinak se pozitivní přínos rychlejšího nastavování polarizace ztratí v čekání na další periferie experimentu, jako jsou čítače a další.

Vzhledem k použití komerčně dostupných TN LC displejů je zařízení výrazně levnější než ekvivalentní kombinace půlvlnné a čtvrtvlnné fázové destičky v rychlých motorizovaných rotačních montážích.

Vzhledem k tomu, že se TN LC moduly při použití v experimentech osvědčily, budeme dále pokračovat ve vývoji TN LC zařízení, které umožní lépe pokrýt stavy základních

polarizací H, V, D, A, R a L a také nalezení čtveřice stavů, které v Blochově sféře vytvoří čtyřstěn bližší pravidelnému. K tomuto cíli může napomoci konfigurace TN LC zařízení s trojicí TN LC modulů. Dále se také budeme zabývat dalšími možnostmi zkrácení času přechodů mezi jednotlivými projekcemi, například chvilkovým přiložením vyššího napětí na TN LC modul a pak jeho snížením na požadovanou hodnotu. Tento postup by mohl přispět k dalšímu zkrácení času potřebného k přípravě a analýze polarizačního stavu.

Reference

- [1] B. Ma, B. Yao, Z. Li, T. Ye, *Improvement of the performance of the twisted-nematic liquid-crystal display as a phase modulator*, Applied Optics **50**, 2588-2593 (2001).
- [2] J. Nicoás, J. Campos, M. Yzuel, *Phase and amplitude modulation of elliptic polarization states by nonabsorbing anisotropic elements: application to liquid-crystal devices*, Journal of Optical Society of America **19**, 1013-1020 (2002).
- [3] H. Liu, J. Davis, R. Lilly, *Optical-data-processing properties of a liquid-crystal television spatial light modulator*, Optics Letters **10**, 635-637 (1985).
- [4] N. Riza, *High-optical-isolation low-loss moderate-switching-speednematic liquid-crystal optical switch*, Optics Letters **19**, 1780-1782 (1994).
- [5] R. Soref, D. McMahon, *Calcite 2×2 optical bypass switch controlled by liquid-crystalcells*, Optics Letters **7**, 186-188 (1982).
- [6] O. Aharon, I. Abdulhalim, *Liquid crystal Lyot tunable filter with extended free spectral range*, Optics Express **17**, 11426-11433 (2009).
- [7] Y. August, A. Stern, *Compressive sensing spectrometry based on liquid crystal devices*, Optics Letters **38**, 4996-4999 (2013).
- [8] Z. Hradil, J. Řeháček, J. Fiurášek, M. Ježek, *Maximum-Likelihood Methods in Quantum Mechanics*, Lecture Notes in Physics **649**, 59-112 (2004).
- [9] J. Řeháček, B. Englert, D. Kaszlikowski, *Minimal qubit tomography*, Physical Review **70**, 052321 (2004).
- [10] B. Saleh, M. Teich, *Fundamentals of Photonics* (John Wiley & Sons, 1991).
- [11] S. Perlmutter, D. Doroski, G. Moddela, *Degradation of liquid crystal device performance due to selective adsorption of ions*, Applied Physics Letters **69**, 1182-1184 (1996).
- [12] A. Yariv, R. Yeh, *Optical Waves in Crystals* (John Wiley & Sons, 1984).
- [13] I. Moreno, N. Bennis, J. A. Davis, C. Ferreira, *Twist angle determination in liquid crystal displays by location of local adiabatic points*, Optics Communications **158**, 231-238 (1998).
- [14] J. A. Davis, I. Moreno, P. Tsai, *Polarization eigenstates for twisted-nematic liquid-crystal displays*, Journal of Optical Society of America **37**, 937-945 (1998).
- [15] ThorLabs, LCC1xx3 Retarders Performance Data, [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/images/TabImages/LCC1xx3_Retardance_Data2.xlsx.

- [16] V. Krčmarský, *Tunable letters and variable interaction using polarization interferometers and liquid crystals*, diplomová práce, Univerzita Palackého Olomouc, Přírodovědecká fakulta, Olomouc (2016).
- [17] V. Krčmarský, *Polarization state control using liquid crystals*, bakalářská práce, Univerzita Palackého Olomouc, Přírodovědecká fakulta, Olomouc (2014).
- [18] M. Yamauchi, *Jones-matrix models for twisted-nematic liquid-crystal devices*, Journal of Optical Society of America **44**, 4484-4493 (2005).
- [19] A. Marquez, C. Iemmi, I. Moreno, J. A. Davis, J. Campos, M. J. Yzuel, *Quantitative prediction of the modulation behaviour of twisted nematic liquid crystal displays based on simple physical model*, The International Society for Optical Engineering **40**, 2558-2564 (2001).
- [20] N. Peters. One- and Two -Photon States for Quantum Information, disertační práce, University of Illinois at Urbana-Champaign (2006).
- [21] J. O'Brien, G. Pryde, A. White, T. Ralph, D. Branning, *Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate*, Nature **426**, 264-267 (2003).
- [22] B. Lanyon, M. Barbieri, M. Almeida, T. Jennewein, T. Ralph, K. Resch, G. Pryde, J. O'Brien, A. Gilchrist, A. White, *Simplifying quantum logic using higher-dimensional Hilbert spaces*, Nature Physics **5**, 134-140 (2009).
- [23] R. Patel, J. Ho, F. Ferreyrol, T. Ralph, G. Pryde, *A quantum Fredkin gate*, Science Advances **3**, e1501531 (2016).
- [24] D. Greenberger, M. Horne, A. Zeilinger, *Going beyond Bell's theorem*, Kluwer Academic Publisher, 69-72 (1989).
- [25] J. Pan, D. Bouwmeester, M. Daniell, H. Weinfurter, A. Zeilinger, *Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement*, Nature **403**, 515-519 (2000).