

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VLIV DVOJLOMU NA ZMĚNU POLARIZACE A FREKVENCE U SENZORICKÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN

BIREFRINGENCE INFLUENCE ON POLARIZATION CHANGES AND FREQUENCY ON OPTICAL FIBER
SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marco Panascí

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

Student: Marco Panascí

ID: 195408

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Vliv dvojlomu na změnu polarizace a frekvence u senzorických optických vláken

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem bakalářské práce je analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsoby zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli. Práce se zabývá okamžitou změnou polarizace světla a frekvence na základě působení vnějších vlivů a jejich analýzou. Cílem práce je navrhnout a realizovat soubor měření, které tyto vlivy analyzují.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] COLLETT, E. Field Guide to Polarization, SPIE Vol. FG05, 2005, ISBN: 9780819458681

[2] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, Brno, CENTA 2009 ISBN: 9788086785141

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem dvojlomu na změnu polarizace a frekvence u senzorických optických vláken. Cílem práce je navrhnout a realizovat soubor měření, které tyto vlivy analyzují. Teoretická část se zabývá rozbohem vlákna zachovávajícího polarizace, polarizaci světla a senzorickými optickými vlákny, u kterých jsou uvedeny některé výzkumy. Praktická část ujímá návrhem zapojení pracoviště, kontrolním měřením a reakci senzoru při odlišných teplotách. Po praktické části je otevřena diskuze nad změřenými hodnotami. Provedeným měřením se zjistilo, že toto senzorické optické vlákno reaguje na změnu teploty okolí optického vlákna. Hlavním výsledkem je, že se vlnová délka mění v závislosti na teplotě.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické vlákno, PANDA vlákno, Stokesovy vektory, Jonesovy vektory, spektrální analyzátor, polarimetr, frekvence, polarizace, senzor teploty, dvojlom

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with birefringence influence on polarization changes and frequency on optical fiber sensors. The objective of the thesis is to design and implement a set of measurements that analyze these effects. The theoretical part deals with analyzing the polarization-maintaining fiber, the polarization of the light, and the sensory optical fibers, with some research. The practical part deals with design of the workplace, control measurement and sensor response at different temperatures. After the practical part there is a discussion over the measured values. It was found that this sensory optical fiber responds to a change in the ambient temperature of the optical fiber. The main result is that the wavelength varies with temperature.

KEYWORDS

Optical fiber, PANDA fiber, Stokes vectors, Jones vectors, spectrum analyser, polarimeter, frequency, polarization, temperature sensor, birefringence

PANASCÍ, Marco. *Vliv dvojlomu na změnu polarizace a frekvence u senzorických optických vláken*. Brno, 2018, 63 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Vliv dvojlomu na změnu polarizace a frekvence u senzorických optických vláken“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. a konzultantovi panu Ing. Martinu Kyselákovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

podpis autora



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



Obsah

Úvod	11
1 Optické kabely	12
1.1 Jednovidová optická vlákna	13
1.2 Vlákna zachovávající polarizaci	13
1.2.1 Vlákna s nízkým dvojlomem	13
1.2.2 Vlákna s vysokým dvojlomem	14
1.2.3 HB vlákno vystavené stresovými prvky	14
1.2.4 PANDA	14
2 Polarizované světlo	16
2.1 Teorie polarizovaného světla	16
2.2 Záznějová délka	17
2.3 Lineárně polarizované světlo	18
2.4 Kruhově polarizované světlo	19
2.4.1 Levotočivě kruhově polarizované světlo	19
2.4.2 Pravotočivě kruhově polarizované světlo	20
2.5 Elipticky polarizované světlo	20
2.5.1 Deformované stavy polarizační elipsy	21
2.6 Poincarého koule	22
2.7 Stokesovy parametry	23
2.8 Stokesův vektor	26
2.9 Jonesův vektor	28
3 Senzorická optická vlákna	30
3.1 Senzory využívající změny polarizace světla	30
3.1.1 Hybridní optické vlákno s vysokým dvojlomem snímající deformaci a teplotu	30
3.1.2 Použití polarimetrického senzoru k naměření teploty u vlákna zachovávajícího polarizaci	31
3.1.3 Fázová odezva vlákna zachovávajícího polarizaci na změnu teploty	31
4 Návrh zapojení pracoviště	32
5 Kontrolní měření laserové diody	34
6 Reakce senzoru při referenční teplotě 24 °C	38

7	Reakce senzoru po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C	44
8	Reakce senzoru po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C	51
9	Diskuze	58
10	Závěr	60
	Literatura	61
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	63

Seznam obrázků

1.1	Optické vlákno	12
1.2	Příčný řez jednovlákenného vlákna a jeho šíření [6]	13
1.3	Průřezy jednotlivých druhů PM vláken, a) PANDA, b) motýlek, c) eliptický plášť [12]	15
1.4	Průřez kabelu PANDA, kde jdou vidět stresující tyče, mezi nimi jádro a rozložení pomalé a rychlé osy [7]	15
2.1	a) Nepolarizované světlo b) polarizované světlo c) polarizované světlo	16
2.2	Levotočivě kruhově polarizované světlo	20
2.3	Pravotočivě kruhově polarizované světlo	20
2.4	Deformované polarizační stavy na Poincarého kouli [14]	23
2.5	Poincarého koule ukazující kartézské souřadnice a hodnoty souřadnic χ a Ψ pro deformované polarizované stavy na povrchu koule [14] . . .	24
4.1	Schéma zapojení	32
5.1	Spektrum laserové diody, které bylo udávané na datovém listu	34
5.2	Závislost intenzity světla na vlnové délce pro celé spektrum laserové diody při kontrolním měření	35
5.3	Závislost maximální hodnoty, průměrné hodnoty a medián intenzity světla na vlnové délce při kontrolním měření	36
5.4	Závislost intenzity světla na čase pro speciální vlnové délky při kontrolním měření	37
5.5	Celková a průměrná intenzita světla při kontrolním měření	37
6.1	Jednotlivé Stokesovy parametry po celou dobu měření při referenční teplotě 24 °C	38
6.2	Závislost Stokesovy parametru S_3 na čase při referenční teplotě 24 °C	39
6.3	Závislost stupně polarizace na čase při referenční teplotě 24 °C	40
6.4	Závislost maximální hodnoty, průměrné hodnoty a mediánu intenzity světla na vlnové délce při referenční teplotě 24 °C	40
6.5	Závislost intenzity světla na vlnové délce při určitých intervalech při referenční teplotě 24 °C	41
6.6	Závislost intenzity světla na čase při referenční teplotě 24 °C, kde hlavní vlnová délka je 635,763 nm (zelené označení)	42
6.7	Závislost intenzity světla na čase před a po přiložení kádinky s vodou 24 °C	43
6.8	Závislost celkové a průměrné intenzity světla na čase při referenční teplotě 24 °C	43
7.1	Jednotlivé Stokesovy parametry po celou dobu měření při teplotě 0 °C	44
7.2	Závislost Stokesova parametru S_2 na čase při teplotě 0 °C	45

7.3	Závislost Stokesova parametru S_3 na čase při teplotě 0°C	46
7.4	Závislost stupně polarizace na čase při teplotě 0°C	46
7.5	Závislost maximální hodnoty, průměrné hodnoty a mediánu intenzity světla na vlnové délce při teplotě 0°C	47
7.6	Závislost intenzity světla na vlnové délce při určitých intervalech při teplotě 0°C	48
7.7	Závislost intenzity světla na čase při teplotě 0°C , kde hlavní vlnová délka je 635,841 nm (šedé označení)	49
7.8	Závislost intenzity světla na čase před a po přiložení kádinky s vodou 0°C	50
7.9	Závislost celkové a průměrné intenzity světla na čase při teplotě 0°C .	50
8.1	Jednotlivé Stokesovy parametry po celou dobu měření při referenční teplotě 48°C	51
8.2	Závislost Stokesova vektoru S_2 při teplotě 48°C	52
8.3	Závislost Stokesova vektoru S_3 při teplotě 48°C	53
8.4	Závislost stupně polarizace na čase při teplotě 0°C	53
8.5	Závislost maximální hodnoty, průměrné hodnoty a mediánu intenzity světla na vlnové délce při teplotě 48°C	54
8.6	Závislost intenzity světla na vlnové délce při určitých intervalech při teplotě 48°C	55
8.7	Závislost intenzity světla na čase při teplotě 48°C , kde hlavní vlnová délka je 635,841 nm (šedé označení)	56
8.8	Závislost intenzity světla na čase před a po přiložení kádinky s vodou 48°C	57
8.9	Závislost celkové a průměrné intenzity světla na čase při teplotě 48°C	57
9.1	Příklad přenosu signálu na více vlnových délkách	59

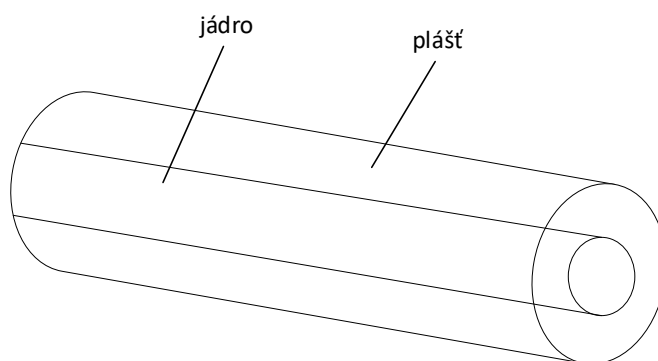
Úvod

V dnešní době se používají jednovidová optická vlákna, která slouží k přenosům dat na velkou vzdálenost. Dva navzájem kolmé módy v jednovidovém vlákne se šíří jinou fází a rychlostí. Jelikož optické vlákno není kruhově symetrické, ale je zkroucené nebo působí na vlákno anizotropní účinky, dochází k dvojlomu. Vlivem určité teploty na vlákno mohou nastat problémy při přenosu. Tato bakalářská práce se zabývá vlivem dvojlomu na změnu polarizace a frekvence u sensorických optických vláken. Cílem bakalářské práce je navrhnout soubor měření, který analyzuje při změně teploty změnu polarizace a frekvence na vlákne zachovávající polarizaci. Existují některé výzkumy, u kterých se zjišťovalo, jaký vliv bude mít změna teploty na polarizaci. Každý výzkum měl odlišné zapojení, odlišná optická vlákna zachovávající polarizaci. Málo výzkumů však zjišťovalo, jak se mění frekvence ve vlákne při změnách teploty, což je velkým motivačním prvkem k výběru této bakalářské práce. Hlavním faktorem výběru této bakalářské práce také bylo to, že se musí navrhnout vlastní soubor měření.

V první teoretické části jsou rozlišena jednotlivá optická vlákna, kde je dán větší důraz na vlákno zachovávající polarizaci. V druhé části je rozebrána teorie polarizovaného světla, která poslouží k pochopení problematiky této bakalářské práce. Ve třetí části je popsán základ sensorů v optických vláknech, který je doplněn výzkumy vědců, kteří se zabývali podobnou problematikou. V praktické části je uvedeno a popsáno schéma zapojení sensorického optického vlákna, které je navrženo k měření změny polarizace a frekvence na vlákne zachovávající polarizaci. Dále je uskutečněno kontrolní měření laserové diody, které slouží k porovnání naměřených hodnot s datovým listem, který udává prodejce. Hlavními klíčovými body jsou tři měření, kde na sensorické optické vlákno je přidána kádinka s vodou s referenční teplotou 24 °C a kádinka s vodou s teplotou 0 °C a 48 °C. Zjišťuje se změna polarizace a frekvence na vlákne zachovávající polarizaci a porovnávají se výsledky mezi těmito teplotami.

1 Optické kabely

Optické kabely [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] v dnešní době tvoří základ telekomunikačních přenosů. Nahrazují čím dál více metalické kabely, protože nevyhovují datově náročným službám. Velkou výhodou optického kabelu oproti metalickému kabelu je jeho velká šířka pásma, nižší útlum. Optické kabely jsou také elektrickými izolátory (odolné proti indukčním rušením) a mají nižší váhu. Optický kabel je tvořen optickými vlákny, které jsou vyrobeny z křemičitého skla. Křemičité sklo je velice čistá látka, která má malý útlum. V ojedinělých případech se může použít plastové optické vlákno, ale ztráty jsou poté pravděpodobnější u přenosů na dlouhou vzdálenost. Optické vlákno je tvořeno z dielektrického jádra, které je obklopeno dielektrickým pláštěm (zastává roli ochrannou), což lze vidět na obrázku (1.1).

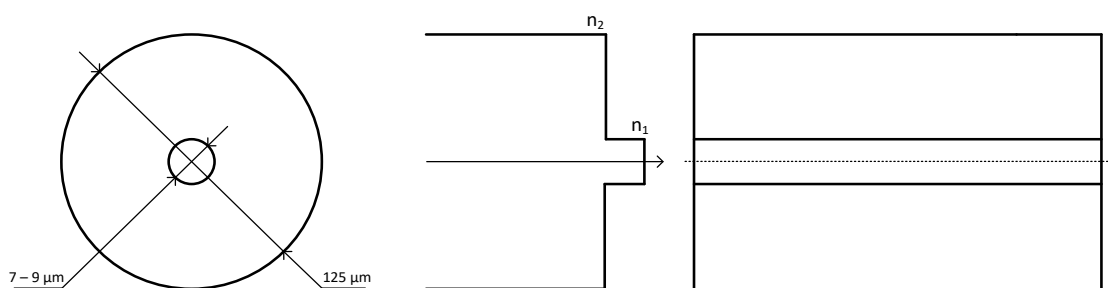


Obr. 1.1: Optické vlákno

V jádru optického vlákna se přenáší světelné paprsky (vidy). Z hlediska přenosu je nejvhodnější, aby se jádrem šířil pouze jeden vid (průřez jádra se rovná maximálně několika vlnovým délkám – takové tenké vlákno je obtížné zhotovit). Jejich přenosové vlastnosti jsou závislé na konstrukci optických vláken. Optická vlákna je možno rozdělit na vlákna jednovidová (SM, single – mode), která jsou vhodná pro přenosy na delší vzdálenost. Dalším typem optického vlákna je mnohovidové (MM, multi – mode), které se dělí na optické vlákno se skokovým indexem lomu a s gradientním indexem lomu. Tato vlákna jsou vhodná pro přenosy na kratší vzdálenost. Posledním typem jsou speciální optická vlákna, která jsou tvořena pro speciální účely, například pro zachování polarizace, což v této bakalářské práci bude takové vlákno použito.

1.1 Jednovidová optická vlákna

SM vlákna [4, 5, 6, 7, 8, 9] jsou vhodná pro přenosy na delší vzdálenost. Světlo je buzené laserovou diodou, takže přenos probíhá pouze na jedné vlnové délce. Jsou vyráběna pouze z křemičitého skla. Hlavní vlastností tohoto vlákna je šíření pouze jednoho vidu ve směru osy (obrázek 1.2). Je to způsobené tím, že čím menší je jádro, tím méně vidů se šíří. Aby se vláknem šířil pouze jeden vid, je potřeba, aby byl průměr jádra od $7\ \mu\text{m} - 9\ \mu\text{m}$. Průměr pláště by zase měl být $125\ \mu\text{m}$. Výhodou SM vláken je jejich nižší útlum než u MM vláken, větší výrobní tolerance, zachování spojitosti a stupně polarizace. U SM vláken je vidová disperze nulová. Pro přenos se používá vlnová délka od $1280\ \mu\text{m} - 1565\ \mu\text{m}$. Pro účely bakalářské práce toto vlákno není vyhovující.



Obr. 1.2: Příčný řez jednovidového vlákna a jeho šíření [6]

1.2 Vlákna zachovávající polarizaci

Vlákna zachovávající polarizaci (PM) [2, 4, 7, 11, 12, 17] vychází z podstaty SM vláken. Jejich hlavním úkolem je udržet stav polarizace po celou dobu přenosu (na dlouhé vzdálenosti). Ve vlákně se nachází rychlá osa a pomalá osa. Důležité je, aby polarizační směr polarizovaného světla byl přesně zarovnán podél jedné z os. Nevýhodou PM vláken je vysoká cena, polarizační osy musí být přesně zarovnány a mají vyšší ztráty propagace. PM vlákna se dělí na vlákna s nízkým dvojlomem (LB – low birefringence) nebo s vysokým dvojlomem (HB – high birefringence).

1.2.1 Vlákna s nízkým dvojlomem

Jsou to vlákna [2, 4, 7, 17] s malou hodnotou dvojlomu (dvojlom – pokud každý polarizační mód má jinou rychlost, tak vlákno má dvojlom). LB vlákna mají dvojlom v rozmezí $10^{-5} - 10^{-6}$. Vlákna mají větší vliv na vnější rušení (ohyby). Pokud

je potřeba použít toto vlákno, tak musí být perfektně geometrické a kompletně souměrné v celém vlákně. Tato vlákna jsou méně využívaná než HB vlákna. Pro účely bakalářské práce se vlákna s nízkým dvojlomem nebudou používat.

1.2.2 Vlákna s vysokým dvojlomem

Jsou to vlákna [2, 4, 7, 17] s velkou hodnotou dvojlomu (řádově větší než 10^{-5} , kde 10^{-4} je minimální hodnota na udržení polarizace). Vykazují vysoké ztráty kvůli velkému rozdílu indexu lomu mezi jádrem a pláštěm a nedokonalostí rozhraní. Propagační konstanty dvou ortogonálních polarizovaných módů jsou odlišné, takže spojení mezi dvěma módy je značně omezeno. Délka trvání polarizace se značí L_b a je definována jako

$$L_b = \frac{\lambda_0}{\beta_x - \beta_y}, \quad (1.1)$$

kde β_x a β_y jsou propagační konstanty dvou ortogonálních polarizovaných módů, λ_0 je šířka pásma. Nízká hodnota L_b značí vysokou kapacitu udržení polarizace. V HB vláknech jsou vestavěné asymetrie, které vedou k silnému dvojlomu (existují tři typy):

- Vytvoření eliptického jádra ve vlákně
- Stresové prvky v blízkosti jádra
- Pomocí fotonických krystalů

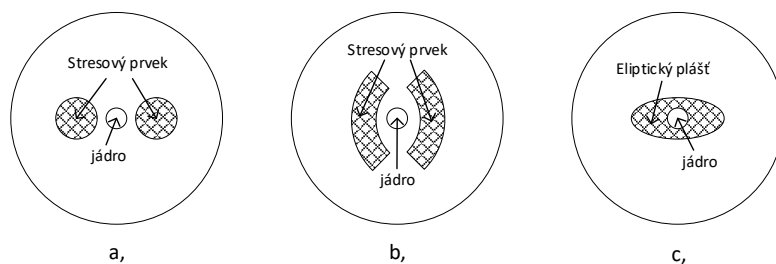
Pro měření bakalářské práce je využito HB vlákno se stresovými prvky.

1.2.3 HB vlákno vystavěné stresovými prvky

Stresový prvek [7, 12] je aplikován okolo jádra vlákna, který poskytuje mírně odlišné indexy lomu dvou pravoúhlých os (rychlá a pomalá osa). Tyto osy se musí srovnat s polarizovaným světlem. Při výrobě vlákna vlivem vnějšího ochlazování vzniká vestavné napětí. Existují tři druhy vláken s rozdílnými stresovými prvky. PANDA, motýlek nebo eliptický plášť (obrázek 1.3). V další části bude popsáno vlákno PANDA, kvůli využití v praktické části bakalářské práce.

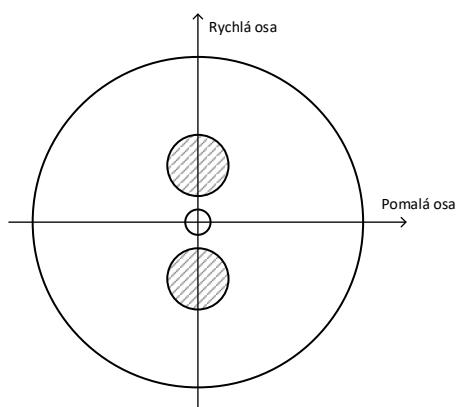
1.2.4 PANDA

Vlákno PANDA [7, 12] bylo vynalezeno japonskou firmou Nippon Telegraph and Telephone v počátcích 80. let. Je to kruhově symetrický kabel, do kterého jsou vrtány pomocí ultrazvuku dvě diametrálně protilehlé díry. Do nich jsou vloženy skleněné tyče dotované borem a oxidem křemičitým, které vzbuzují stres (obrázek 1.4). Čím větší je vzbuzený stres, tím větší je rozdíl rychlostí světla mezi dvěma osami a tím vyšší je i dvojlom. Pokud polarizované světlo je vyzářeno podél pomalé



Obr. 1.3: Průřezy jednotlivých druhů PM vláken, a) PANDA, b) motýlek, c) eliptický plášť [12]

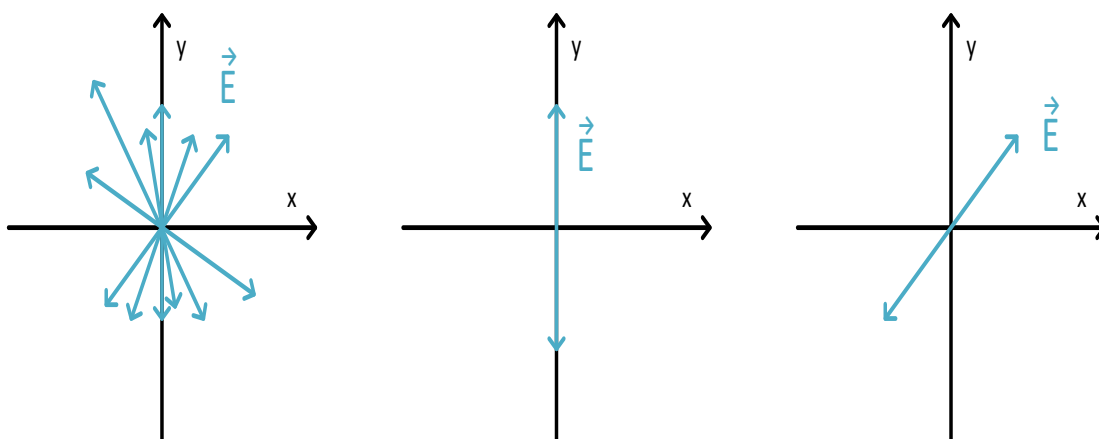
osy, tak je světlo nuceno cestovat pomaleji, než kdyby bylo vyzářeno podél rychlé osy (platí i naopak). Nejvíce se používá pomalá osa, protože je méně senzitivní ke ztrátám, které jsou zapříčiněny ohybem. Aby se příčně spojilo světlo z jedné osy na druhou, tak jsou potřeba rušení, která by byla schopna významně změnit rychlost přenášeného světla, což je velmi obtížné.



Obr. 1.4: Průřez kabelu PANDA, kde jdou vidět stresující tyče, mezi nimi jádro a rozložení pomalé a rychlé osy [7]

2 Polarizované světlo

Světlo je elektromagnetická vlna [14, 15, 16], která je popsána elektrickou intenzitou (\mathbf{E}) a magnetickou intenzitou (\mathbf{B}). Elektrická intenzita je kolmá ke směru šíření a magnetická intenzita je kolmá jak k elektrické intenzitě, tak i ke směru šíření. Tyto dvě intenzity kmitají v rovině kmitů. Světlo je viditelné pro lidské oko od 390 nm - 800 nm. Světlo, u kterého elektrická intenzita má náhodnou velikost i směr se nazývá nepolarizované světlo (například žárovka nebo slunce). Pokud tuto elektrickou intenzitu omezíme, aby měla stálou velikost i směr, tak světlo je polarizované (může být lineárně polarizované, kruhově polarizované nebo také elipticky polarizované), což jde vidět například na obrázku (2.1). Polarizované světlo může vzniknout například odrazem Brewsterovým úhlem, průchodem anizotropními krystaly, které vykazují dvojlom nebo průchodem polarizačními filtry.



Obr. 2.1: a) Nepolarizované světlo b) polarizované světlo c) polarizované světlo

2.1 Teorie polarizovaného světla

Základem v optickém poli [14, 15, 16, 17] jsou upravené Maxwellovy rovnice

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}, t), \quad (2.1)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu \mathbf{H}(\mathbf{r}, t), \quad (2.2)$$

kde $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ je síla elektrického pole, $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ je síla magnetického pole, $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ je elektrický posun, $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ je magnetická indukce, ε je permitivita a μ je permeabilita v daném médiu. Protože je potřeba, aby se optické pole šířilo optickým kabelem, tak

Maxwellová rovnice může být řešena pouze pro elektrické pole $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ nebo magnetické pole $\mathbf{H}(\mathbf{r},t)$. Důležitějším parametrem, který se bere pouze v potaz je elektrické pole $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$. Po matematických úpravách a přeměněním rovnice na 1 dimenzionální spektrum vzejde rovnice

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j}, \quad (2.3)$$

kde E_x a E_y jsou navzájem kolmé. Elektrické pole je vždy kolmé ke směru šíření. Když směr šíření je v z-směru, tak nebude existovat žádná složka elektrického pole v tomto směru. Pro lepší řešení, směr šíření se zvolí v z-směru, takže vzejde

$$E_x(z, t) = E_0 x \sin(\omega t - kz + \delta x), \quad (2.4)$$

$$E_y(z, t) = E_0 y \sin(\omega t - kz + \delta y). \quad (2.5)$$

2.2 Zánějová délka

Mezi základními vlastnostmi optického vlákna [14] je dvojlom a délka záněnění. Vlnové rovnice, které popisují šíření na sebe kolmých komponentů v optickém poli jsou

$$\nabla^2 \mathbf{E}_x(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{v_x^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}, \quad (2.6)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E}_y(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{v_y^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}, \quad (2.7)$$

V těchto vztazích se naleznou vztahy

$$\beta_x = \frac{n_x \omega}{c}, \quad (2.8)$$

$$\beta_y = \frac{n_z \omega}{c}, \quad (2.9)$$

kde β_x a β_y jsou propagační konstanty a v_x a v_y jsou rychlosti šíření v optickém prostředí. V anizotropních prostředích (optické vlákno) jsou x-ové a y-ové složky spojeny s rychlou a pomalou osou ve vláknech uchovávající polarizaci, kde je to psané jako

$$\beta_f = \frac{n_f \omega}{c}, \quad (2.10)$$

$$\beta_s = \frac{n_s \omega}{c}. \quad (2.11)$$

Dvojlom B v optickém vlákně je definován jako $B = \frac{\omega}{c}(n_f - n_s)$. Pokud se změní směr šíření na z-směr a odebere se reálná složka, tak vzniknou rovnice

$$E_x(z, t) = E_0 x \cos(\omega t - \beta_x z), \quad (2.12)$$

$$E_y(z, t) = E_0 y \cos(\omega t - \beta_y z). \quad (2.13)$$

Fázová rychlost pro každou složku je v_p a je definována jako

$$v_{p1} = \frac{\omega}{\beta_1} = \lambda_1 f, \quad (2.14)$$

$$v_{p2} = \frac{\omega}{\beta_2} = \lambda_2 f. \quad (2.15)$$

Místu, kde je maximální intenzita se říká záznění a rozdíl mezi zázněními je považován jako zázňejová délka, která je dána rovnicí

$$L_B = \frac{2\pi}{\beta_1 - \beta_2}, \quad (2.16)$$

pro vlnové délky je to vztah

$$L_B = \frac{2\pi}{\lambda_1 - \lambda_2}, \quad (2.17)$$

Velikost délky záznění se může napsat jako $L_B = \frac{2\pi}{(\beta_f - \beta_s)}$, kde β_f a β_s jsou šířící se složky navzájem kolmé v optickém poli (v optickém vlákně). Vlákna s nízkým L_B udrží polarizaci lépe. Je také nezávislá na délce vlákna. Při spuštění světla do vlákna s vysokým dvojlomem, rozdíl mezi pomalou a rychlou osou vede k rozdílným rychlostem šíření pro obě složky. Velikost L_B je délka, přes kterou je mezi dvěma komponenty opoždění fáze 2π . Je závislá na vlnové délce.

2.3 Lineárně polarizované světlo

Je to jeden ze způsobu polarizace světla [16, 17]. Může vzniknout pomocí dvojlomu, odrazem světla, lomem světla nebo pomocí polarizátorů. Takováto vlna má odlišné amplitudy, ale stejnou fázi. Pokud elektrická intenzita elektrického pole kmitá pouze jedním směrem se stejnou velikostí, tak lze říct, že je to světlo lineárně polarizované. Matematicky lze vyjádřit nejsnadněji

$$E_x = \mathbf{x} a \cos(\omega t - kz + \varphi_0), \quad (2.18)$$

kde $\omega = 2\pi f$ (úhlová rychlost), $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (velikost vlny), z je směr šíření, a je amplituda, φ_0 je fáze a \mathbf{x} je jednotkový vektor podél osy x . Také lineárně polarizovaná vlna

může mít úhel θ s osou x . Taková vlna je superpozicí dvou vln, která má komponenty x -ové a y -ové osy. Taková to vlna může být popsána

$$E_x = a \cos(\omega t - kz + \varphi_0), \quad (2.19)$$

$$E_y = a \sin(\omega t - kz + \varphi_0). \quad (2.20)$$

2.4 Kruhově polarizované světlo

Pokud ve volném prostoru [16, 17], špička elektrického pole se pohybuje okolo kružnice s narůstajícím časem, tak je řečeno, že světlo je kruhově polarizované. Vlna je vyjádřena superpozicí dvou navzájem kolmých a lineárně polarizovaných složek se stejnou amplitudou, ale rozdílnou fází o $\frac{\pi}{2}$

$$E_x = a \cos(\omega t - kz + \varphi_0), \quad (2.21)$$

$$E_y = a \cos(\omega t - kz \mp \frac{\pi}{2}) = \pm a \sin(\omega t - kz + \varphi_0). \quad (2.22)$$

Z rovnic (2.21) a (2.22) je konečná amplituda elektrického pole vyjádřena

$$E_x = \mathbf{x}a \cos(\omega t - kz + \varphi_0) \pm \mathbf{y}a \sin(\omega t - kz + \varphi_0). \quad (2.23)$$

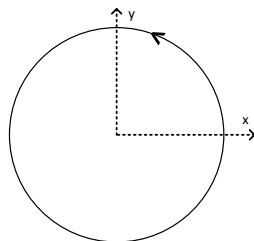
Kruhově polarizované světlo se může lišit podle znaménka z rovnice (2.23). Když je znaménko $+$, tak je to levotočivě kruhově polarizované světlo, pokud je znaménko $-$, tak je to pravotočivě kruhově polarizované světlo. Točení probíhá ve směru šíření. Fáze φ_0 zobrazuje úhel vektoru elektrického pole s x -ovou osou (při pozici $z=0$ a času $t=0$).

2.4.1 Levotočivě kruhově polarizované světlo

Pokud y -ová složka zaostává za x -ovou složkou ve fázi [16, 17], tak se vektor elektrického pole točí proti směru hodinových ručiček, což lze vidět na obrázku (2.2)

$$E_x = a \cos(\omega t - kz + \varphi_0), \quad (2.24)$$

$$E_y = a \cos(\omega t - kz - \frac{\pi}{2}) = a \sin(\omega t - kz + \varphi_0). \quad (2.25)$$



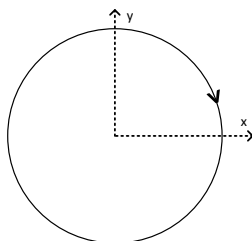
Obr. 2.2: Levotočivě kruhově polarizované světlo

2.4.2 Pravotočivě kruhově polarizované světlo

Pokud y-ová složka vede x-ovou složku [16, 17], tak se vektor elektrického pole točí po směru hodinových ručiček, kde to lze vidět na obrázku (2.3)

$$E_x = a \cos(\omega t - kz + \varphi_0), \quad (2.26)$$

$$E_y = a \cos(\omega t - kz + \frac{\pi}{2}) = -a \sin(\omega t - kz + \varphi_0). \quad (2.27)$$



Obr. 2.3: Pravotočivě kruhově polarizované světlo

2.5 Elipticky polarizované světlo

Vychází z podstaty kruhově polarizovaného světla [14, 15, 17, 18] pouze s tím rozdílem, že jeho průměr kruhu je menší. Hrot vektoru elektrického pole se šíří stylem elipsy. Rovnice se změjí na

$$E_x(z, t) = E_{0x} \sin(\tau + \varphi_x), \quad (2.28)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \sin(\tau + \varphi_y), \quad (2.29)$$

kde propagátor $\tau = (\omega t - kz)$. Složky $E_x(z, t)$ a $E_y(z, t)$ určují výsledný vektor. Po derivování rovnic (2.28) a (2.29) a jejich sečtením vzejde rovnice pro polarizovanou elipsu (2.30). Elipsa se nemění při šíření.

$$\frac{E_x^2(z, t)}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2(z, t)}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos(\varphi) = \sin^2(\varphi). \quad (2.30)$$

2.5.1 Deformované stavy polarizační elipsy

Polarizovaná elipsa [14, 18] může mít deformované stavy pro odlišné E_{0x} , E_{0y} a φ . Základními rovnicemi jsou

$$E_x(z, t) = E_{0x} \sin(\omega t - kz + \varphi_x), \quad (2.31)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \sin(\omega t - kz + \varphi_y). \quad (2.32)$$

Když $E_{0y} = 0$, tak $E_y(z, t) = 0$, z čehož plyne, že světlo je lineárně horizontálně polarizované

$$E_x(z, t) = E_{0x} \sin(\omega t - kz + \varphi_x), \quad (2.33)$$

$$E_y(z, t) = 0. \quad (2.34)$$

Když zase $E_{0x} = 0$, tak $E_x(z, t) = 0$, z čehož plyne, že světlo je lineárně vertikálně polarizované

$$E_x(z, t) = 0, \quad (2.35)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \sin(\omega t - kz + \varphi_y). \quad (2.36)$$

Další případem je, když $\varphi = 0$ nebo π . Polarizační elipsa se redukuje na vztah

$$E_y(z, t) = \pm \frac{E_{0y}}{E_{0x}} E_x(z, t). \quad (2.37)$$

Takový to případ se nazývá lineárně polarizované světlo se sklonem $\pm(\frac{E_{0y}}{E_{0x}})$. Pro $\varphi = \frac{\pi}{2}$ nebo $\varphi = \frac{3\pi}{2}$ se jedná o klasickou elipsu

$$\frac{E_x^2(z, t)}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2(z, t)}{E_{0y}^2} = 1. \quad (2.38)$$

Posledním případem je, když $E_{0x} = E_{0y} = E_0$, tak z polarizované elipsy se stane kruh, který je orientován buď pravotočivě nebo levotočivě podle kladné nebo záporné fáze

$$\frac{E_x^2(z, t)}{E_0^2} + \frac{E_y^2(z, t)}{E_0^2} = 1. \quad (2.39)$$

Pokud vrcholy amplitud jsou konstantní a mění se pouze fáze, tak se mění elipticita polarizované elipsy a také se tato elipsa otáčí. Změna fáze má vliv jak na rotaci, tak i na elipticitu.

2.6 Poincarého koule

Polarizační elipsou [14, 15, 17, 18] je užitečné vidět chování polarizovaného světla. U šířeného polarizovaného světla se mění jeho orientace, elipticita. Nová orientace a elipticita lze spočítat, ale je to velmi zdlouhavý proces. Místo toho existuje rychlejší postup a to je použitím Poincarého kouli, která polarizovanou elipsu zmapuje jako bod na kouli. Nová polarizovaná elipsa s novou orientací a elipticitou je charakterizována jako další bod na kouli. Délka dvou propojených polarizačních stavů představuje efekt polarizovaného prvku. Poincarého koule je nejvíce používaná v oblastech optických vláken, kde se propočítává efekt zpomalení u polarizovaného světla. Vědec H. G. Jerrard zjistil po několika matematických propočítání, že rovnice pro kouli je

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1, \quad (2.40)$$

kde x , y a z jsou Kartézské souřadnice os v kouli. Jerrard také zjistil, že jakýkoliv bod na kouli lze popsat úhlem orientace Ψ (zeměpisná šířka) a úhlem elipticity χ (zeměpisná délka) vyjádřené rovnicemi

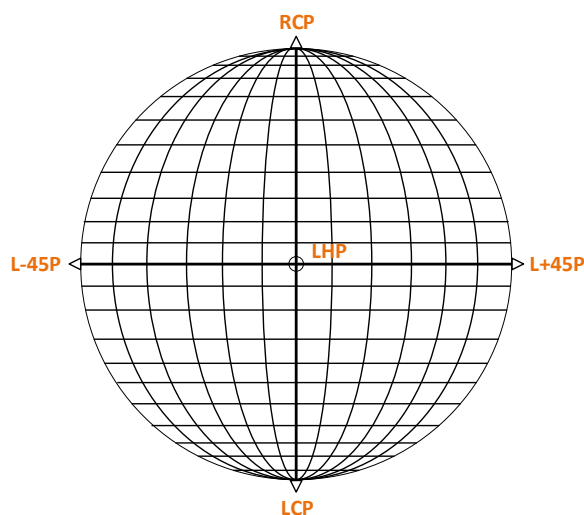
$$x = \cos(2\chi) \cos(2\Psi), \quad (2.41)$$

$$y = \cos(2\chi) \sin(2\Psi), \quad (2.42)$$

$$z = \sin(2\chi). \quad (2.43)$$

Deformované stavy a jejich trojice bodů je

1. LHP: $\chi = 0, \Psi = 0, (1,0,0)$
2. L+45P: $\chi = 0, \Psi = \frac{\pi}{4}, (0,1,0)$
3. LVP: $\chi = 0, \Psi = \frac{\pi}{2}, (-1,0,0)$
4. L-45P: $\chi = 0, \Psi = \frac{3\pi}{4}, (0,-1,0)$
5. RCP: $\chi = \frac{\pi}{4}, \Psi = 0, (0,0,1)$
6. LCP: $\chi = \frac{-\pi}{4}, \Psi = 0, (0,0,-1)$



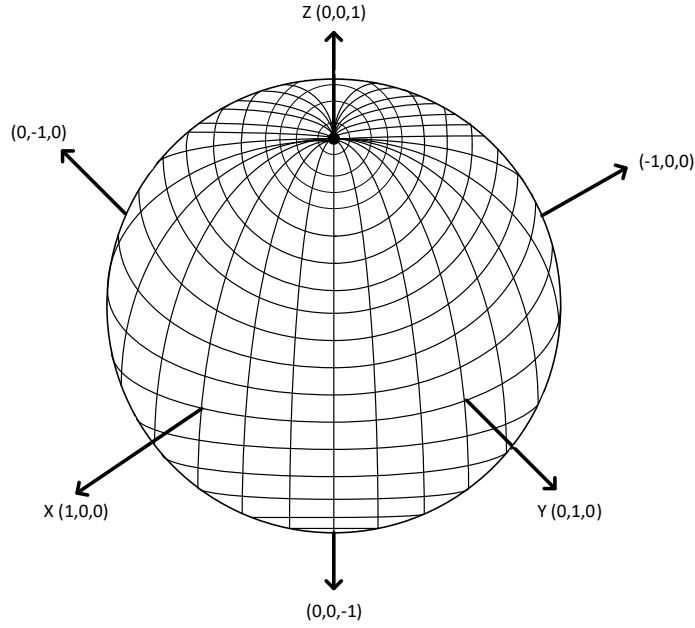
Obr. 2.4: Deformované polarizační stavy na Poincarého kouli [14]

Na obrázku (2.4) jsou zobrazeny deformované polarizační stavy na Poincarého kouli. Všechny stavy lineárně polarizovaného světla (LP) jsou vykreslené na rovníku. Pravotočivé a levotočivé kruhové polarizační světlo se objevuje na severním a jižním pólu koule. Ostatní polarizované stavy jsou elipticky polarizované a zobrazené někde na kouli. Lineárně vertikálně polarizované světlo na obrázku (2.4) není vidět, protože se objevuje na zadní straně koule (naproti LHP). Tučně zvýrazněná horizontální čára představuje rovník a tučně zvýrazněná vertikální čára představuje nultý poledník.

2.7 Stokesovy parametry

Paprsek světla [14, 15, 17, 18] se šíří prostorem a vektor světla sleduje elipsu nebo nějakou formu elipsy (kruh, rovná čára) v čase řádově 10^{-15} sekund. Takovýto čas nedovolí sledování elipsy jako šíření paprsku a je těžké sledovat polarizační elipsu v optické časové oblasti. Dále musí polarizační elipsa být úplně polarizovaná, aby se světlo mohlo popsat. Dá se změřit pouze intenzita světla a ne její amplituda, která je potřeba, takže polarizační elipsa musí být přeměněna, aby byly k dispozici pouze intenzity. Za účelem určení pozorovatelných parametrů polarizační elipsy (intenzita a chování polarizace) je potřeba přeměnit rovnici pro polarizovanou elipsu na intenzitu. Tím pádem vzniknou čtyři důležité parametry, které se nazývají Stokesovými polarizačními parametry pro rovinnou vlnu

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \quad (2.44)$$



Obr. 2.5: Poincarého koule ukazující kartézské souřadnice a hodnoty souřadnic χ a Ψ pro deformované polarizované stavy na povrchu koule [14]

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2, \quad (2.45)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \varphi, \quad (2.46)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \varphi. \quad (2.47)$$

Vztah intenzity při pozorování nebo měření je dáno jako $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$. S_0 je totální intenzita optického pole. S_1 popisuje intenzitu lineárně vertikálního a lineárně horizontálního polarizovaného světla. S_2 zase popisuje intenzitu lineárně 45° polarizovaného světla nebo lineárně -45° polarizovaného světla. Poslední parametr S_3 popisuje intenzitu pravotočivě či levotočivě kruhově polarizovaného světla. Vždy se musí použít časový průměr polarizační elipsy, aby se získaly tyto čtyři Stokesovy parametry.

1. Lineárně horizontálně polarizované světlo

Zde platí $E_{0y} = 0$.

$$\begin{aligned} S_0 &= E_{0x}^2 \\ S_1 &= E_{0x}^2 \\ S_2 &= 0 \\ S_3 &= 0 \end{aligned} \tag{2.48}$$

2. Lineárně vertikálně polarizované světlo

Zde platí $E_{0x} = 0$.

$$\begin{aligned} S_0 &= E_{0y}^2 \\ S_1 &= -E_{0y}^2 \\ S_2 &= 0 \\ S_3 &= 0 \end{aligned} \tag{2.49}$$

3. Lineárně $+45^\circ$ polarizované světlo

Podmínkou je $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ a $\varphi = 0$.

$$\begin{aligned} S_0 &= 2E_0^2 \\ S_1 &= 0 \\ S_2 &= 2E_0^2 \\ S_3 &= 0 \end{aligned} \tag{2.50}$$

4. Lineárně -45° polarizované světlo

Podmínky jsou stejné jako u lineárně 45° polarizovaného světla s rozdílem $\varphi = \pi$.

$$\begin{aligned} S_0 &= 2E_0^2 \\ S_1 &= 0 \\ S_2 &= -2E_0^2 \\ S_3 &= 0 \end{aligned} \tag{2.51}$$

5. Pravotočivě kruhově polarizované světlo

Podmínkou získání pravotočivě kruhově polarizovaného světla je $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ a $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

$$\begin{aligned} S_0 &= 2E_0^2 \\ S_1 &= 0 \\ S_2 &= 0 \\ S_3 &= 2E_0^2 \end{aligned} \tag{2.52}$$

6. Levotočivě kruhově polarizované světlo

Podmínka je stejná jako u pravotočivě kruhově polarizovaného světla s rozdílem $\varphi = \frac{3\pi}{2}$.

$$\begin{aligned}
S_0 &= 2E_0^2 \\
S_1 &= 0 \\
S_2 &= 0 \\
S_3 &= -2E_0^2
\end{aligned}
\tag{2.53}$$

2.8 Stokesův vektor

Vychází z podstaty [14, 15, 17] čtyř Stokesových parametrů s rozdílem, že jsou uspořádány a psány v matici 4x1

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}.
\tag{2.54}$$

Matematicky tohle není vektor, ale ve společnosti se tomu nazývá vektor. Matice elipticky polarizovaného světla vypadá takhle

$$S = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x} + E_{0y} \cos \varphi \\ 2E_{0x} + E_{0y} \sin \varphi \end{pmatrix}.
\tag{2.55}$$

Tato matice je Stokesův vektor pro rovinnou vlnu. Teď je potřeba popsat šest deformovaných polarizačních stavů pomocí Stokesova vektoru.

1. Lineárně horizontálně polarizované světlo

Podmínka je $E_{0y} = 0$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},
\tag{2.56}$$

kde $I_0 = E_{0x}^2$ je totální intenzita.

2. Lineárně vertikálně polarizované světlo

Podmínka je $E_{0x} = 0$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},
\tag{2.57}$$

kde $I_0 = E_{0y}^2$ je totální intenzita.

3. Lineárně +45° polarizované světlo

Podmínka je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = 0$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.58)$$

kde $I_0 = 2E_0^2$ je totální intenzita.

4. Lineárně -45° polarizované světlo

Podmínka je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = \pi$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.59)$$

kde $I_0 = 2E_0^2$ je totální intenzita.

5. Pravotočivě kruhově polarizované světlo

Podmínka je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2.60)$$

kde $I_0 = 2E_0^2$ je totální intenzita.

6. Levotočivě kruhově polarizované světlo

Podmínka je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = \frac{3\pi}{2}$.

$$S = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad (2.61)$$

kde $I_0 = 2E_0^2$ je totální intenzita.

Stokesovy polarizační parametry mohou být také vyjádřeny jako úhly rotace a elipticity polarizované elipsy

$$\begin{aligned} S_1 &= S_0 \cos(2\chi) \cos(2\Psi), \\ S_2 &= S_0 \cos(2\chi) \sin(2\Psi), \\ S_3 &= S_0 \sin(2\chi). \end{aligned} \quad (2.62)$$

2.9 Jonesův vektor

Jonesův vektor [14, 17] se oproti tomu Stokesova liší tím, že místo intenzity se zabývá amplitudou. Jonesův vektor je dán jako

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}e^{j\varphi_x} \\ E_{0y}e^{j\varphi_y} \end{pmatrix}, \quad (2.63)$$

kde E_{0x} a E_{0y} jsou amplitudy v reálné velikosti.

Jonesovy vektory pro deformované stavy kompletně polarizovaného světla jsou

1. Lineárně horizontálně polarizované světlo

Pro tenhle stav platí podmínka $E_y = 0$.

$$\mathbf{E}_{\text{LHP}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.64)$$

2. Lineárně vertikálně polarizované světlo

Pro tenhle stav platí podmínka $E_x = 0$.

$$\mathbf{E}_{\text{LVP}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.65)$$

3. Lineárně $+45^\circ$ polarizované světlo

Podmínka je $E_x = E_y$, takže $2E_{0x} = 1$.

$$\mathbf{E}_{\text{L}+45\text{P}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.66)$$

4. Lineárně -45° polarizované světlo

Podmínka je $E_x = -E_y$, takže $2E_{0x} = 1$.

$$\mathbf{E}_{\text{L}L-45\text{P}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (2.67)$$

5. Pravotočivě kruhově polarizované světlo

Podmínka je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = \frac{\pi}{2}$, takže $2E_{0x} = 1$.

$$\mathbf{E}_{\text{RCP}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}. \quad (2.68)$$

6. Levotočivě kruhově polarizované světlo

Podmínka je $E_{0x} = E_{0y}$ a $\varphi = \frac{-\pi}{2}$, potom tedy $2E_{0x} = 1$.

$$\mathbf{E}_{\text{LCP}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix}. \quad (2.69)$$

K zjištění Jonesového vektoru elipticky polarizovaného světla je potřeba sečíst navzájem Jonesův vektor pro lineárně horizontálně a vertikálně polarizované světlo

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{LHP}} + \mathbf{E}_{\text{LVP}} = \begin{pmatrix} E_{0x}e^{j\varphi_x} \\ E_{0y}e^{j\varphi_y} \end{pmatrix} = \mathbf{E}_{\text{ELP}}.$$

3 Senzorická optická vlákna

Optická senzorická vlákna [19, 20] byla hlavně vyvíjena kolem roku 1970 a jejich hlavním účelem je efektivní měření, které může doplnit důležité informace v klíčových oblastech optiky. Velkou výhodou je to, že jsou lehké, cenově dostupné a jsou imunní proti elektromagnetickým rušením. V praktickém využití mohou měřit například teplotu, tlak nebo další chemické vlastnosti. Tato senzorická vlákna se mohou dělit na vnitřní a vnější. U vnějších senzorů je světlo vedené vláknem ze zdroje k detektoru. Vzájemné působení světla a nějakého vlivu probíhá mimo vlákno (senzor je mimo vlákno). Výhodou je pružnost vlákna a nízký útlum. Tento typ se například používá u fotonického snímače nebo u elektrooptických technik. Vnitřní senzory se zase nalézají uvnitř vlákna. Hlavní podsekcí vnitřních senzorů jsou interferometry (jsou pasivními senzory – nepotřebují elektrickou energii na hlavu snímače). Dále se senzory mohou klasifikovat tím, zda snímač provádí měření specifického bodu v místě nebo zda snímač nabízí možnost distribuovaného měření (OTDR – Optical Time Domain Reflectometry). Posledním typem senzoru je skoro - distribuovaný senzor, kde jsou bodové senzory spojeny mezi sebou, aby poskytly řadu specifických měřicích bodů podél vláknové smyčky. V této bakalářské práci je potřeba senzor, který reaguje na změnu teploty.

3.1 Senzory využívající změny polarizace světla

Pro praktickou část bakalářské práce se budou používat senzory využívající změnu polarizace světla. Prvně je ale potřeba si ukázat pár výzkumů, které se zabývají problematikou polarizace světla, kde na senzorické optické vlákno působí různé teploty, které mění polarizaci světla.

3.1.1 Hybridní optické vlákno s vysokým dvojlomem snímající deformaci a teplotu

V tomto výzkumu se používají vlákna zachovávající polarizaci [21] s vysokým dvojlomem (nazývající se polarimetrická senzorická vlákna), která používají polarizační (fázovou) modulaci ve vnitřní části optického vlákna, aby mohli vnímat vnější vlivy. U těchto vláken rozdíl fází dvou navzájem kolmých a polarizovaných režimů je dostatečně velký, aby se zabránilo spojení mezi těmito dvěma módy. Mají vysokou dvojlomnost. Symetrický deformační efekt ovlivňuje konstantu šíření β v obou módech (důvodem je změna indexů lomu jádra a pláště). Zjištění změny fáze, která je způsobena změnou teploty nebo deformací vlákna se měří s polarimetrem. HB vlákna jsou uložena mezi kompozitním materiálem (vytvořen z různých prvků). Jedno HB

vlákno je s bočními otvory (podobné jako PANDA s rozdílem, že jsou dva otevřené kanály v místě stresových tyčí). Druhé je HB vlákno z fotonických krystalů. Do vláken je vyzářeno světlo laserové diody. Výsledkem měření je, že při deformaci i změně teploty se mění fáze mezi oběma polarizačními módy. U HB vlákna z fotonických krystalů se fáze polarizačních módů mění pouze v důsledku deformace vlákna. Při změně teploty je vlákno necitlivé.

3.1.2 Použití polarimetrického senzoru k naměření teploty u vlákna zachovávajícího polarizaci

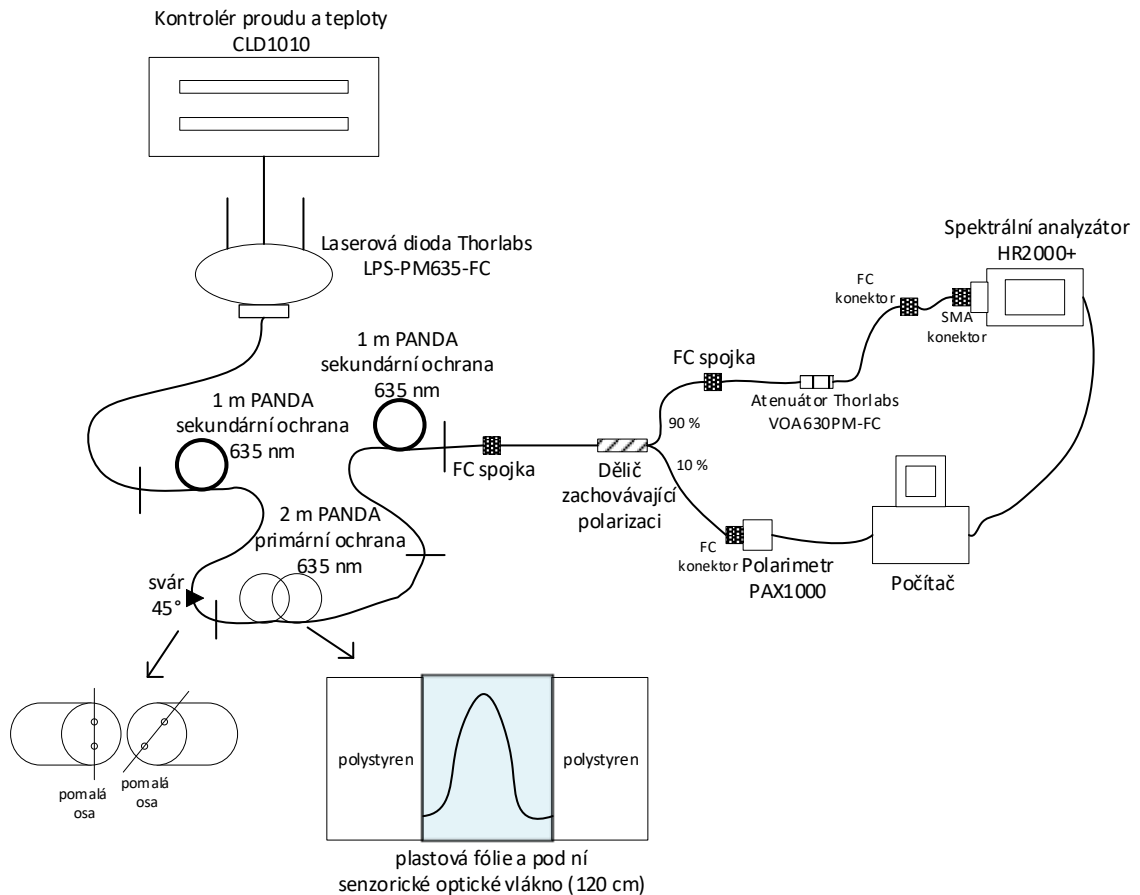
Poslední výzkum provádí testování [22] pomocí polarimetrické metody (metoda je známá tím, že světlo je vyzářeno úhlem 45° k vybuzení rychlé i pomalé osy) PANDA vlákno, na které působí různé teploty a měří se změna fázového posunu. Laserová dioda vyzařuje paprsek do čtvrtvlnné desky (změní lineárně polarizované světlo na kruhově polarizované světlo), kde potom pokračuje polarizátorem. Vlákno je ponořeno do parafínového oleje pomocí měkké svorky. Změna teploty se prováděla pomocí ohřívací desky a suchého ledu. Vlákno dále bylo připojeno k analyzátoru a fotoelastického modulátoru (moduluje polarizaci světla, fotoelastický efekt se používá ke změně dvojlomu optického prvku). Při zvyšování teploty se fázový posun u PANDA vlákna pořád zvyšoval, jehož výsledkem bylo $7,57/\text{m}^\circ\text{C}$.

3.1.3 Fázová odezva vlákna zachovávajícího polarizaci na změnu teploty

Výzkum se zabýval fázovou odezvou při vlivu vnější teploty na senzorické optické vlákno [23]. Bylo použito vlákno zachovávající polarizaci, u kterého jsou vybuzeny oba polarizační módy. Světlo je buzeno pomocí laserové diody, která vyzařuje koherentní polarizované světlo (lineárně vertikálně polarizované světlo). Na senzorické optické vlákno působila vždy kádinka s vodou s teplotou v rozmezí od 0°C po 48°C (krok mezi jednotlivými teplotami bylo 8°C a referenční teplota okolí byla 24°C). Senzorické optické vlákno bylo umístěno mezi dvěma polystyreny, nad kterými byla plastová fólie. Toto vlákno nemělo sekundární ochranu. Vlákno (se sekundární ochranou) pokračovalo do polarimetru, který zobrazoval výsledky měření. Na senzorické optické vlákno působila kádinka s vodou 330 s. Z výsledku je patrné, že při přiložení kádinky s vodou se ihned začal měnit Stokesův parametr S_2 a S_3 . Po odebrání kádinky se pomalu začaly oba parametry ustalovat (protože se začala ustalovat teplota okolo senzoru). Stejně výsledky vyšly i pro měření fáze senzorického optického vlákna. Tento výzkum dokázal, že lze použít vlákno zachovávající polarizaci s vysokým dvojlomem jako senzor změny teploty.

4 Návrh zapojení pracoviště

V teoretické části bylo rozebráno vlákno zachovávající polarizaci (PANDA), polarizované světlo, Poincarého koule, Stokesovy a Jonesovy parametry. Tyto všechny teoretické posudky se uplatní v praktické části. Bylo navrženo schéma zapojení, které je zobrazeno na obrázku (4.1) a které bylo otestováno na externím pracovišti na Univerzitě obrany v Brně.



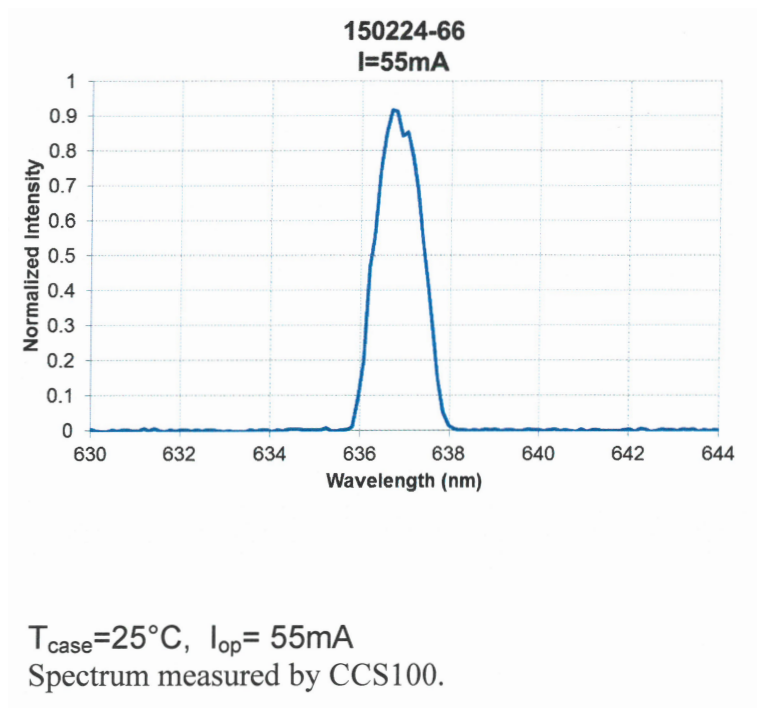
Obr. 4.1: Schéma zapojení

Na začátku schéma se nachází kontrolér teploty a proudu CLD1010 (firmy Thorlabs), který měří teplotu a proud laserové diody. Jednou z výhod je, že je odolný proti vysokým teplotám. Dále ve schématu následuje laserová dioda LPS-PM635-FC, která pracuje na vlnové délce od 625 nm–640 nm. Na toto měření se bude využívat vlnová délka 635 nm. Výhodou této laserové diody je to, že vyzařuje koherentní polarizované světlo (lineárně vertikálně polarizované světlo), které má vysoký stupeň polarizace (až 99,9%). Laserová dioda dále vyzařuje do jednometrového PANDA vlákna se sekundární ochranou, které pracuje na vlnové délce 635 nm. Na konci tohoto vlákna dochází ke sváru s dvoumetrovým PANDA vlákem, kde obě vlákna

jsou vzájemně pootočena o 45° kvůli tomu, aby byly vybudeny obě osy polarizace (protože předtím byla buzena pouze jedna osa). Vybuděním obou os bude světlo kruhově polarizované. Toto dvoumetrové PANDA vlákno nemá sekundární ochranu a slouží jako senzor (mezi vlákny jsou polystyrenové obaly a plastová fólie, aby měření neovlivňovala vnější prostorová teplota). Při měření se bude na fólii přikládat kádinka vody s určitou teplotou, která by měla zkruslovat hodnoty polarizace a frekvence. Dále následuje jednovetrové PANDA vlákno (má sekundární ochranu proto, aby už na vlákno nepůsobily jiné vnější teploty a nezkruslovaly měření), které vede do FC spojky a poté je připojeno do děliče zachovávající polarizaci. Dělič zachovávající polarizaci je vhodný k tomu, aby rozdělil vstupní signál na dva výstupní (90 % výkonu jde do spektrálního analyzátoru a 10 % výkonu do polarimetru). Jeden z výstupů jde do polarimetru PAX1000, který je připojený k počítači (předtím je vlákno připojené k polarimetru přes FC konektor). Tento polarimetr slouží k tomu, aby zobrazil pouze polarizované světlo na Poincarého kouli a jeho Stokesovy parametry na programu v počítači (polarimetr zde slouží spíše jako kontrola). Druhý výstup jde do spektrálního analyzátoru HR2000+ (předtím je použita FC spojka a za ní následuje atenuátor, který sníží výkon signálu, protože do spektrálního analyzátoru může značná část výkonu, jinak by poté spektrální analyzátor nevykresloval hodnoty). Ještě před spektrálním analyzátozem se nachází FC konektor, který je připojený ke vstupu SMA. Spektrální analyzátor slouží k analýze signálu (jeho frekvenci). Je vyrobený na zakázku a jeho velkou výhodou je, že jeho vrypy jsou vytvořeny tak hustě, aby byla možnost změřit vlnovou délku na přesnost jedné tisícinny nm. Spektrální analyzátor je také připojený k počítači. Bude se zjišťovat, zda se frekvence vlákna bude měnit při změnách teploty na senzorickém optickém vlákne.

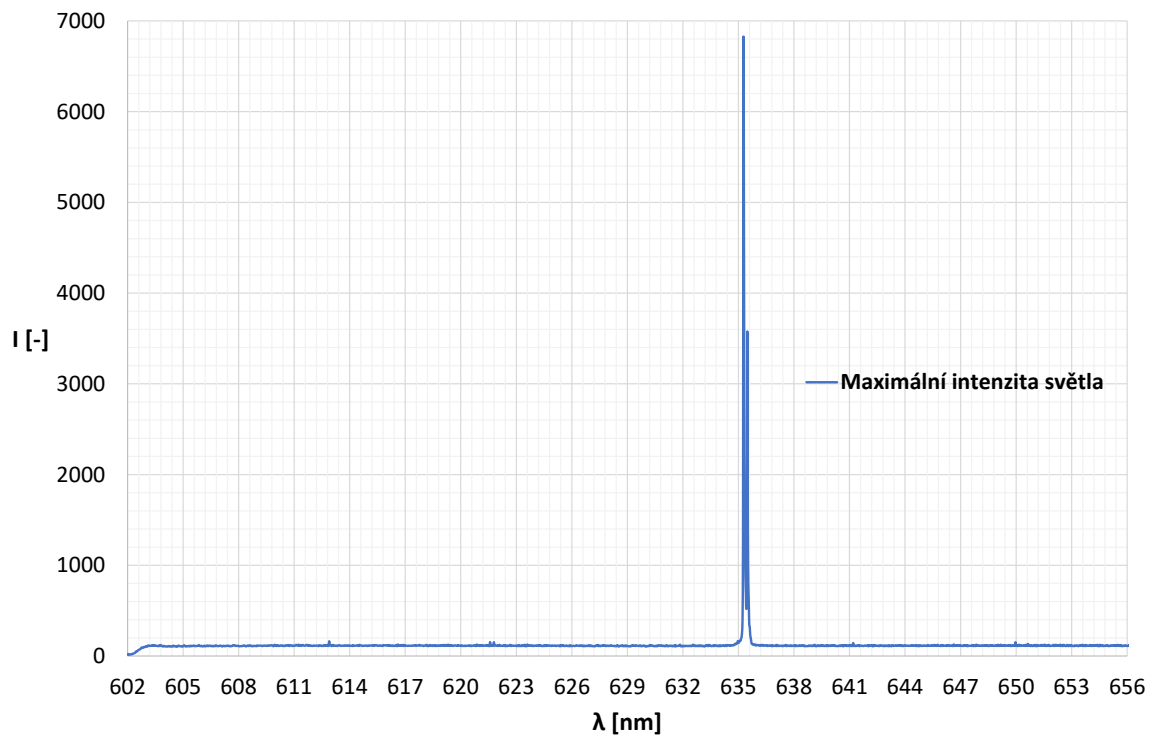
5 Kontrolní měření laserové diody

Za prvé je potřeba udělat kontrolní měření, kde se zkontroluje, zda laserová dioda má stejné naměřené hodnoty, jako se uvádí v datovém listu. Laserová dioda je přímo propojená se spektrálním analyzátozem (nebudou působit žádné vnější vlivy na optické vlákno). Měření probíhá pouze 300 s. Na obrázku (5.1) si lze všimnout spektra laserové diody od firmy Thorlabs. Hlavní vlnová délka je 636,9 nm s vybuzeným proudem 55 mA. Prvně je potřeba dodat, že spektrální analyzátor při tomto měření je přesnější než ten, který používala firma Thorlabs, protože dokáže změřit vlnovou délku na přesnost jedné tisíce nm (jak bylo řečeno v kapitole zapojení pracoviště).



Obr. 5.1: Spektrum laserové diody, které bylo udávané na datovém listu

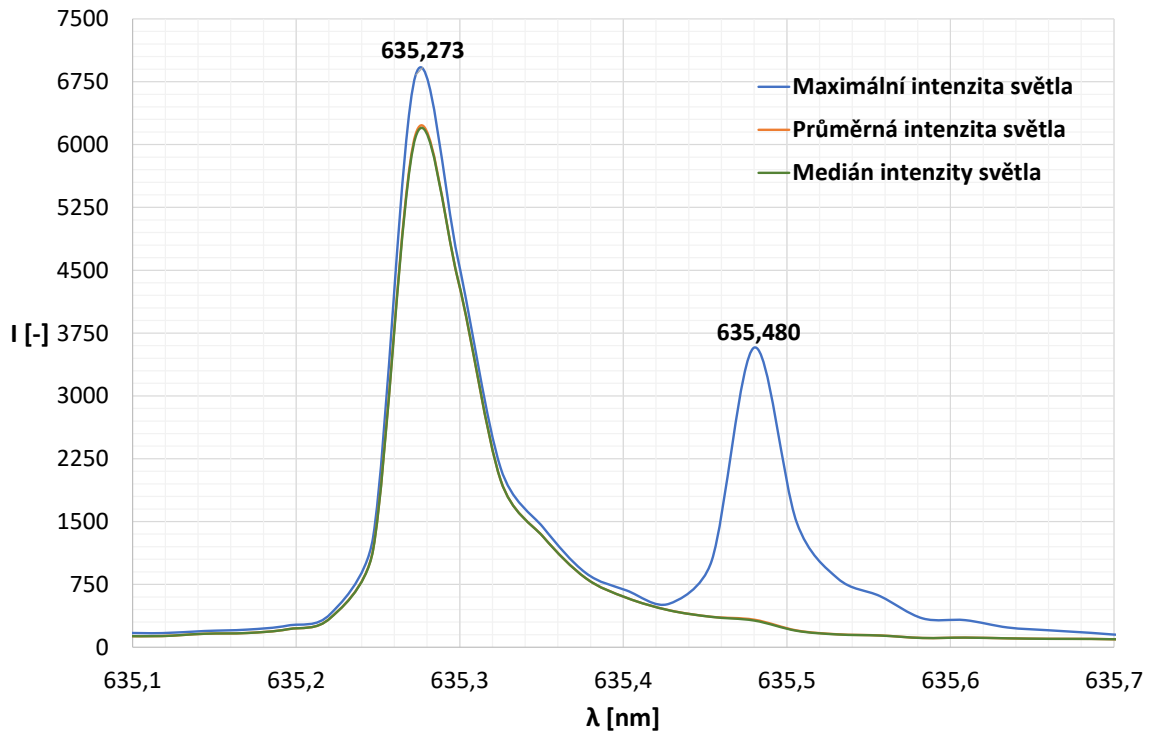
Prvního výsledku si lze všimnout na grafu (5.2), kde je celá šířka pásma laserové diody. Na grafu jsou vidět jednotlivé maximální intenzity pro každou vlnovou délku za celou dobu měření. Největší intenzity světla si lze všimnout na vlnové délce 635,5 nm, kde také jsou vidět dvě špičky jako u manuálu od firmy Thorlabs.



Obr. 5.2: Závislost intenzity světla na vlnové délce pro celé spektrum laserové diody při kontrolním měření

Na grafu (5.3) je zmenšené spektrum kvůli tomu, aby byly vidět špičky ve větším detailu. První špička (hlavní) je vybudena na vlnové délce 635,273 nm a druhá špička (vedlejší) na 635,480 nm. Medián intenzity světla je stejný jako průměrná intenzita světla. Průměr intenzity světla pro každou vlnovou délku byl udělaný tak, že se spočítala suma všech získaných intenzit světla jednotlivé vlnové délky a toto číslo se vydělilo počtem získaných hodnot (jedna hodnota = 100 ms). Tato matematická operace je použita i v dalších kapitolách měření. Důvod, proč není hlavní vlnová délka vybudena na 636,9 nm, je ten, že laserová dioda v tomto měření je vybudena proudem 50 mA.

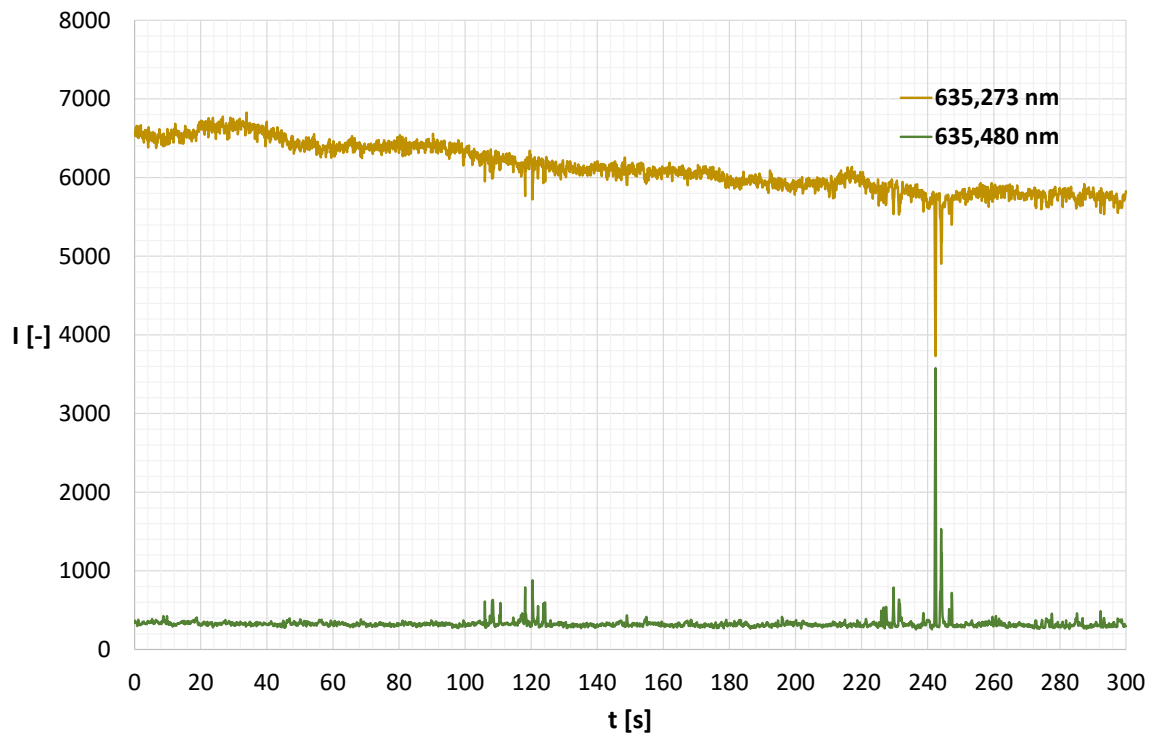
Další graf (5.4) poukazuje na průběh obou vlnových délek po celou dobu měření. Zajímavou částí je 242. sekunda, kde jsou vybudeny zároveň obě vlnové délky (intenzita světla u hlavní vlnové délky se snižuje a u vedlejší se zase zvyšuje). Tento stejný jev lze vidět minimálně v 108.–111. sekundě, 119.–123. sekundě a 227.–231. sekundě. U hlavní vlnové délky (635,273 nm) se intenzita světla v čase snižuje. Vedlejší vlnová délka (635,480 nm) má po celou dobu měření minimální intenzitu světla kromě časů, které byly řečeny před chvílí. Podle grafu lze i zjistit, že za celou dobu měření je vedlejší vlnová délka vybudena minimálně (zhruba 15 s za celou dobu měření).



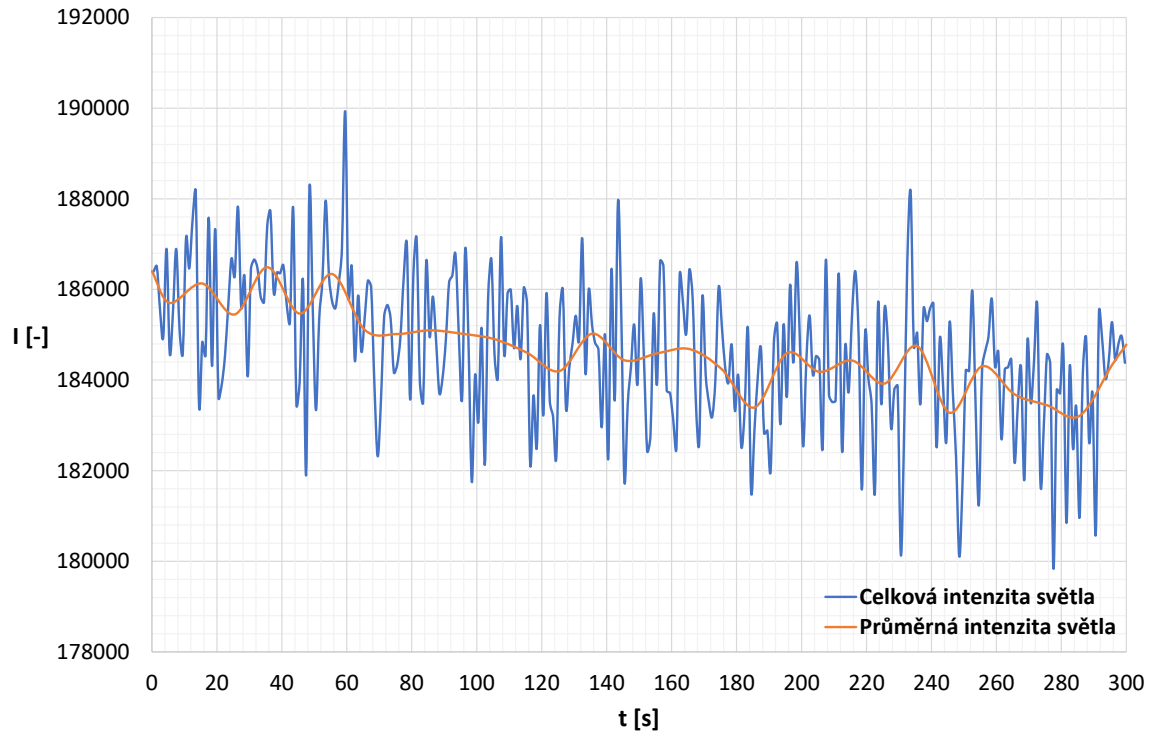
Obr. 5.3: Závislost maximální hodnoty, průměrné hodnoty a medián intenzity světla na vlnové délce při kontrolním měření

Posledním grafem (5.5) je celková a průměrná intenzita světla za celou dobu měření. Intenzita světla začíná zhruba na 186000 a pomalu délkou měření klesá. Nejvyšší naměřená intenzita světla je v 59. sekundě, kde dosahuje hodnoty až 190000. U průměrné intenzity je zobrazeno, že na začátku měření se intenzita světla pohybuje kolem 186000 a poté od 60. sekundy začne klesat a přetrvává zhruba u hodnoty 185000 (až na nějaké výkyvy). Zajímavostí také je, že ve 242. sekundě, kdy byly vybudeny obě vlnové délky, byla v průměru naměřena jedna z nejnižších intenzit za celou dobu měření. Protože měřítko tohoto grafu je zvětšené, tak to vypadá, že celková intenzita klesá či stoupá na velké hodnoty. Ale v reálném měřítku by se celková intenzita světla nepatrně měnila. Tato skutečnost se musí brát v potaz při dalších typech měření. Průměrná intenzita světla se vypočítala tak, že se sečetly celkové intenzity světla deseti hodnot (jedna hodnota = 100 ms). Poté se toto číslo vydělilo deseti a vyšla jedna průměrná hodnota. Tato matematická operace byla provedena pro celou délku měření a pro další typy měření, které budou dále uvedeny v dalších kapitolách.

Protože spektrum laserové diody je podobné manuálu laserové diody, lze pokračovat v měření sensorického optického vlákna, kde bude na sensorické optické vlákno působit kádinka s vodou s teplotami 0 °C, 24 °C a 48 °C.



Obr. 5.4: Závislost intenzity světla na čase pro speciální vlnové délky při kontrolním měření

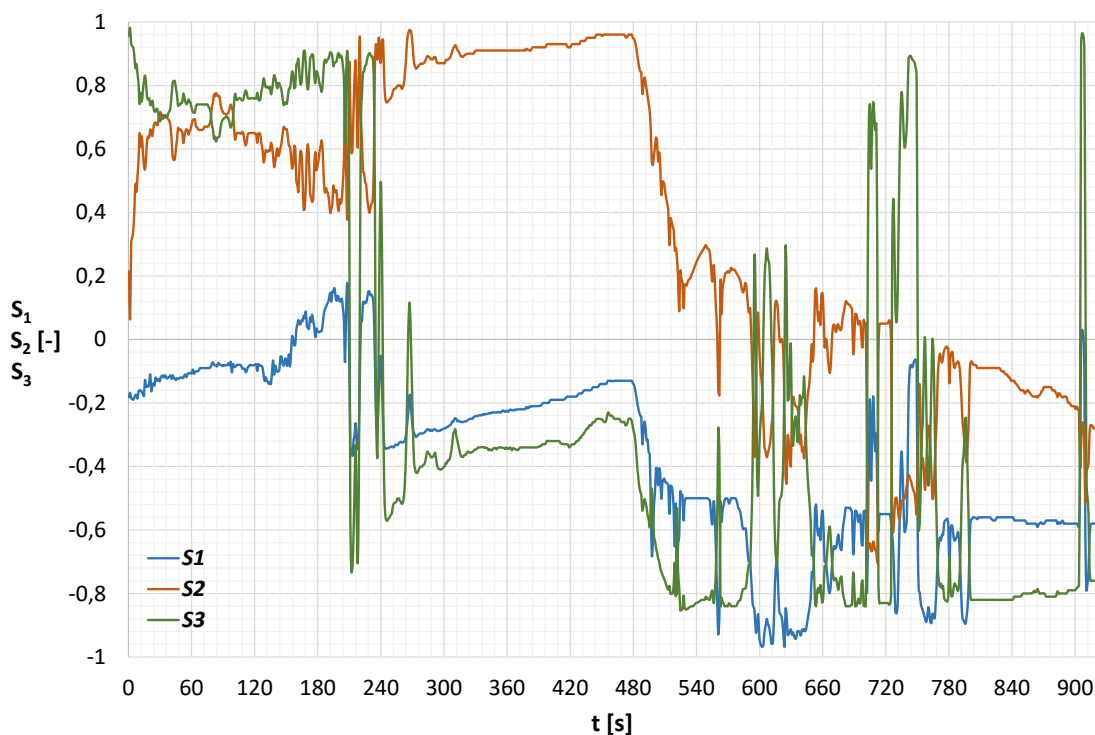


Obr. 5.5: Celková a průměrná intenzita světla při kontrolním měření

6 Reakce senzoru při referenční teplotě 24 °C

V této části měření byla pokládána na sensorické optické vlákno kádinka s vodou s teplotou 24 °C. Kádinka s vodou byla přiložena ve 140. sekundě a byla odebrána ve 470. sekundě. Celé měření probíhá 920 s. Laserová dioda oproti kontrolnímu měření září do sensorického optického vlákna. Toto měření má dokázat to, že se při referenční teplotě parametry měření nemění. Měřící pracoviště je zapojeno podle obrázku (4.1).

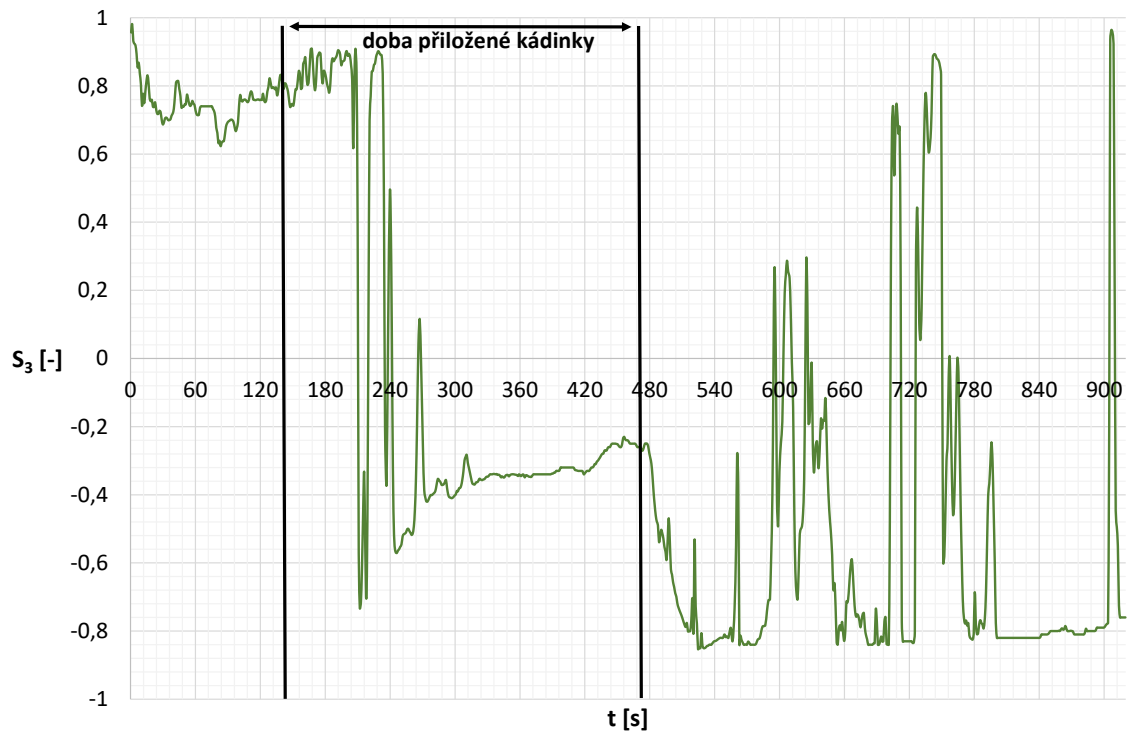
V první grafu lze vidět (6.1) jednotlivé Stokesovy vektory při celém průběhu měření. Lze si všimnout, že Stokesovy vektory S_1 a S_2 se do 520. sekundy moc nemění, ale pak jejich polarizační stav prudce poklesne a do konce měření se jejich průběh příliš nemění. Rozebrán bude Stokesův vektor S_3 , protože jako jediný dosahuje nejbližší hodnot $+1$ a -1 a mezi těmito hodnotami několikrát kmitá.



Obr. 6.1: Jednotlivé Stokesovy parametry po celou dobu měření při referenční teplotě 24 °C

V grafu (6.2) Stokesův parametr S_3 nabývá hodnoty $+0,8$ jak před přiložením, tak po přiložení. Tím pádem lze říci, že sensorické optické vlákno nereaguje na žádnou změnu. Po přidání kádinky s vodou se polarizační stav nemění, ale pak nastane skoková změna, která se ustálí ve 300. sekundě (možná nastal velký rozdíl rychlosti přenosu mezi pomalou a rychlou osou). Po odebrání kádinky se polarizační

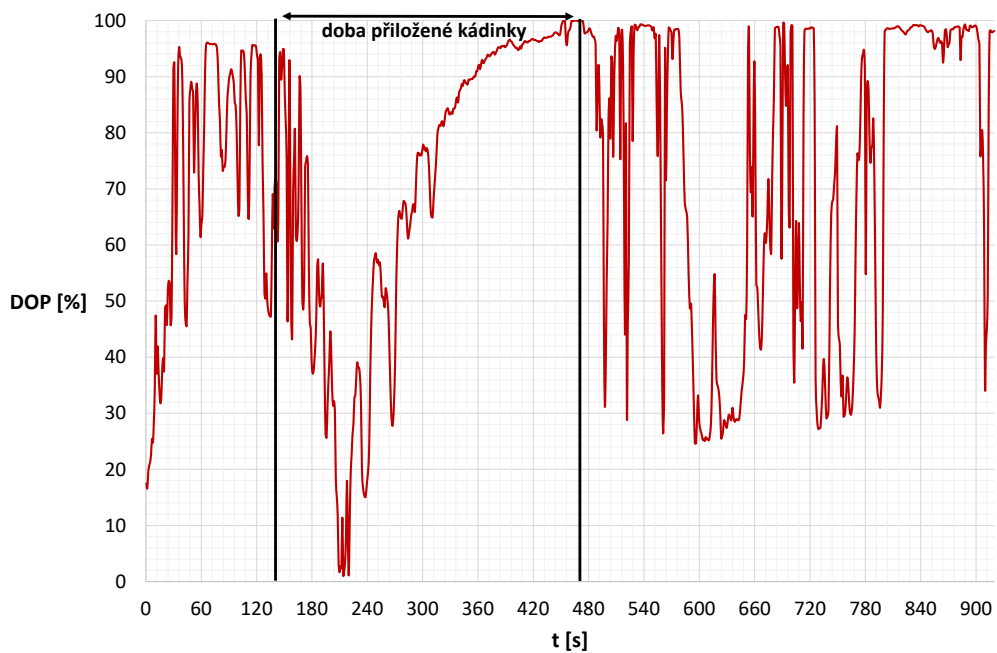
stav začne skokově měnit. V 600. sekundě kmitá polarizační stav od $-0,8$ až po $+0,2$. Po kratší době kmitá polarizační stav od $-0,8$ až po $+0,8$ a na konci měření jde vidět, že dosahuje polarizační stav až do parametru $+1$.



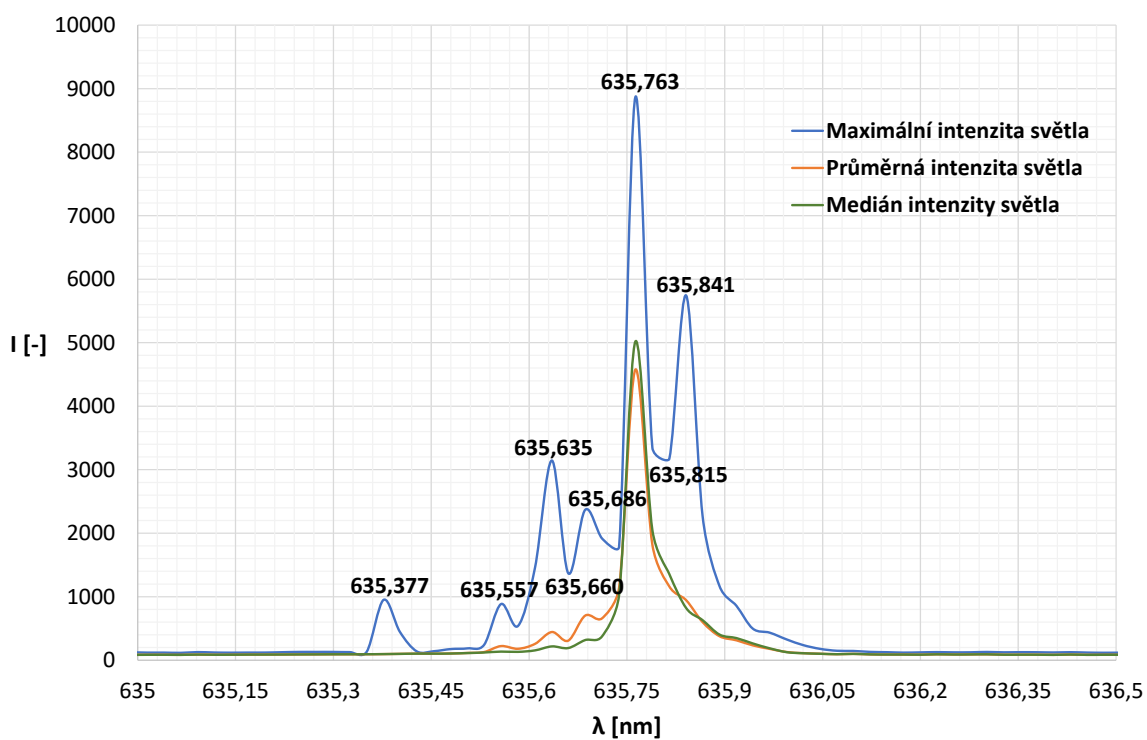
Obr. 6.2: Závislost Stokesovy parametru S_3 na čase při referenční teplotě 24°C

Stupeň polarizace (6.3) při referenční teplotě 24°C je většinou skoro na 100 % a v některých částech měření dosahuje i 100 %, což znamená, že je světlo zcela polarizované (děje se až po odebrání kádinky s vodou). V čase 210 s je stupeň polarizace nejmenší a jeden z důvodů může být i ten, že rozdíl rychlosti přenosu mezi pomalou a rychlou osou byl tak velký, že došlo ke snížení stupně polarizace.

Další částí jsou výsledky ze spektrálního analyzátoru. Na prvním grafu (6.4) lze vidět spektrum laserové diody od 635–636,5 nm. Hlavní vlnová délka je vybudena na 635,763 nm a vedlejší vlnová délka na 635,841 nm. Při měření se vyskytovaly i menší vedlejší vlnové délky, ale v průměru není jejich výskyt tak častý. Také lze vidět medián intenzity světla jednotlivých vlnových délek, která je pro hlavní vlnovou délku větší než průměrná intenzita světla. Pro vlnové délky menší než 635,763 nm je medián intenzity světla menší než pro vlnové délky větší než 635,763 nm.

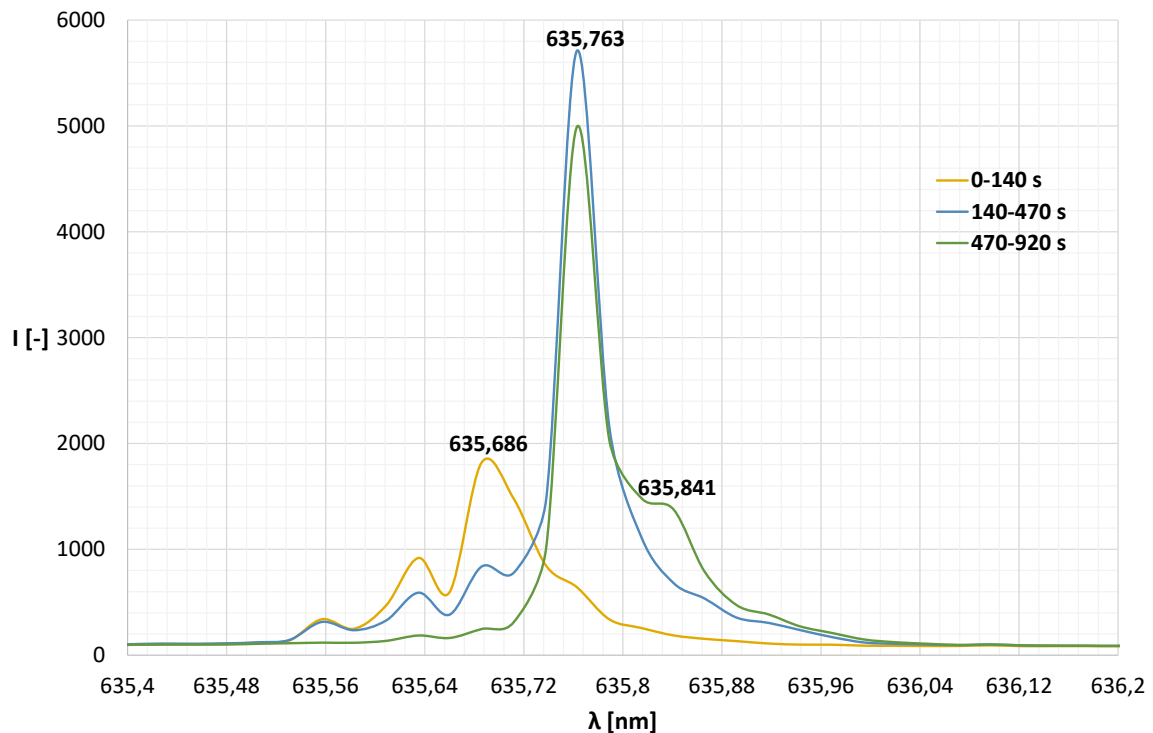


Obr. 6.3: Závislost stupně polarizace na čase při referenční teplotě 24 °C



Obr. 6.4: Závislost maximální hodnoty, průměrné hodnoty a mediánu intenzity světla na vlnové délce při referenční teplotě 24 °C

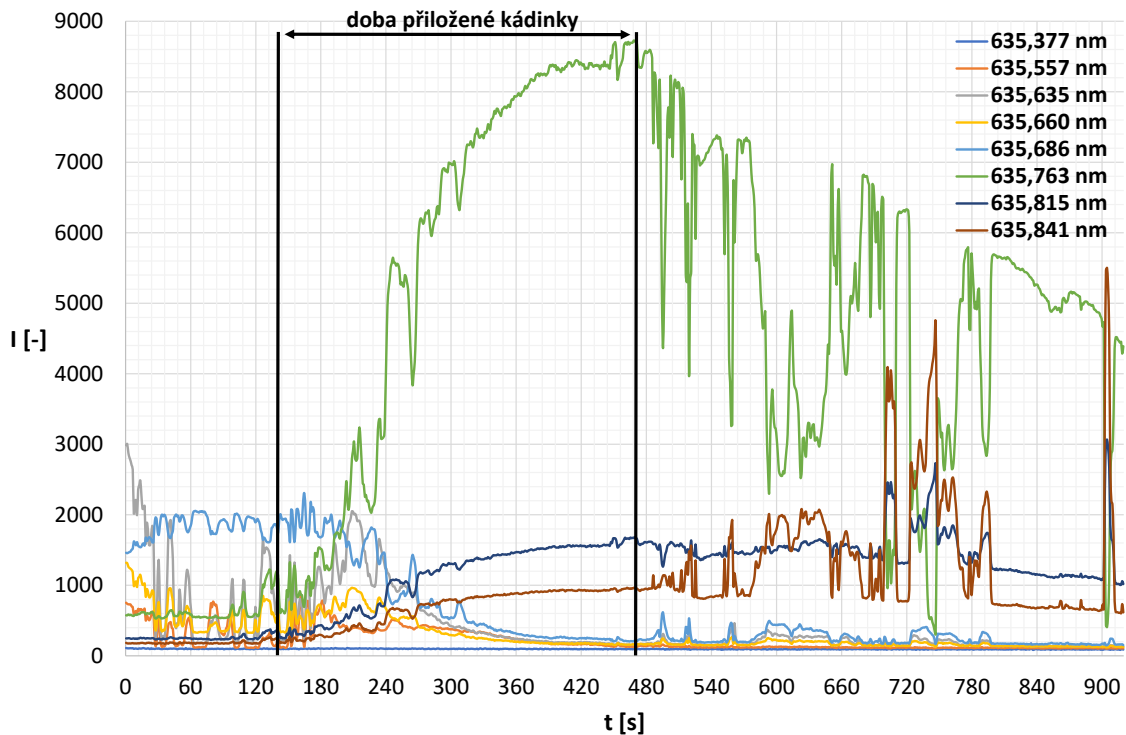
Jednotlivé časové intervaly a jejich průměrné intenzity světla si lze důkladně prohlédnout v grafu (6.5). Před přiložením kádinky je vybudena jedna vedlejší vlnová délka, která dosahuje intenzity světla do 2000 (počítá se pouze s vlnovými délkami s intenzitou světla větší než 1000). V průběhu, kdy na vlákno působila kádinka s vodou (teplota okolí), tak byla vybudena pouze hlavní vlnová délka. Od vyjmutí kádinky do konce měření je vybudena hlavní a vedlejší vlnová délka.



Obr. 6.5: Závislost intenzity světla na vlnové délce při určitých intervalech při referenční teplotě 24 °C

Jednotlivé průběhy vlnových délek si lze všimnout na grafu (6.6). Na začátku byla ve vlákne vybudena malá intenzita světla, kde převládala vedlejší vlnová délka (635,686 nm). Po přiložení kádinky s vodou je intenzita světla největší až do konce měření na hlavní vlnové délce. Od 200. sekundy se intenzita světla na vlnové délce 635,763 nm začala zvětšovat až do 380. sekundy. Také se mírně zvětšila intenzita světla na vedlejších vlnových délkách 635,815 nm a 635,841 nm. Spustila se událost věcí, která zapříčinila zvětšení intenzity světla na určitých vlnových délkách až po 50 s od přiložení kádinky s vodou. Bohužel nelze vysvětlit, co za jev tento nárůst zapříčinil. Ve stejné době je intenzita světla do 2000 na vedlejších vlnových délkách 635,815 nm a 635,841 nm. Po odejmutí kádinky se intenzita světla snižuje na hlavní vlnové délce a zvětšuje se patrně na vedlejší vlnové délce 635,841 nm. Na konci měření si lze všimnout, že největší intenzita převládá na vedlejší vlnové délce 635,841 nm.

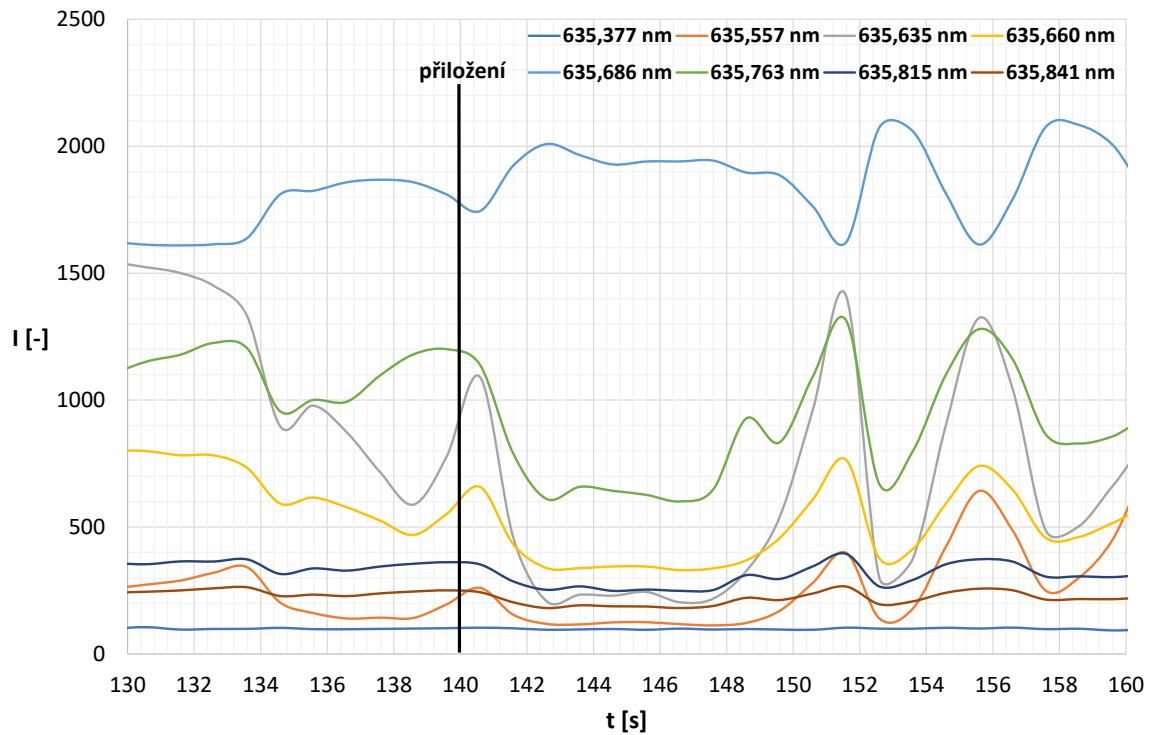
Po celé délce měření byla intenzita světla většinou vybuzena vždy na třech vlnových délkách.



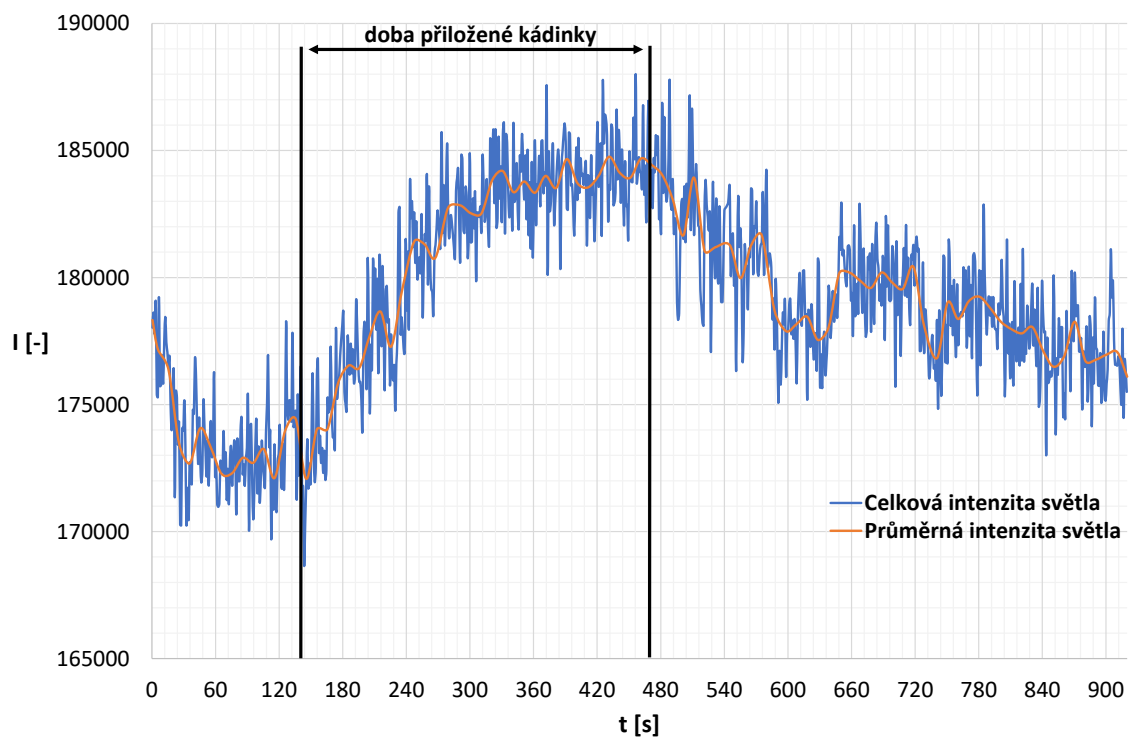
Obr. 6.6: Závislost intenzity světla na čase při referenční teplotě 24 °C, kde hlavní vlnová délka je 635,763 nm (zelené označení)

V grafu (6.7) jsou vidět průběhy různých vlnových délek před přiložením kádinky a po přiložení kádinky. Kádinka s vodou neměla žádný výrazný efekt na vybuzení vlnových délek.

Celková intenzita světla (6.8) se zvětšuje po přiložení kádinky s vodou na senzorické optické vlákno. Celková a průměrná intenzita světla vypadá jako harmonický průběh. Jedním z důvodů, proč nastává změna celkové intenzity světla, může být ten, že nedochází k totálnímu odrazu mezi pláštěm a jádrem a některé vidy se ztrácí.



Obr. 6.7: Závislost intenzity světla na čase před a po přiložení kádinky s vodou 24 °C

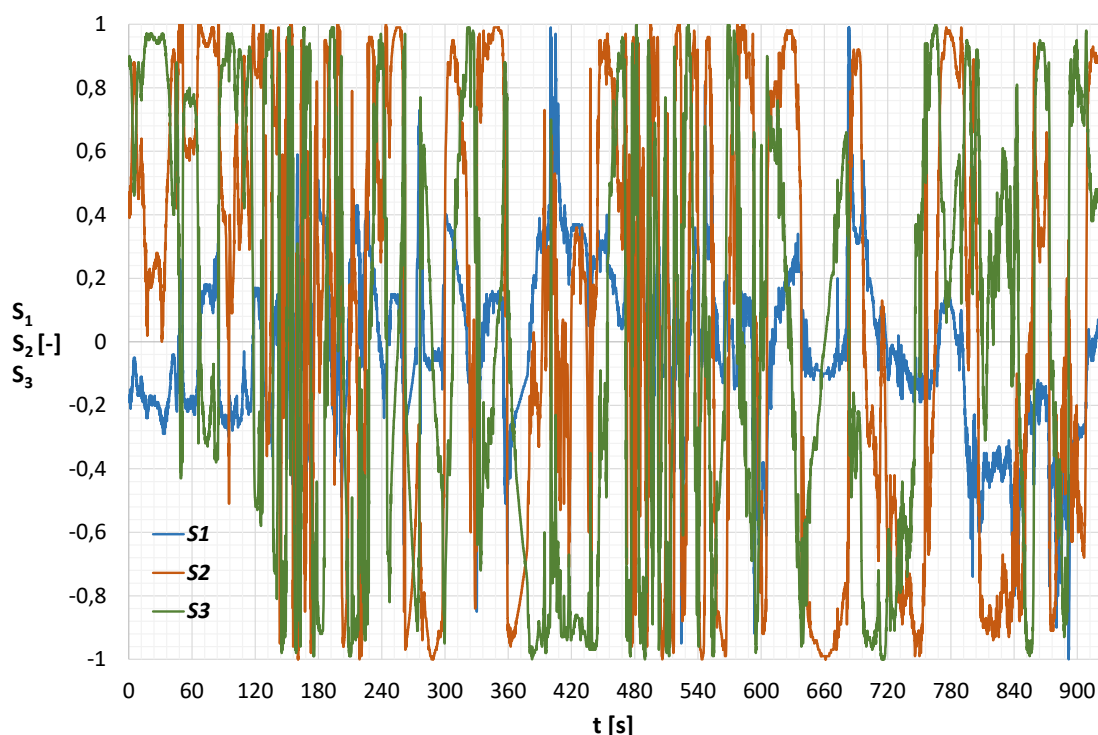


Obr. 6.8: Závislost celkové a průměrné intenzity světla na čase při referenční teplotě 24 °C

7 Reakce senzoru po přiložení kádinky s vodou s teplotou 0 °C

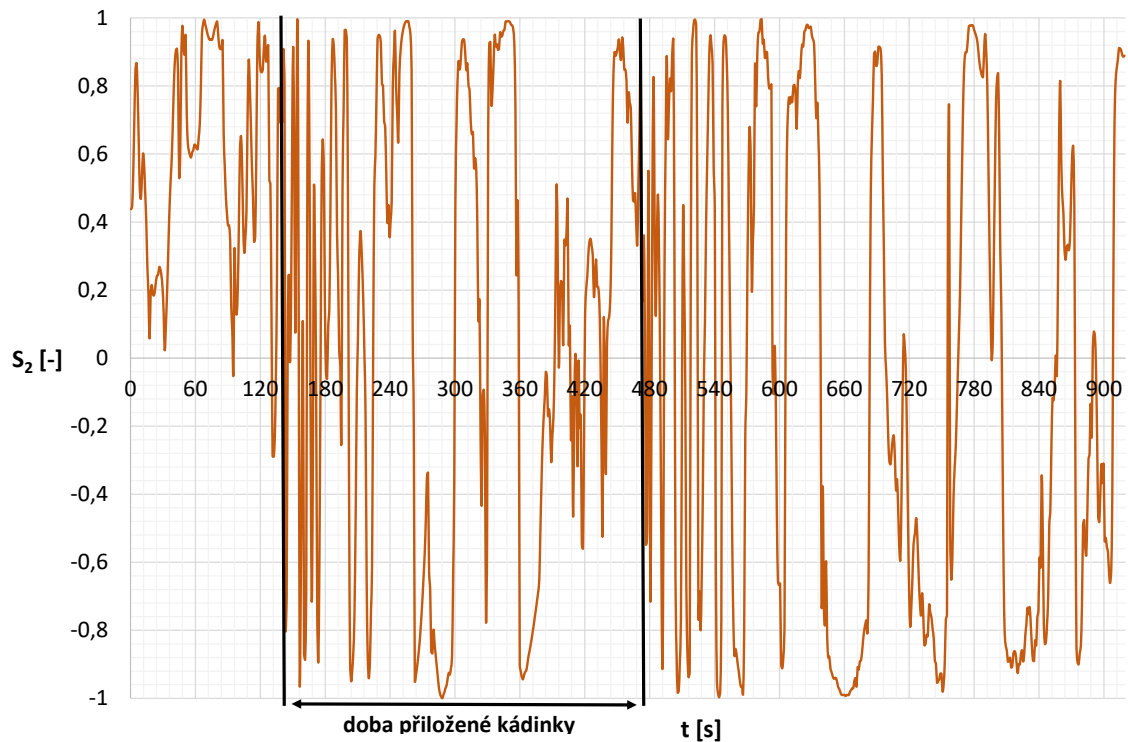
Další měření probíhá stejným způsobem jako v předchozím bodě pouze s tím rozdílem, že se ve 140. sekundě přiloží nad sensorické optické vlákno kádinka s vodou, která má teplotu 0 °C (bod mrazu). Kádinka s vodou zase bude odebrána ve 470. sekundě a měření bude probíhat celých 920 s. Měřící pracoviště je zapojeno podle obrázku (4.1).

Jako první lze opět vidět jednotlivé Stokesovy parametry za celou dobu měření. Budou popsány pouze Stokesovy parametry S_2 a S_3 , protože se jejich polarizační stav prolíná celou dobu od hodnot +1 až -1.



Obr. 7.1: Jednotlivé Stokesovy parametry po celou dobu měření při teplotě 0 °C

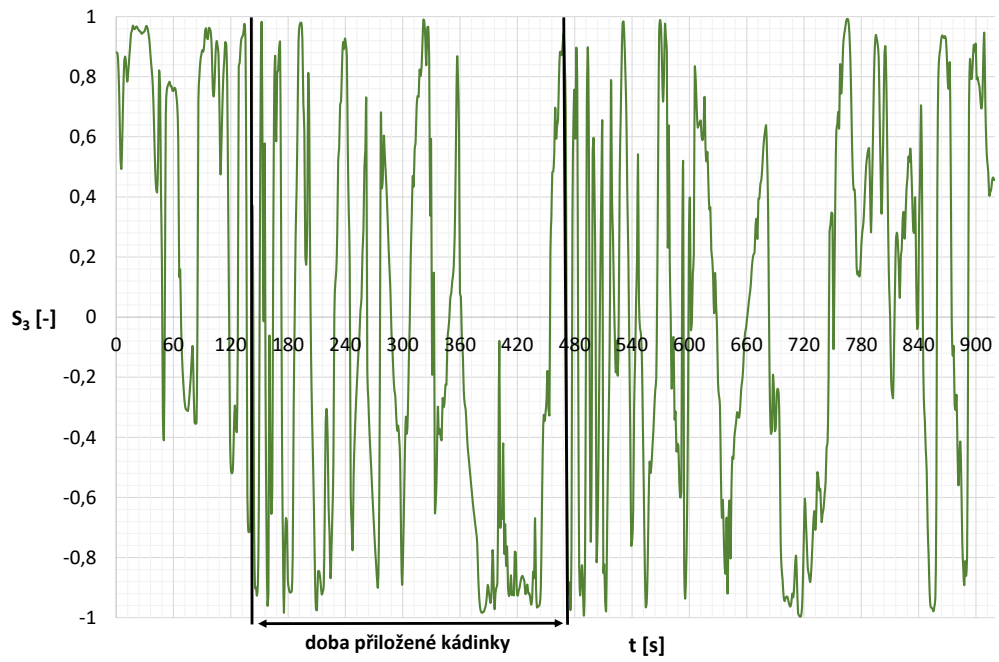
První graf ujmá Stokesův parametr S_2 (7.2), kde jde vidět po přiložení kádinky s vodou ve 140. sekundě, že polarizační stav nabývá velice rychle hodnot od +1 až k -1. Od 220. sekundy se polarizační stav ustaluje, protože se i teplota okolo senzoru ustaluje. Po vyjmutí kádinky v 470. sekundě polarizační stav znovu nabývá velice rychle hodnot +1 k -1. Protože se teplota okolo senzoru ustaluje na teplotu okolí., tak v 600. sekundě se polarizační stav ustaluje také.



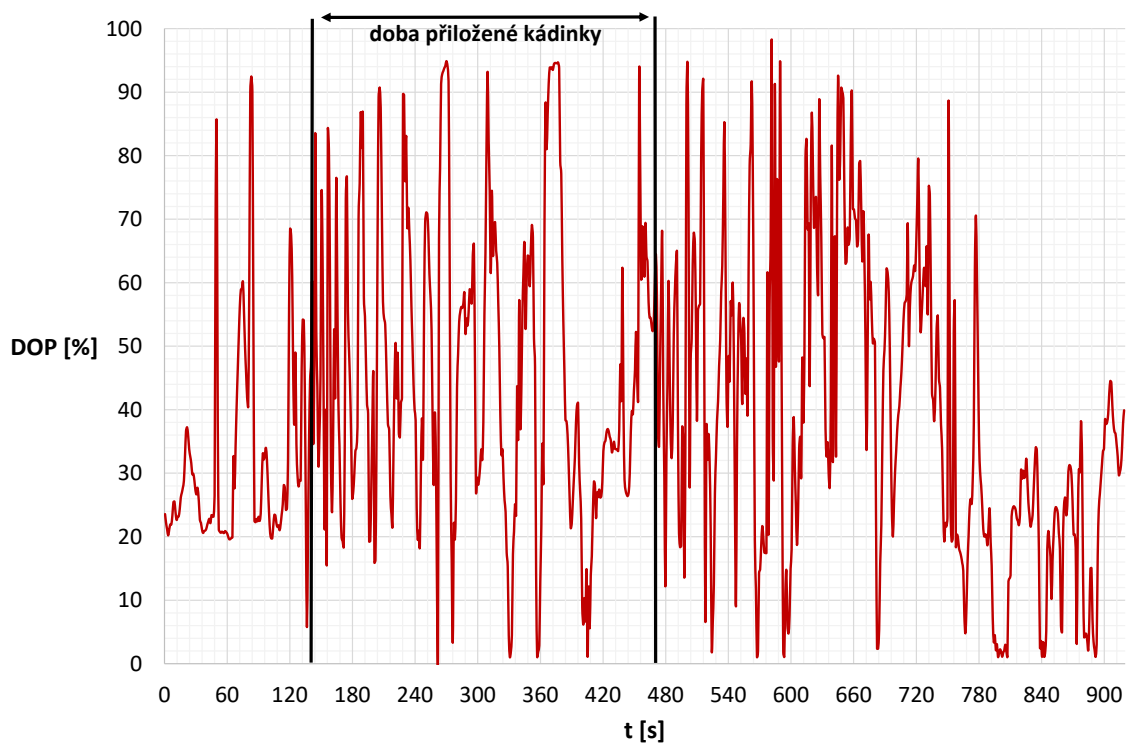
Obr. 7.2: Závislost Stokesova parametru S_2 na čase při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$

Podobného průběhu si lze všimnout i u Stokesova vektoru S_3 (7.3) s tím rozdílem, že ve 400. sekundě zůstává polarizační stav záporný, a tím pádem je vektor S_3 levotočivě kruhově polarizovaný.

Stupeň polarizace (7.4) nabývá na začátku hodnot od 20%–90%. Po přiložení kádinky s vodou a ustálení teploty okolo senzoru dosahuje stupeň polarizace skoro 0% (ve 280. sekundě dosahuje i stupeň polarizace 0%). Po odebrání kádinky a ustálení teploty na teplotu okolí je stupeň polarizace větší a dosahuje nízkých hodnot pouze párkrát. Na konci měření je stupeň polarizace velice nízký.

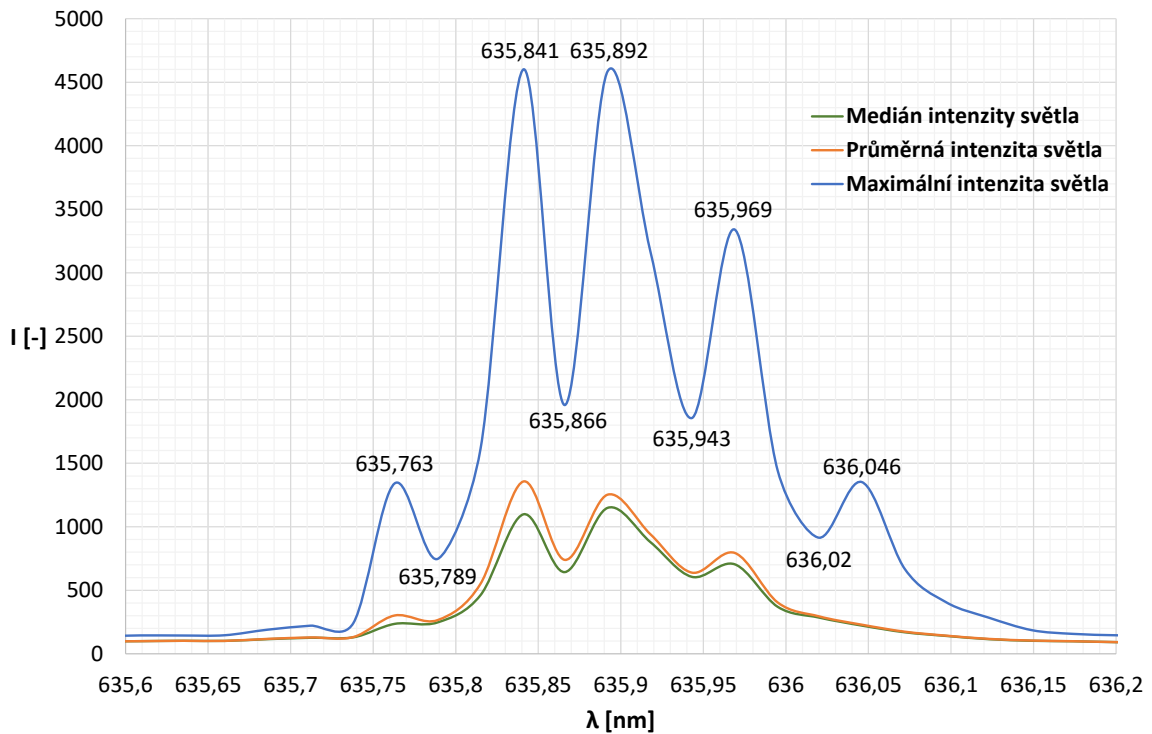


Obr. 7.3: Závislost Stokesova parametru S_3 na čase při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$



Obr. 7.4: Závislost stupně polarizace na čase při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$

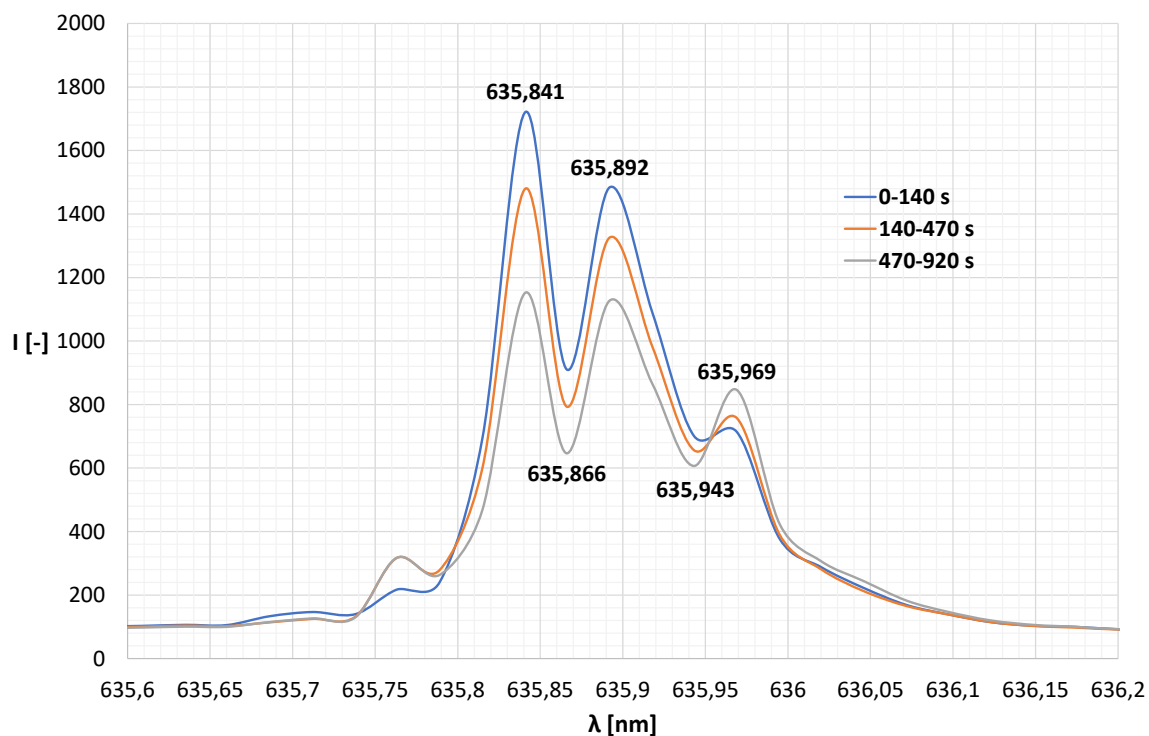
Druhou částí měření jsou výsledky ze spektrálního analyzátoru. V grafu pro maximální a průměrné hodnoty jednotlivých vlnových délek (7.5) nejde vidět jako v předchozí referenční teplotě hlavní a vedlejší vlnová délka. V průměru to vypadá, že vlnové délky 635,841 nm a 635,892 nm jsou hlavní vlnové délky a ostatní vedlejší. Medián intenzity světla je menší než průměrná intenzita světla. Patrné je i to, že jsou vybudzeny větší vlnové délky než u předchozího měření, kde byla použita referenční teplota.



Obr. 7.5: Závislost maximální hodnoty, průměrné hodnoty a mediánu intenzity světla na vlnové délce při teplotě 0 °C

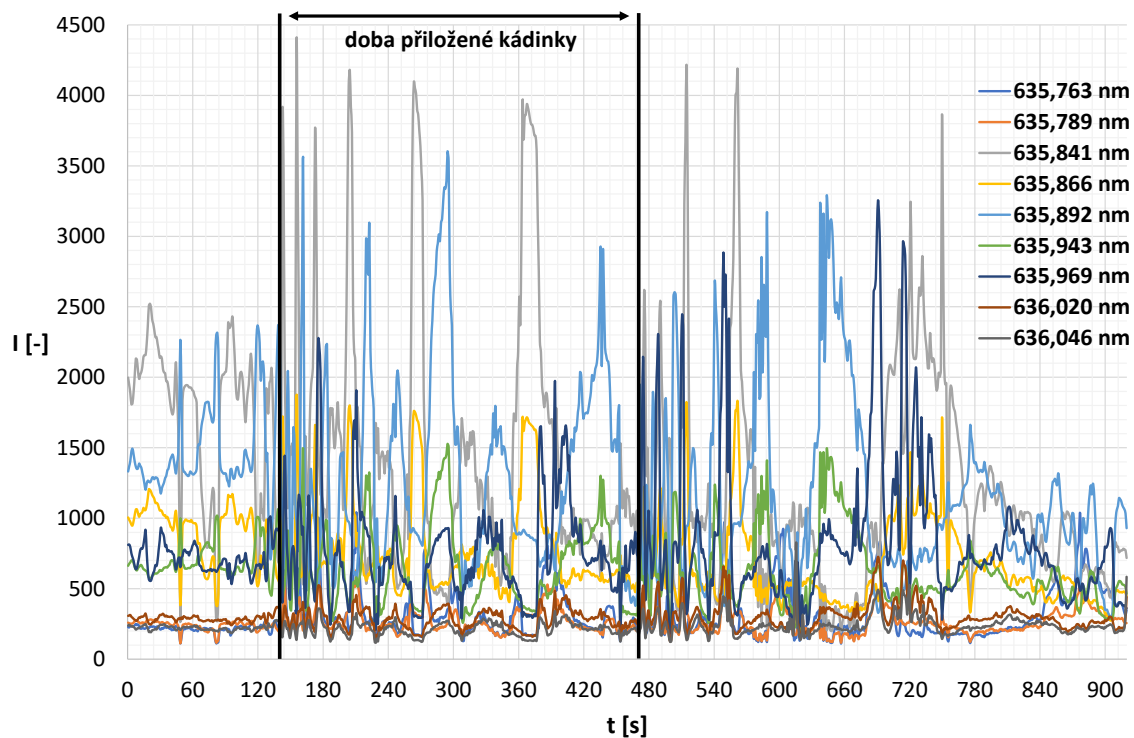
Větší detail lze vidět v grafu (7.6), kde jsou zprůměrované jednotlivé intenzity pro každou vlnovou délku v intervalech měření 0–140 s, 140–470 s a 470–920 s. Hodnoty jsou zprůměrované tak, že pro každou vlnovou délku se sečetla intenzita světla v celém intervalu a podělila se počtem intenzit. Když na vlákno nepůsobil vnější vliv, lze vidět, že vlnová délka 635,841 nm je hlavní vlnovou délkou. Také vlnové délky od 635,840 nm–635,943 nm mají největší intenzitu světla. Když na vlákno působila vnější teplota (0 °C), tak se intenzita světla vlnových délek v rozmezí 635,840 nm–635,943 nm snížila. Jde i vidět, že rozdíl mezi hlavní vlnovou délkou 635,841 nm a vedlejší vlnovou délkou 635,892 nm je menší. Po odebrání kádinky s vodou se intenzita světla dále více snížila a je velice malý rozdíl mezi hlavní vlnovou délkou

635,841 nm a vedlejší vlnovou délkou 635,892 nm. Patrně se zvýšila intenzita světla na vlnové délce 635,790 nm a 635,969 nm.



Obr. 7.6: Závislost intenzity světla na vlnové délce při určitých intervalech při teplotě 0 °C

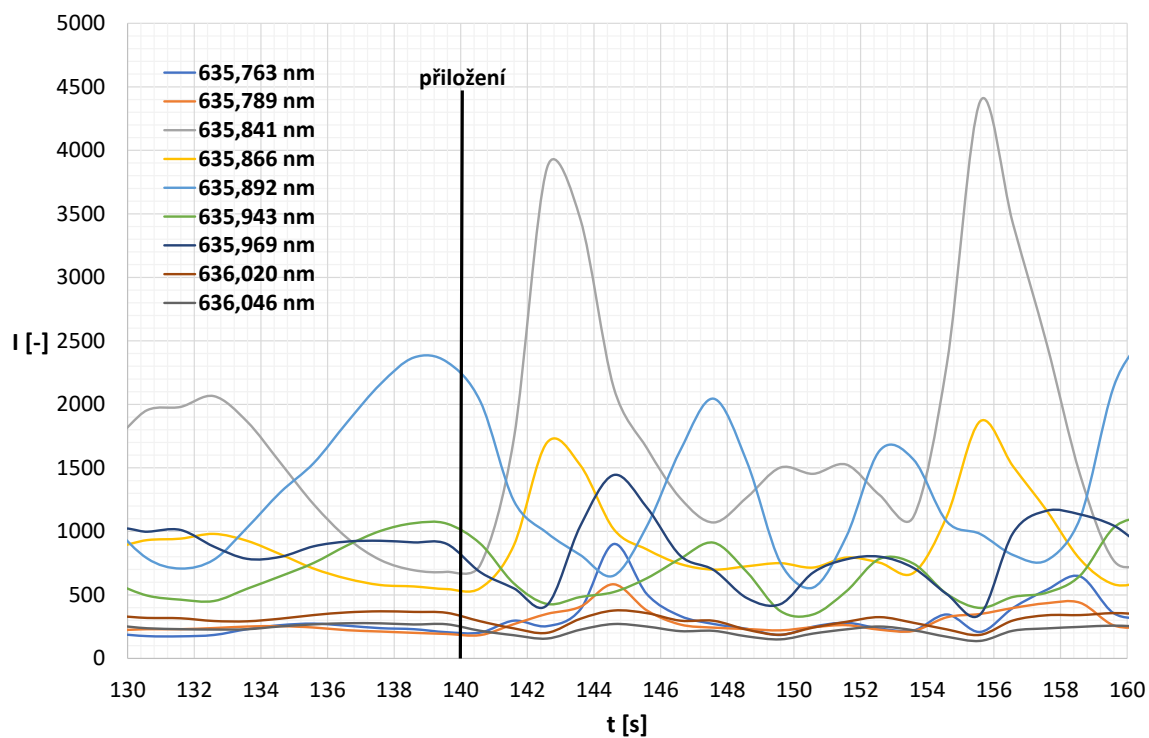
Na obrázku (7.7) lze vidět jednotlivé vybuzené vlnové délky a jejich průběh za celou dobu měření. Na začátku měření je největší intenzita světla na vlnové délce 635,841 nm (hlavní vlnová délka) a na vedlejších vlnových délkách je intenzita světla do 1500 (až na některé skoky u vedlejší vlnové délky 635,892 nm, kde má intenzitu světla větší než hlavní vlnová délka). Po přiložení kádinky s vodou (0 °C) začne narůstat okamžitě intenzita světla na všech vlnových délkách. Jde vidět, že po celou dobu přiložení se budí na přeskáčku hlavní vlnová délka 635,841 nm a vedlejší vlnová délka 635,892 nm. Také vlnová délka 635,866 nm se vybudila a intenzita světla na ní dosahovala do hodnoty 2000. Po odebrání kádinky s vodou intenzita světla na vybuzených vlnových délkách se opět zvýšila. Při ustalování teploty má vybuzená vlnová délka 635,969 nm větší intenzitu světla.



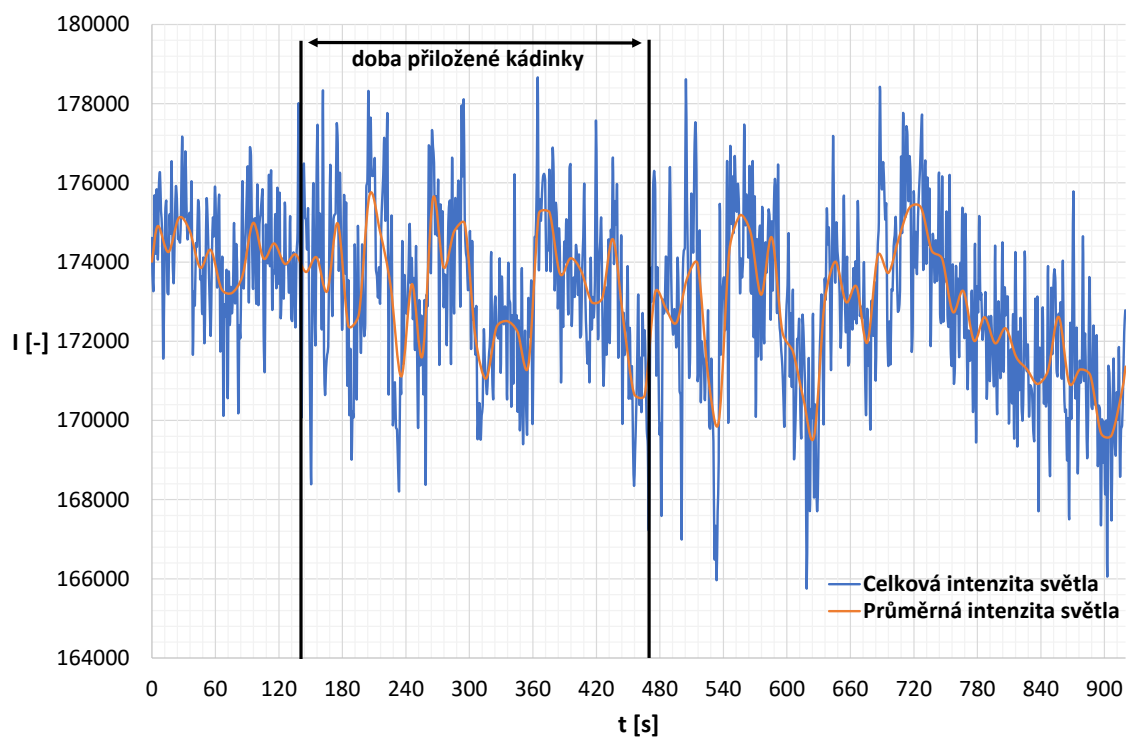
Obr. 7.7: Závislost intenzity světla na čase při teplotě 0 °C, kde hlavní vlnová délka je 635,841 nm (šedé označení)

Další graf (7.8) je podobný tomu minulému (7.7) s tím rozdílem, že interval je 10 s před přiložením kádinky s vodou a 20 s po přiložení kádinky s vodou. Po přiložení lze vidět detailněji, jak se zvyšuje intenzita světla na všech vybuzených vlnových délkách. Tím pádem lze říci, že vlnová délka se mění v závislosti na teplotě.

Poslední graf (7.9) vystihuje celkovou a průměrnou intenzitu světla za celou dobu měření. Ze začátku se intenzita světla pohybovala okolo 174000 a neměla žádné velké výkyvy. Po přiložení kádinky s vodou ve 140. sekundě najednou začala intenzita světla kmitat v rozmezí od 171000–175500. Jde i vidět, že po odebrání kádinky se teplota okolo sensorického optického vlákna ustaluje na teplotu okolí a celková intenzita začne v některých časových bodech klesat až pod 166000, což je rozdíl 8000 od začátku měření. Poté se ustálí i teplota okolo senzoru a průběh celkové intenzity začne vypadat jako půl harmonický průběh, který lze vidět už v předchozím měření (6.8). Pravděpodobně znovu hraje roli totální odraz, ke kterému nedochází mezi pláštěm a jádrem, a proto se ztrácí některé vidy, to způsobí, že se zmenší celková intenzita světla.



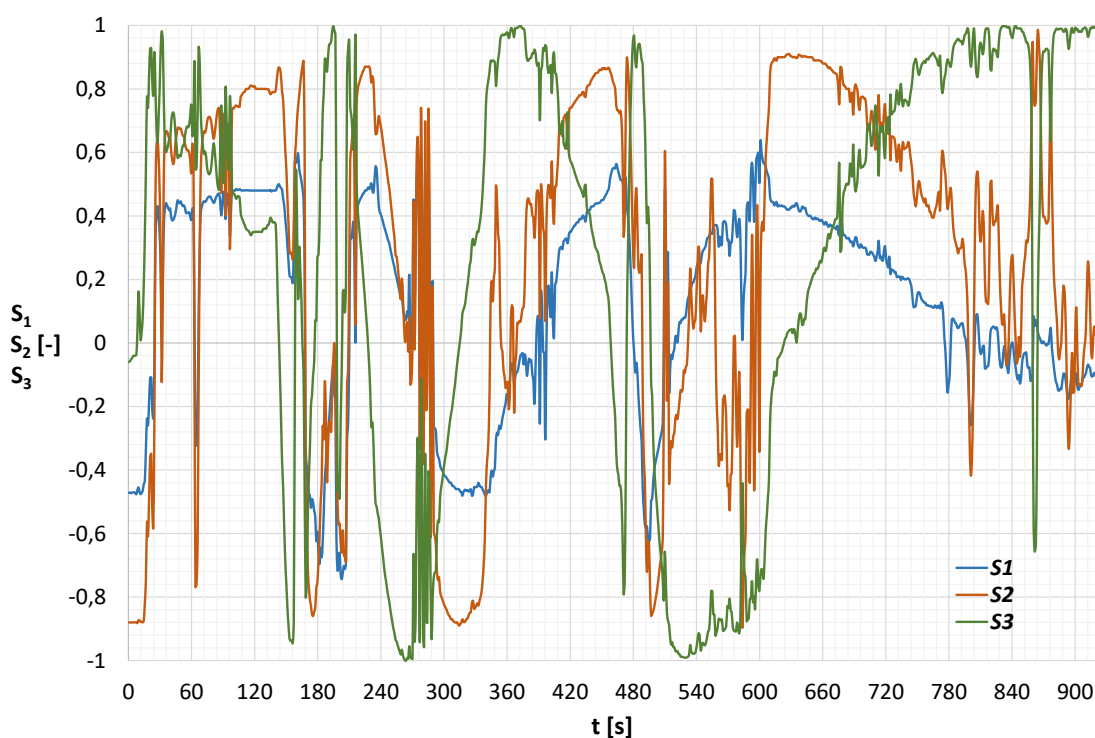
Obr. 7.8: Závislost intenzity světla na čase před a po přiložení kádinky s vodou 0 °C



Obr. 7.9: Závislost celkové a průměrné intenzity světla na čase při teplotě 0 °C

8 Reakce senzoru po přiložení kádinky s vodou s teplotou 48 °C

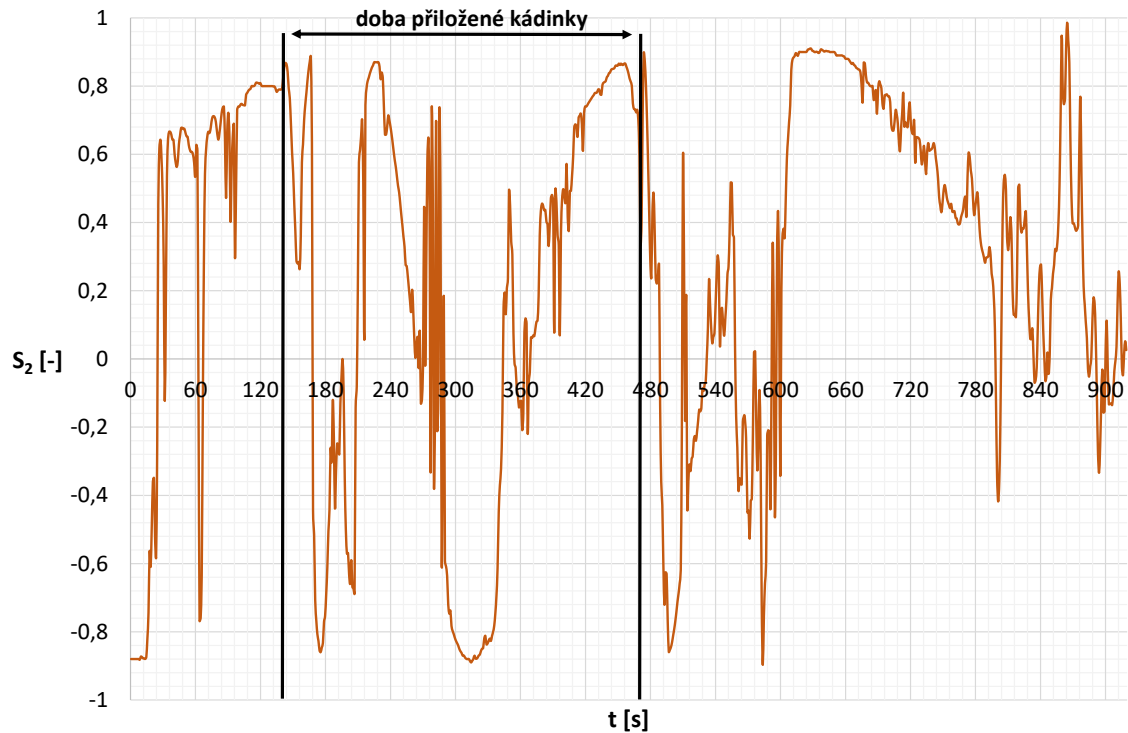
Poslední část měření je stejná jako v minulých kapitolách, pouze s tím rozdílem, že nad sensorické vlákno od 140. sekundy do 470. sekundy působí kádinka s vodou s teplotou 48 °C. Měření probíhá znovu po dobu 920 s. První výsledky jsou z polarimetru, kde je vidět závislost Stokesových parametrů na čase. Budou zase popsány pouze Stokesovy parametry S_2 a S_3 , protože se jejich polarizační stav mění a nabývají hodnot od $-0,8$ až $+0,8$ pro S_2 a od -1 až $+1$ pro S_3 . Měřící pracoviště je zapojeno podle obrázku (4.1).



Obr. 8.1: Jednotlivé Stokesovy parametry po celou dobu měření při referenční teplotě 48 °C

Závislost Stokesova parametru S_2 na čase lze vidět na grafu (8.2). Polarizační stav se pohybuje od hodnoty $-0,8$ až k $+0,8$. V čase 280 s dochází k velkým rozkmitům. Od času 600 s dojde na krátkou dobu k velkým rozkmitům a polarizační stav začne lineárně klesat od $+0,9$ k 0.

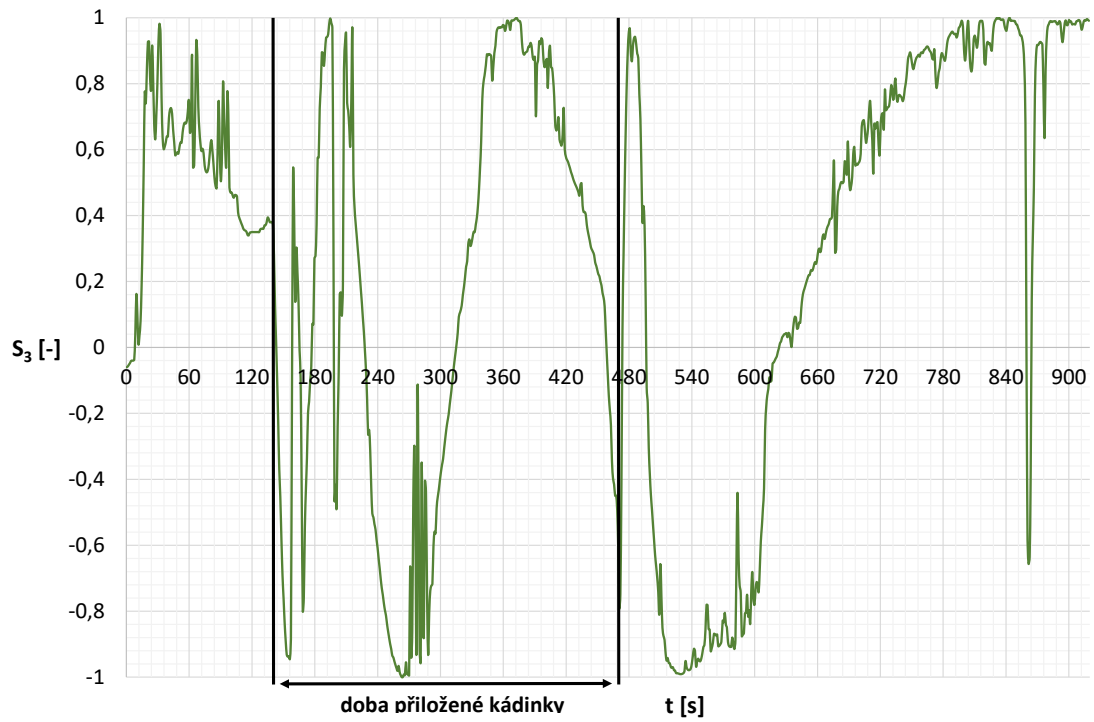
Stokesův parametr S_3 (8.3) začíná na 0, poté se polarizační stav přelévá od $+1$ k -1 . Ve 280. sekundě zase nastanou velké rozkmity, které se poté ustálí a polarizační stav se přelévá od -1 k $+1$. Od 600. sekundy začne polarizační stav lineárně stoupat



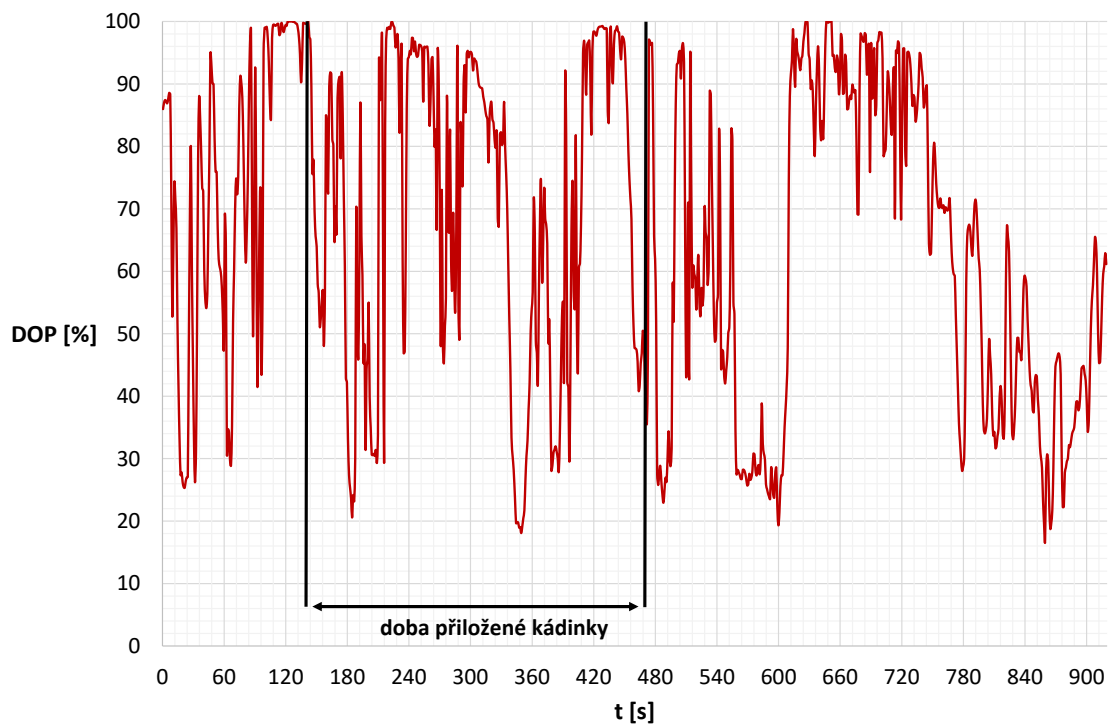
Obr. 8.2: Závislost Stokesova vektoru S_2 při teplotě 48 °C

k bodu +1 (opačně než u Stokesova parametru S_2 , kde polarizační stav lineárně klesal k 0). Při 280. sekundě se spustila událost věcí, která zapříčinila velké rozkmity, které bohužel nejdou popsat.

Stupeň polarizace (8.4) se udržuje od zhruba 20 % do 100 %. Několikrát v tomto měření nastalo, že stupeň polarizace dosahoval 100 %. Od 600. sekundy se stupeň polarizace z 20 % posune nad úroveň 90 % a stupeň polarizace vytrvá na těchto hodnotách zhruba tři minuty.

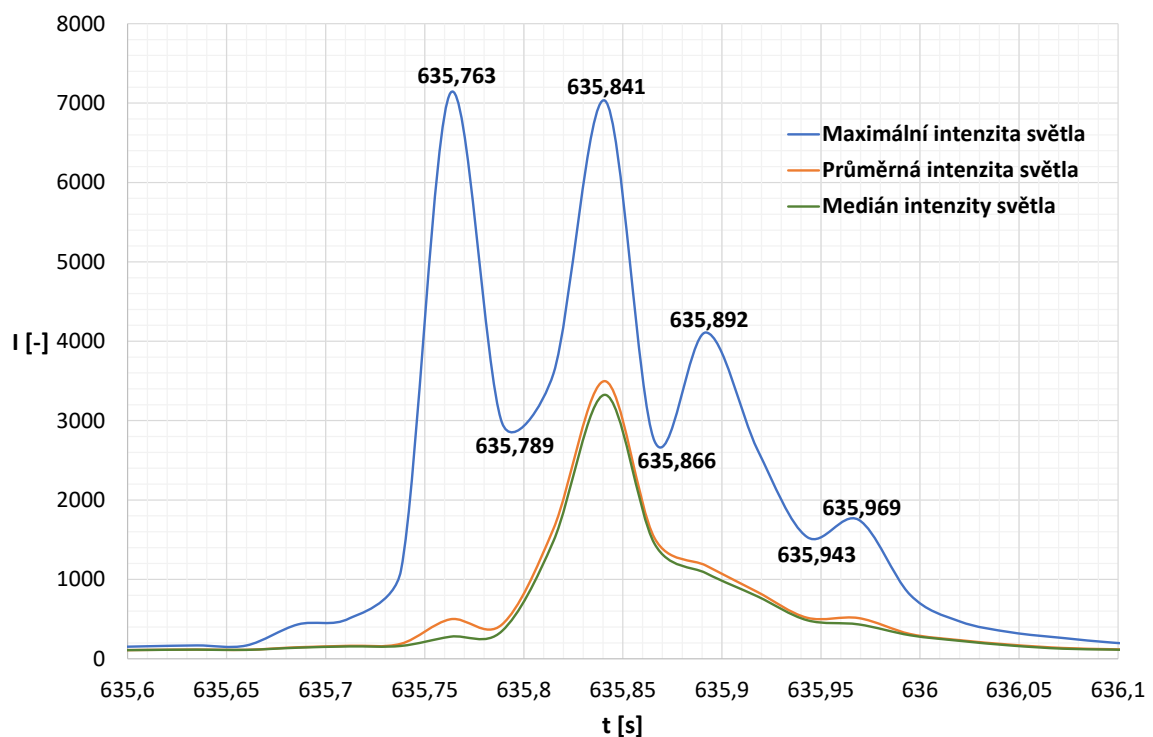


Obr. 8.3: Závislost Stokesova vektoru S_3 při teplotě $48\text{ }^\circ\text{C}$



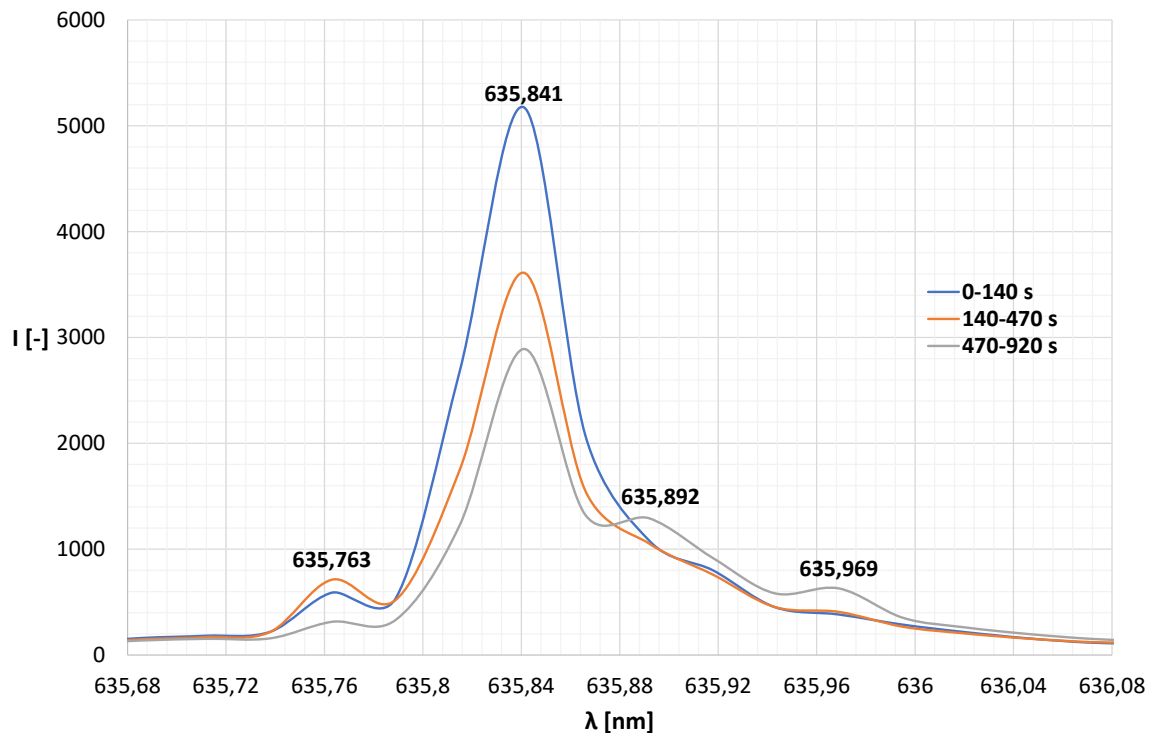
Obr. 8.4: Závislost stupně polarizace na čase při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$

V druhé části měření je opět použit spektrální analyzátor. Lze si všimnout maximální hodnoty, průměrné hodnoty a mediánu intenzity světla (8.5) pro vlnové délky od 635,6 nm do 636,2 nm. Za celou dobu měření bylo vybudeno 7 vlnových délek, které nabývají větší intenzity světla, kde 635,763 nm a 635,841 nm měly podobnou intenzitu světla. Z průměru si ale lze všimnout, že pouze vlnová délka 635,841 nm byla vybudena delší dobu měření a vlnová délka 635,763 nm byla vybudena minimálně. Proto lze tvrdit, že vlnová délka 635,841 nm je hlavní vlnovou délkou. Vedlejšími vlnovými délkami by mohly být vlnové délky 635,866 nm a 635,892 nm, kde v průměru za celou dobu měření byla na obou vlnových délkách vybudena intenzita světla 1000. Medián intenzity světla je nepatrně menší než průměrná intenzita světla a lze na ní také vidět, že hlavní vlnová délka je 638,841 nm.



Obr. 8.5: Závislost maximální hodnoty, průměrné hodnoty a mediánu intenzity světla na vlnové délce při teplotě 48 °C

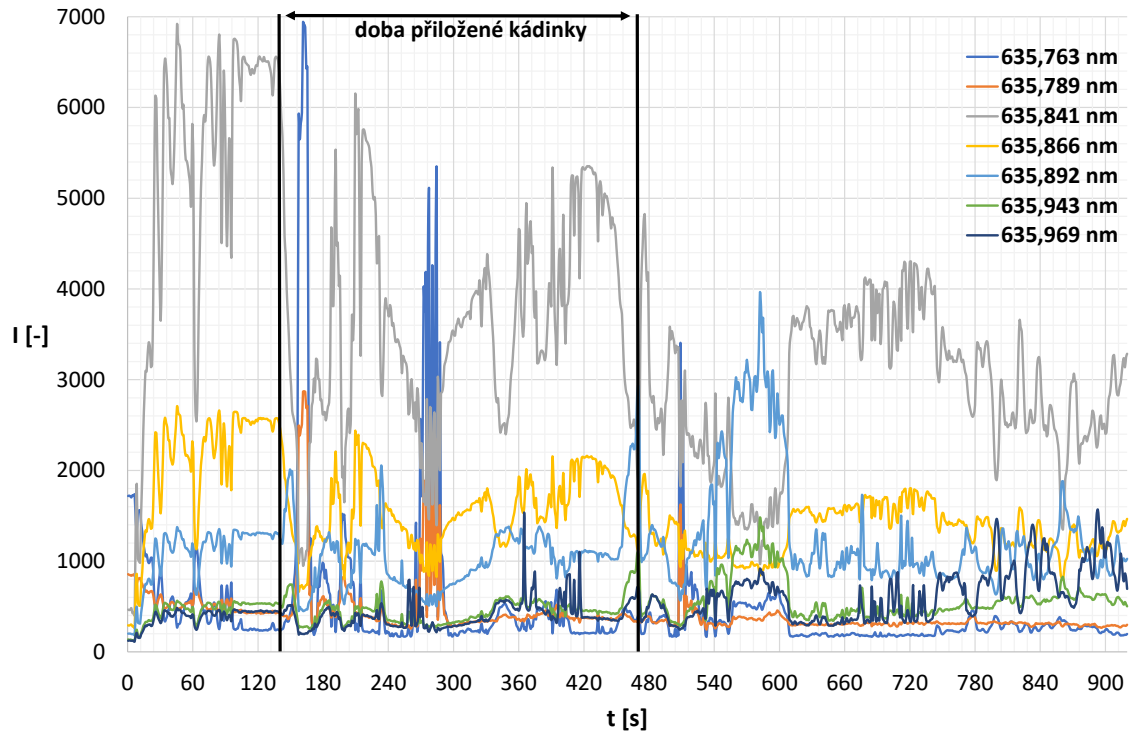
Dalším grafem (8.6) je závislost intenzity světla na vlnové délce při specifických intervalech. Byl vypočítán průměr jednotlivých vlnových délek v intervalech od 0–140 sekund, 140–470 sekund a 470–920 sekund jako v předchozích měřeních. V intervalu, kde na vlákno působila pouze teplota okolí, byla největší intenzita světla na vlnové délce 635,841 nm. Potom, co začala působit vnější teplota 48 °C, se intenzita světla zmenšila na hlavní vlnové délce a patrně se zvýšila na vedlejší vlnové délce 635,763 nm. Po odebrání kádinky s vodou se intenzita světla hlavní vlnové délky dále zmenšila, ale zase narostly vedlejší vlnové délky 635,892 nm a 635,969 nm.



Obr. 8.6: Závislost intenzity světla na vlnové délce při určitých intervalech při teplotě 48 °C

Na grafu (8.7) je uvedena závislost intenzity světla na čase pro specifické vlnové délky, které byly vybudeny za celou dobu měření. Na začátku měření byly vybudeny tři vlnové délky (hlavní vlnová délka 635,841 nm a vedlejší vlnové délky 635,866 nm a 635,892 nm). Jejich celková intenzita světla byla skoro konstantní, až na některé části měření. Poté, co byla přidána kádinka s vodou s teplotou 48 °C, intenzita světla u hlavní vlnové délky klesla a stoupla u vedlejších vlnových délek po dobu 10 s. Poté se zvětšuje intenzita světla u hlavní vlnové délky a u vedlejších zase klesá. Ve 258. sekundě si lze všimnout velkých rozkmitů na 5 vlnových délkách, které trvají řádově desítky sekund. Jak bylo řečeno dříve, spustila se událost věcí, která zapříčinila tyto rozkmity. Po odebrání kádinky s vodou se intenzita světla

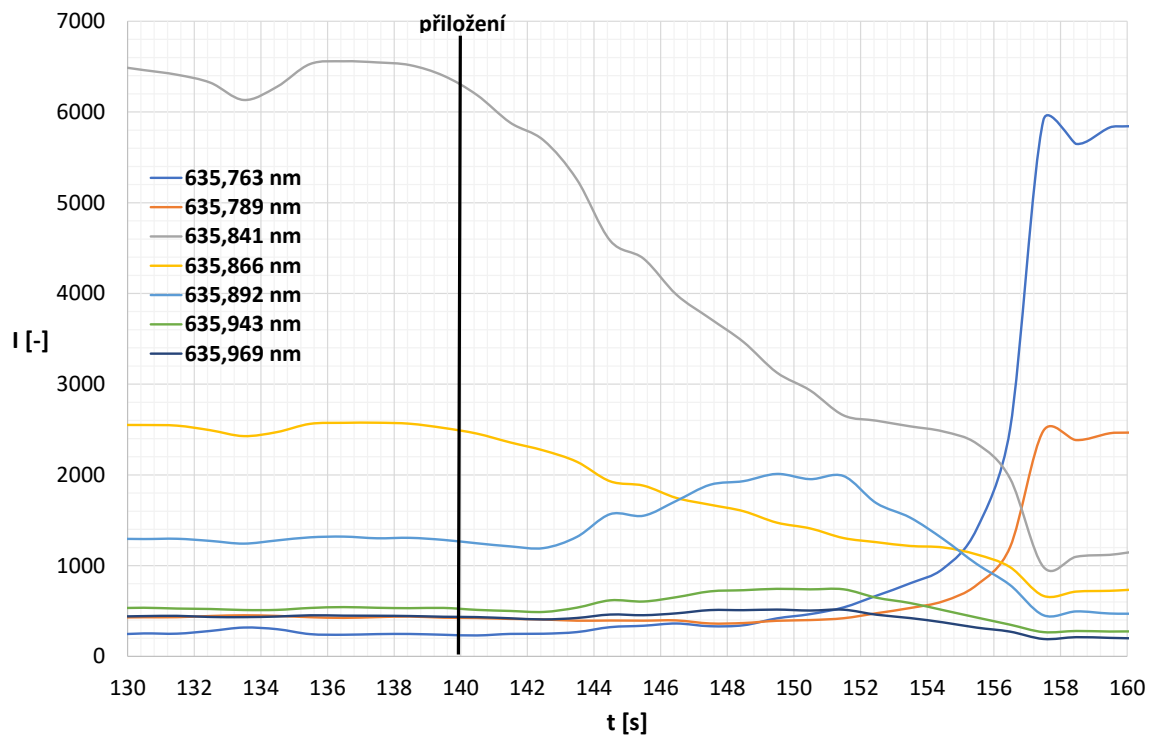
na hlavní vlnové délce snižuje oproti 2 intervalům (před a při přiložení kádinky). Od 540. sekundy do 600. sekundy je vybudena s největší intenzitou vedlejší vlnová délka. Poté se intenzita světla u jednotlivých vlnových délkách ustálí skoro na stejné hodnotě.



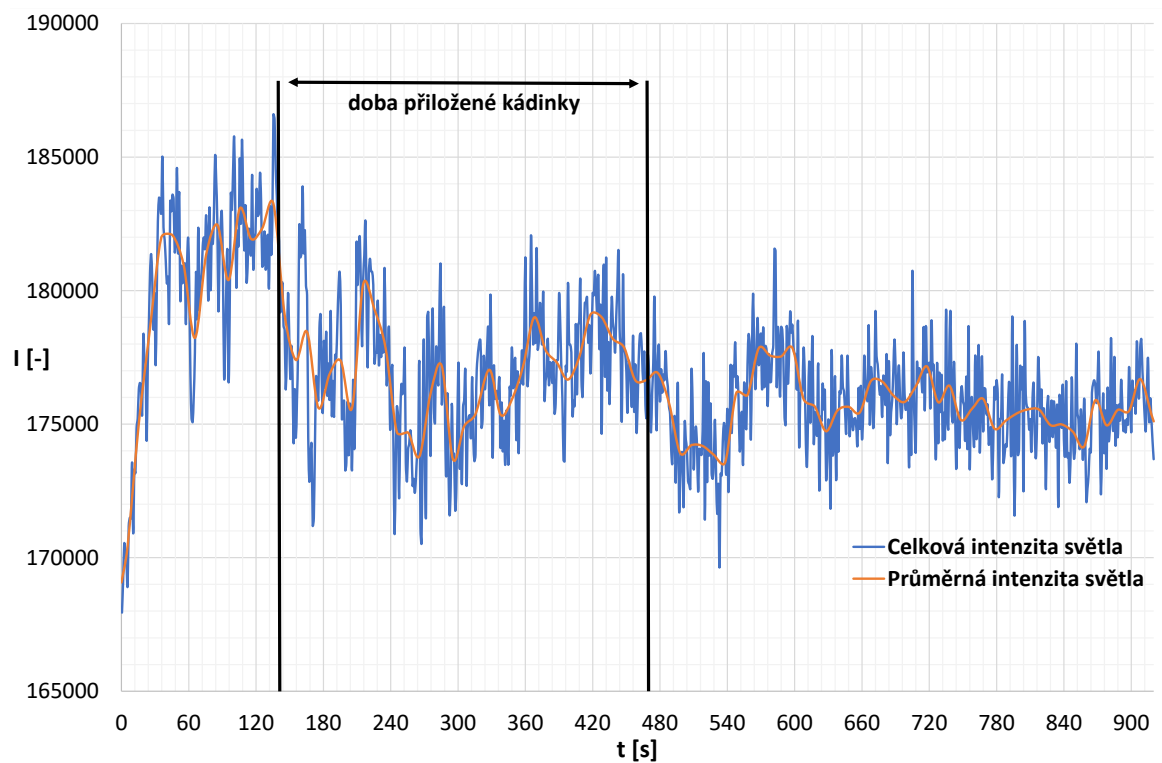
Obr. 8.7: Závislost intenzity světla na čase při teplotě 48 °C, kde hlavní vlnová délka je 635,841 nm (šedé označení)

Na grafu (8.8) jde vidět, že po přiložení nádoby s vodou se začala měnit intenzita světla na některých vlnových délkách. Proto lze tvrdit, že vlnová délka se mění v závislosti na teplotě.

Celková intenzita světla (8.9) je ze začátku okolo hodnoty 170000. Poté stoupne nad hodnotu 180000 a někdy dosahuje až 185000. Když se to vezme podle průměru, tak po přiložení kádinky s vodou se intenzita světla sníží a přetrvává v rozsahu od 175000–180000. Ve 470. sekundě je kádinka odebrána, a proto se intenzita světla sníží (vliv změny teploty) a po zhruba 120s se intenzita světla ustálí a přetrvá okolo hodnoty 175000.



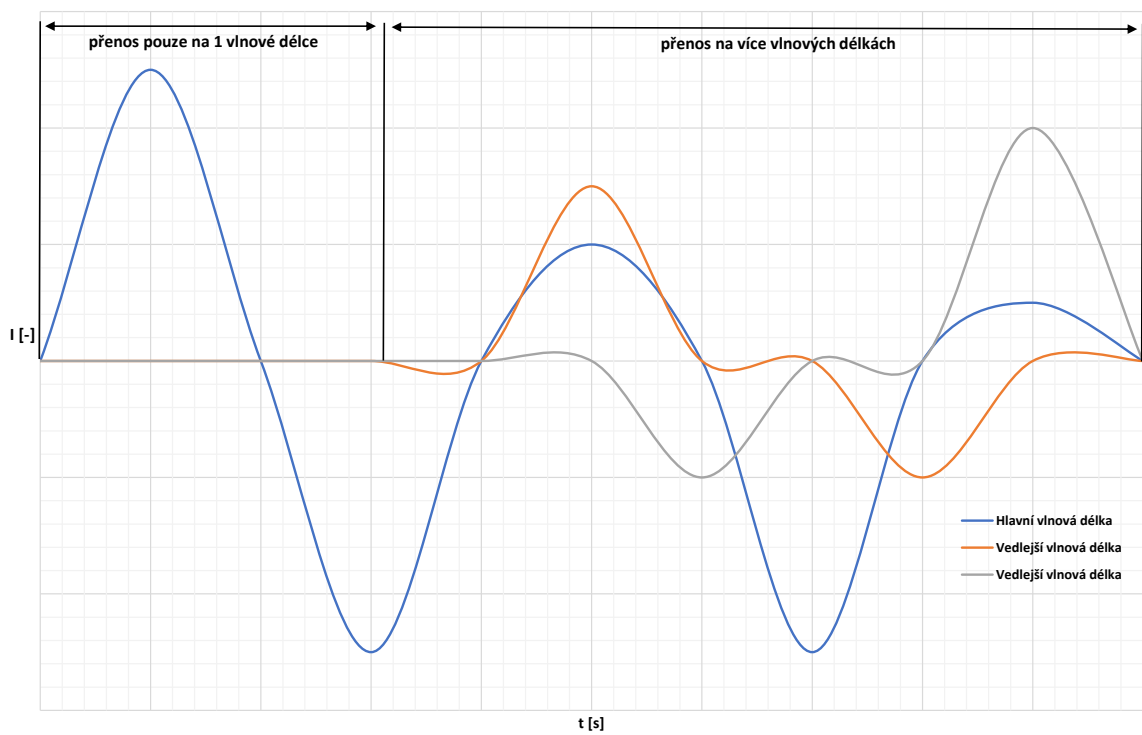
Obr. 8.8: Závislost intenzity světla na čase před a po přiložení kádinky s vodou 48 °C



Obr. 8.9: Závislost celkové a průměrné intenzity světla na čase při teplotě 48 °C

9 Diskuze

V praktické části na senzorické optické vlákno byla přiložena kádinka s vodou s teplotou 0 °C, 48 °C a poté s referenční teplotou 24 °C. Při referenční teplotě po přiložení kádinky s vodou s teplotou 24 °C se intenzita světla na vlnových délkách zvláště neměnila. Po přiložení kádinky s vodou 0 °C a 48 °C se intenzita světla na různých vlnových délkách ihned měnila (zvětšovala či zmenšovala). Po přiložení kádinky s teplotou 0 °C se energie na hlavní vlnové délce (635,841 nm) přesune do vedlejší vlnové délky (635,892 nm) a takto dochází ke střídání do konce měření. Také se zvětšila intenzita světla na dalších vlnových délkách, a proto do nich také byla přesunuta část energie z hlavní vlnové délky. Protože teplota okolo senzorického optického vlákna byla 0 °C, tak předtím, než se dostala zpátky do referenční hodnoty, bylo pravděpodobně potřeba více času k ustálení (platí i pro měření s teplotou 48 °C). Pro přidání kádinky s vodou 48 °C poklesla intenzita světla na hlavní vlnové délce a jednu dobu se energie přesunula pouze do vedlejší vlnové délky 635,763 nm. Uprostřed měření při teplotě 48 °C se energie z hlavní vlnové délky přesunula i do ostatních vedlejších vlnových délek a tento jev trval zhruba 25 s (jako bylo uvedeno dříve, není možné určit, co tento jev vyvolal, ale mohl být problém například ve sváru či změně teploty na laserové diodě). Pravděpodobně nastává to, že se intenzita světla (energie) z hlavní vlnové délky přesouvá do vedlejších vlnových délek, a tím pádem se její amplituda zmenšuje a ostatních vedlejších vlnových délek zvětšuje. To způsobuje, že kdyby se toto vlákno příkladně používalo u telekomunikačních přenosů, tak by se signál v některých částech přenášel po různých vlnových délkách, a proto by došlo pravděpodobně ke zpoždění či ztrátě některých signálů. Příklad je dán na grafu (9.1). Bohužel nelze poznat na tomto měření, zda se na různých vlnových délkách přenáší šum či signál. Bylo by potřeba namodulovat nějaký signál na začátku měřícího zapojení a na konci měřícího zapojení by se pomocí filtru vybrala pouze jedna vlnová délka a s osciloskopem by došlo ke zjištění, co se přenáší na dané vlnové délce. Z praktického využití jde vidět, že senzor zaznamenává změnu intenzity světla na různých vlnových délkách. Tím pádem by se mohl vytvořit senzor pomocí optického vlákna, který by například hlídal teplotu nějaké místnosti, kde by se uchovávalo jídlo (farmy, obchody, továrny) či léky (lékárny, továrny). Také by se mohl použít tento senzor jako zabezpečení objektu. Kdyby se najednou změnila teplota v místnosti, senzor by to detekoval pomocí změny intenzity na různých vlnových délkách. Mohl by se použít krystal či rezonátor, který by detekoval změnu intenzity (byl by udaný nějaký interval, ve kterém by to bylo porovnáváno).



Obr. 9.1: Příklad přenosu signálu na více vlnových délkách

10 Závěr

V teoretické části byla popsána jednotlivá optická vlákna, teorie polarizovaného světla a senzorická optická vlákna. Teoretická část posloužila k pochopení problematiky, kterou se zabývá tato bakalářská práce. Cílem práce bylo navrhnout a analyzovat soubor měření, u kterého bude působit změna teploty na senzorické optické vlákno a přitom se bude zjišťovat, jak se mění polarizace a frekvence. Bylo navrženo senzorické optické vlákno, které okamžitě reagovalo na změnu teploty v okolí (výsledky byly zjištěny pomocí spektrálního analyzátoru a polarimetru). Senzorické optické vlákno při měření s referenční teplotou 24 °C nezaznamenalo žádné změny po přiložení kádinky s vodou 24 °C. I když se v některých částech měření naskytla událost věcí, která měnila intenzitu a stav polarizace (problém v některé části zapojení, změna teploty laserové diody), tak měření vyšlo podle předpokladu. Po přiložení kádinky s vodou 0 °C se ihned začala měnit intenzita světla na různých vlnových délkách a měnil se i stav polarizace světla (senzor reagoval velice dobře na změnu teploty). Po přiložení kádinky s vodou 48 °C se intenzita vlnových délek také měnila (bylo vybuzeno více vlnových délek) a měnil se i stav polarizace světla. Senzorické optické vlákno bylo více náchylnější k vyšším teplotám (změny intenzity světla na vlnových délkách byly větší než u kádinky s vodou 0 °C). Tímto měřením lze tvrdit, že senzorické optické vlákno detekovalo změny při určitých změnách teploty (vlnová délka se mění v závislosti na teplotě) a naměřené výsledky dokázaly, že lze tento senzor použít v praxi. Například jedna z možností je použití v prostoru citlivém na změnu teploty (sklad čerstvých surovin či léků, zabezpečení objektu). Podle tohoto senzoru by se dala zjistit změna teploty a také regulovat změnu teploty místnosti. Vhodné by bylo postupem času zjistit, co se přenáší při vybuzení více vlnových délek. Do budoucna by bylo užitečné zkusit namodulovat nějaký signál do vlákna a poté pomocí filtrů a osciloskopu zjistit, co bylo přeneseno u každé vlnové délky. Tento nápad by byl dobrým námětem k pokračování v diplomové práci.

Literatura

- [1] GHATAK, Ajoy a K. THYAGARAJAN. *An Intoduction to Fiber Optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. ISBN 0-521-57785-3.
- [2] AGRAVAL, Govind P. *Fiber-Optic Communication Systems*. 4rd. ed. New Jersey: John Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-50511-3.
- [3] CRISP, John a Barry ELLIOTT. *Introduction to Fiber Optics*. 3rd. ed. Oxford: Newnes, c2005. ISBN 9780750667562.
- [4] SENIOR, John. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. 3rd ed. Harlow: Pearson, c2009. ISBN 9780130326812.
- [5] KUBÍČEK, Zdeněk. *Optické vláknové spoje*. Praha: Nadas, c1981. ISBN OS-31-020-81 05-40. OS-31-020-81 05-40.
- [6] FILKA, Miloslav. *OPTOELEKTRONIKA PRO TELEKOMUNIKACE A INFORMATIKU*. 2. roz. vyd. Brno: Centa, c2017. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [7] MENDEZ, Alexis a T. MORSE. *Specialty Optical Fibers Handbook*. Cambridge: Academic Press, c2007. ISBN 9780123694065.
- [8] SMITH, Warren J. *Modern Optical Engineering*. 4th edit. New York: McGraw-Hill Education, c2008. ISBN 9780819470966.
- [9] NEUMANN, Ernst-Georg. *Single-Mode Fibers: Fundamentals*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, c1988. ISBN 978-3-662-13699-7.
- [10] VAŠINEK, Vladimír. *Optoelektronika*. Ostrava: VŠB v Ostravě, c1990. ISBN 80-7078-054-1.
- [11] PASCHOTTA, Rüdiger. *Field Guide to Optical Fiber Technology*. 1th ed. Bellingham: SPIE Press, c2010. ISBN 978-0819480903.
- [12] KAMINOW, Ivan, Tingye LI a Alan E. WILLNER. *Optical Fiber Telecommunications VA: Components and Subsystems*. 5th ed. Amsterdam: Academic Press, c2008. ISBN 978-0-12-374171-4.
- [13] KAMINOW, Ivan P., Tingye LI a Alan E. WILLNER. *Optical Fiber Telecommunications VIA: Components and Subsystems*. 6th ed. Oxford: Academic Press, c2013. ISBN 9780123969583.
- [14] COLLETT, Edward. *Polarized Light in Fiber Optics*. 1th ed. New Jersey: Polawave Group, c2003. ISBN 0-9677167-1-3.

- [15] GOLDSTEIN, Dennis H. *Polarized Light*. 3th ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1439830406.
- [16] KLIGER, David S., James W. LEWIS a Cora Einterz RANDALL. *Polarized Light in Optics and Spectroscopy*. 1th ed. San Diego: Academic Press, c1990. ISBN 978-0-12-414975-8.
- [17] KUMAR, Arun a Ajoy GHATAK. *Polarization of Light with Applications in Optical Fibers*. 1th edit. Bellingham: SPIE Press, c2011. ISBN 9780819482150.
- [18] COLLETT, Edward. *Field Guide to Polarization*. 1th ed. Bellingham: SPIE Press, c2005. ISBN 0-8194-5868-6.
- [19] GRATAN, K.T.V. a B.T. MEGGITT. *Optical Fiber Sensor Technology: Fundamentals*. London: Springer US, c2000. ISBN 978-1-4419-4983-7.
- [20] GRATAN, K.T.V. a B.T. MEGGITT. *Optical Fiber Sensor Technology: Volume 1*. London: Springer Netherlands, c1995. ISBN 978-94-010-4530-8.
- [21] Lesiak, P. et al (2010) A Hybrid Highly Birefringent Fiber Optic Sensing System for Simultaneous Strain and Temperature Measurement. *Photonics Letters of Poland*, Vol. 2 (3), pp.140-142. doi:10.1109/JSEN.2011.2114650
- [22] Zhang, Feng and Lit, John W.Y., "Temperature and Strain Sensitivity Measurements of High-Birefringent Polarization-Maintaining Fibers"(1993). *Physics and Computer Science Faculty Publications*. 24.
- [23] KYSELÁK, Martin, Filip DVORÁK, Jan MASCHKE a Čestmír VLČEK, ed. Phase response of polarization-maintaining optical fiber to temperature changes. *Optica Applicata*. 2017, 47(4), 635-649. DOI: 10.5277/oa170412.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

ELP	eliptická polarizace – Elliptical Polarization
FC	fast konektor – Fast Connector
HB	vysoký dvojlom – High Birefringence
LB	nízký dvojlom – Low Birefringence
LCP	levotočivá kruhovitá polarizace – Left Circular Polarization
LED	elektroluminiscenční dioda – Light-Emitting Diode
LHP	lineární horizontální polarizace – Linear Horizontal Polarization
LVP	lineární vertikální polarizace – Linear Vertical Polarization
L+45P	lineární +45° polarizace – Linear +45° Polarization
L-45P	lineární -45° polarizace – Linear -45° Polarization
MM	mnohovidové – Multi Mode
OTDR	metoda, která analyzuje a měří optickou trasu – Optical Time Domain Reflectometry
PM	zachovávající polarizaci – Polarization Maintaning
RCP	pravotočivá kruhovitá polarizace – Right Circular Polarization
SM	jednovidové – Single Mode