

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Kristián Bučko



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

**MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ POLARIZOVANÉHO SVĚTLA NA
VÝSTUPU VLNOVÉHO MULTIPLEXU A JEHO
OPTIMALIZACE PRO POUŽITÍ V SENZOROVÉ TECHNICE**

MEASUREMENT OF POLARIZED LIGHT PROPERTIES ON THE DENSE WAVELENGTH DIVISION
MULTIPLEXING IN OPTICAL-FIBER SENSOR SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kristián Bučko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Kristián Bučko

ID: 195287

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Měření vlastností polarizovaného světla na výstupu vlnového multiplexu a jeho optimalizace pro použití v senzorové technice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem diplomové práce je analýza způsobu měření optického výkonu s důrazem na známé metody měření výkonu polarizovaného světla šířícího se optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami. Práce se zabývá možnostmi měření optického výkonu pro každou rovinu šíření zvlášť. Současné měření okamžitého stavu polarizace a velmi přesné měření optického výkonu umožní získat potřebné informace o nelineárních jevech probíhajících v optickém vlákně. Součástí práce je návrh měřícího pracoviště s DWDM multiplexem a jeho praktická realizace.

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: 1.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

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

Konzultant: doc. Ing. Martin Kyselák, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Polarizácia svetla je jedným z najpozoruhodnejších javov v prírode a viedla k mnohým objavom v opticko-telekomunikačnej sfére. V diplomovej práci sú popísané základné poznatky ohľadom polarizovaného svetla, ktoré v sebe zahrňujú typy polarizácie svetla, problematiku Poincarého gule, polarizačnej elipsy a pod. Dôraz je taktiež kladený na meranie optického výkonu, kde bola spravená analýza rôznych typov fotodetektorov a taktiež aj polarimetrov. V praktickej časti tejto práce je samotný návrh pracoviska popísaný v schémach. Taktiež sú analyzované všetky zariadenia v pracovisku a následne demonštrované meranie vo viacerých scenároch. V záverečnej kapitole je diskusia s nameranými výsledkami a grafickými závislosťami, porovnanie a analyzovanie výsledkov.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

DWDM, fotodetektor, optický výkon, Poincarého guľa, polarimeter, polarizované svetlo, stupeň polarizácie.

ABSTRACT

The polarization of light is one of the most remarkable phenomena in nature and has led to many discoveries in the optical-telecommunications sphere. The master's thesis describes the basic knowledge about polarized light, which includes the types of light polarization, the issue of Poincaré sphere, polarizing ellipse, etc. Emphasis is also placed on the measurement of optical power, where the analysis of various types of photodetectors and also polarimeters was performed. In the practical part of this work, the design of the workplace itself is described in the diagrams. Also, all devices in the workplace are analyzed and subsequently demonstrated measurement in several scenarios. The final chapter is a discussion with the measured results and graphical dependencies, comparison and analysis of results.

KEYWORDS

DWDM, photodetector, optical power, Poincaré sphere, polarimeter, polarized light, degree of polarization.

BUČKO, Kristián. *Měření vlastností polarizovaného světla na výstupu vlnového multiplexu a jeho optimalizace pro použití v senzorové technice*. Brno, 2021, 66 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Měření vlastností polarizovaného světla na výstupu vlnového multiplexu a jeho optimalizace pro použití v senzorové technice“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Veľmi rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi prof. Ing. Miloslavovi Filkovi, CSc. s konzultantom doc. Ing. Martinom Kyselákom, Ph.D. za ich odborné rady, ochotu poskytnúť laboratórium optoelektroniky Univerzity obrany a čas strávený pri konzultovaní tejto práce. Poďakovanie patrí taktiež rodine a priateľke za podporu.

Brno

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	11
1 Základy polarizovaného svetla	12
1.1 Typy polarizácie svetla	12
1.1.1 Polarizácia odrazom a lomom - Brewsterové pravidlo	13
1.1.2 Polarizácia dvojlomom	14
1.1.3 Polarizácia polaroidom	14
1.2 Stupeň polarizácie DOP	14
1.3 Polarizované optické žiarenie vo vláknach zachovávajúcej polarizáciu	15
1.4 Polarizačná elipsa	16
1.5 Poincarého guľa	17
1.6 Stokesov formalizmus	19
1.7 Polarizačné optické vláknové senzory	19
1.7.1 Princíp činnosti polarizačného OVS	23
1.8 Meranie polarimetrom	23
1.9 Zlučovanie kanálov v optickej sieti	24
1.9.1 Časový multiplex TDM	25
1.9.2 Vlnový multiplex WDM	25
1.9.3 Hrubý vlnový multiplex CWDM	25
1.9.4 Hustý vlnový multiplex DWDM	26
2 Meranie optického výkonu	27
2.1 Metódy merania	28
2.2 Optický merací systém	28
2.3 Jednotky merania: „dB“ a „dBm“	30
2.4 Snímače optického žiarenia	30
2.5 Fotodetektory Si, Ge, InGaAs	31
3 Návrh pracoviska pre meranie	33
3.1 Schémy zapojenia	33
3.1.1 RouterBoard	34
3.1.2 Zdroj signálu	35
3.1.3 PM vlákna a spoje	36
3.1.4 DWDM modul	36
3.1.5 Polarimeter	37
3.1.6 Lineárny polarizátor	38
3.1.7 Fotodiódy	39

3.1.8	Merač optického výkonu	40
4	Realizácia meraní	41
4.1	Meranie výkonu prijatého na fotodióde s jedným zdrojom signálu . .	41
4.1.1	Meranie výkonu prijatého na fotodióde s jedným zdrojom signálu bez SM vlákna	42
4.1.2	Meranie výkonu prijatého na fotodióde s jedným zdrojom signálu a 10km SM vláknom	43
4.2	Meranie výkonu prijatého na polarimetri s jedným zdrojom signálu .	44
4.3	Meranie výkonu prijatého na fotodióde s piatimi zdrojmi signálu . . .	48
4.3.1	Meranie výkonu prijatého na fotodióde s piatimi zdrojmi signálu a 10 km SM vláknom	48
4.3.2	Meranie výkonu prijatého na fotodióde s piatimi zdrojmi signálu a 40 km SM vláknom	49
4.4	Meranie výkonu prijatého na polarimetri s piatimi zdrojmi signálu . .	50
5	Diskusia	53
5.1	Porovnanie merania fotodiódou s jedným zdrojom bez SM vlákna a s SM vláknom 10 km	53
5.2	Porovnanie merania fotodiódou s jedným zdrojom a s piatimi zdrojmi s SM vláknom 10 km	54
5.3	Porovnanie merania fotodiódou s piatimi zdrojmi s SM vláknom 10 km a 40 km	55
5.4	Porovnanie všetkých Stokesových parametrov pri meraní polarimetrom s jedným zdrojom bez SM vlákna	56
5.5	Porovnanie stupňov polarizácie <i>DOP</i> pri meraní polarimetrom s jedným zdrojom a s piatimi zdrojmi	57
6	Zhrnutie a záver	59
	Literatúra	60
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	63
	Zoznam príloh	64
	A Fotografie pri navrhovaní pracoviska	65
	B Elektronické prílohy - obsah	66

Zoznam obrázkov

1.1	a) svetlo nepolarizované b) svetlo lineárne polarizované	12
1.2	Brewsterov odraz svetla	13
1.3	Polarizácia dvojlomom	14
1.4	Priečny rez PMF typu PANDA, BOW-TIE a Elipsa	16
1.5	Polarizačná elipsa	17
1.6	Poincarého guľa	18
1.7	Zobrazenie stavov polarizácie na Poincarého guľi	18
1.8	Princíp konštrukcie polarizačných OVS s dvomi polarizátormi	20
1.9	Polarizačný OVS elektrického prúdu využívajúci Faradayov jav	21
1.10	Polarizačný OVS elektrického napätia a) pozdĺžny b) priečny	22
1.11	OVS na súčasné meranie prúdu a napätia vo výkonových vedeniach	22
1.12	Princíp činnosti polarizačného optického vlákňového senzoru	23
1.13	Princíp činnosti polarimetra - technika otáčajúcej sa vlnovej doštičky	24
1.14	Vlnové dĺžky CWDM	25
2.1	Jednoduché zapojenie pracoviska pre meranie optického výkonu	27
2.2	Bloková schéma merača optického výkonu	28
2.3	Meranie optického výkonu na optickej trase	29
2.4	Citlivosť detektorov Si, Ge, InGaAs v závislosti od vlnovej dĺžky a materiálu	32
3.1	Návrh pracoviska s DWDM a fotodiódou	33
3.2	Návrh pracoviska s DWDM a polarimetrom	34
3.3	RouterBoard CRS106-1C-5S	34
3.4	Média-konvertor TP-Link MC220L	35
3.5	Mikrotik SFP S-55DLC80D	36
3.6	DWDM multiplexor	37
3.7	Polarimeter Thorlabs PAX1000IR2/M	38
3.8	Lineárny polarizátor ILP1550PM-FC	38
3.9	Príklad použitej fotodiódy Thorlabs FGA01FC	39
3.10	Merač optického výkonu Vega	40
4.1	Návrh pracoviska s DWDM, jedným zdrojom a fotodiódou	41
4.2	Optický výkon snímaný fotodiódou pri 4-hodinovom meranom priebehu	42
4.3	Optický výkon snímaný fotodiódou pri 24-hodinovom meranom priebehu	43
4.4	Optický výkon snímaný fotodiódou pri 16-hodinovom meranom priebehu s 10 km SM vlákňom	44
4.5	Návrh pracoviska s DWDM, jedným zdrojom a polarimetrom	44
4.6	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_1	45

4.7	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_2	46
4.8	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_3	46
4.9	Znázornenie stupňa polarizácie DOP	47
4.10	Návrh pracoviska s DWDM, piatimi zdrojmi a fotodiódou	48
4.11	Optický výkon snímaný fotodiódou pri 15-minútovom meraní pri- behu s 10 km SM vláknom	49
4.12	Optický výkon snímaný fotodiódou pri 15-minútovom meraní pri- behu s 40 km SM vláknom	49
4.13	Návrh pracoviska s DWDM, piatimi zdrojmi a polarimetrom	50
4.14	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_1	51
4.15	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_2	51
4.16	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_3	52
4.17	Znázornenie stupňa polarizácie DOP	52
5.1	Porovnanie optického výkonu pri meraní s jedným zdrojom bez SM vlákna a s 10 km SM vláknom	54
5.2	Porovnanie optického výkonu pri meraní s jedným zdrojom a s piatimi zdrojmi s 10 km SM vláknom	55
5.3	Porovnanie optického výkonu pri meraní s piatimi zdrojmi s 10 km a 40 km SM vláknom	56
5.4	Porovnanie všetkých Stokesových parametrov pri meraní s jedným zdrojom bez SM vlákna	57
5.5	Porovnanie stupňa polarizácie pri meraní s jedným zdrojom a s pia- timi zdrojmi	58
A.1	Voľba zdrojov	65
A.2	DWDM mux/demux	65

Zoznam tabuliek

3.1	Parametre vlastnosti fotodiód	39
-----	---	----

Úvod

Polarizácia svetla je jedným z najpozoruhodnejších javov v prírode a viedla k mnohým objavom v opticko–telekomunikačnej sfére. Pred päťdesiatimi rokmi bolo o základoch polarizovaného sveta veľmi malé povedomie, napríklad aj v oblasti matematickej formulácie nepolarizovaného a taktiež polarizovaného svetla. Tieto otázky sa spolu s matematickými nástrojmi na riešenie polarizovaného svetla začali vážne rozoberať v päťdesiatych rokoch 20. storočia. Výsledkom je, že dnes existuje veľmi dobré pochopenie polarizovaného svetla.

V diplomovej práci budú popísané základné poznatky o polarizovanom svetle, ktoré v sebe zahrňujú typy polarizácie svetla, problematiku Poincarého gule a stupňa polarizácie, polarizačnej elipsy a Stokesovho formalizmu. Dôraz bol taktiež kladený na meranie optického výkonu, kde bola rozobraná analýza rôznych typov fotodetektorov. V praktickej časti tejto práce bude samotný návrh pracoviska popísaný v schémach. Taktiež budú analyzované všetky zariadenia v pracovisku. Po kompletnej analýze sa budú realizovať merania v rôznych scenároch s predradným vláknom a taktiež aj bez neho. Merania budú prebiehať s jedným zdrojom signálu a taktiež aj s piatimi zdrojmi signálu. Optický výkon prijatý na fotodióde bude taktiež overený aj meraním na polarimetri, kde sa samotné výsledky premietnu v Stokesových parametroch. Po realizácii všetkých scenárov sa vyhodnotí, či je vhodné svetlo hustého vlnového multiplexu pre napájanie optovláknového polarizačného senzora, aké zmeny prebiehajú v tomto type senzora v závislosti na čase a hlavne, ak je senzor s týmto multiplexom vhodný, tak či je lepšie mať v reálnych podmienkach tento senzor zostrojený s fotodiódou a lineárnym polarizátorom alebo s polarimetrom. V záverečnej kapitole tejto práce sa nakoniec dosiahnuté výsledky premietnu do grafických závislostí a prebehne analyzovanie všetkých dosiahnutých výsledkov a zhodnotenie požadovaných cieľov tejto práce.

1 Základy polarizovaného svetla

Celkovú intenzitu svetla I_c v optickom vlákne je možné rozložiť na časť polarizovanú I_p a na časť nepolarizovanú I_n , pritom platí, že celková intenzita I_c je definovaná jednoducho ako ich súčet.

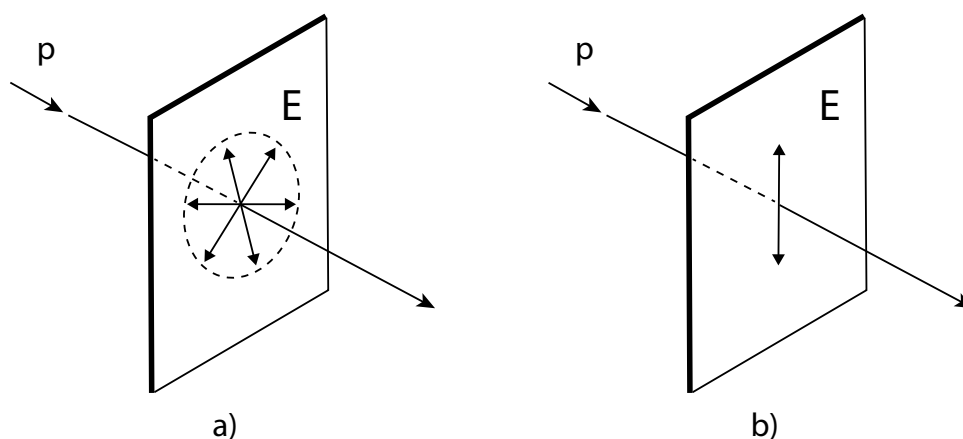
$$I_c = I_p + I_n. \quad (1.1)$$

Instantný polarizačný stav ovplyvňuje celý rad faktorov, najmä ak ide o svetlo odrazené od rozhrania, svetlo absorbované prostredím, rozptyl a index lomu u materiálov, ktoré niesu izotropné. Závisí aj na čistote materiálu a taktiež nehomogenitách prostredia. Využitie vlastností polarizovaného svetla má veľmi široké využitie v mnohých oboroch, napr. meranie koncentrácií, fotoelasticimetria, displeje z tekutých kryštálov a ich vlastnosti sú využité vo fototechnike [1].

1.1 Typy polarizácie svetla

Polarizácia nastáva len pri priečnom vlnení. Svetlo je priečne elektromagnetické vlnenie, kde vektor intenzity elektrického pole \vec{E} je vždy kolmý na smer, ktorým sa vlnenie šíri. Vektor \vec{E} v podstate leží v rovine, na nej je kolmý lúč svetla. U prirodzeného svetla je smer vektoru \vec{E} v danej rovine v celku náhodný a takému svetlu hovoríme nepolarizované, viz 1.1a.

V prípade ak vektor \vec{E} kmitá neustále v jednej priamke, tak hovoríme o svetle lineárne polarizovanom viz 1.1b. Prirodzene nepolarizované svetlo sme schopní premeniť na svetlo polarizované napr. odrazom a lomom, absorpciou alebo dvojlomom. Ľudské oko nerozlišuje prirodzené nepolarizované svetlo od polarizovaného [2].



Obr. 1.1: a) svetlo nepolarizované b) svetlo lineárne polarizované

1.1.1 Polarizácia odrazom a lomom - Brewsterové pravidlo

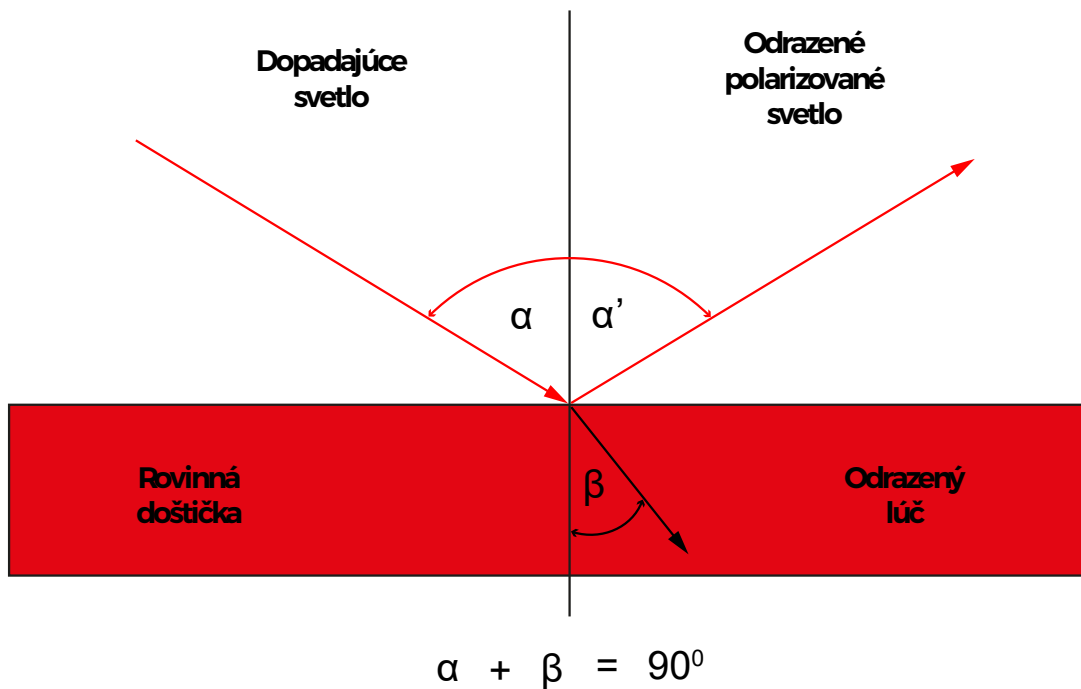
Šíriaci sa lúč nepolarizovaného svetla dopadajúci pod uhlom dopadu α na rovnú doštičku a odráža sa podľa zákona o odraze svetla pod uhlom α' . Lúč odrazený pod uhlom α' je čiastočne lineárne polarizovaný a jeho vektor intenzity elektrického poľa \vec{E} bude taktiež oscilovať v jednej spoločnej rovine, ktorá je kolmá na rovinu dopadu.

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (1.2)$$

kde n_1 a n_2 sú indexy popisujúce lom jednotlivých prostredí [3].

Pri odraze a lome svetla dochádza k čiastočnej polarizácii. Podľa typu rovnej doštičky sa môže lúč ďalej lámať cez doštičku, stane sa tak v prípade, pokiaľ je doštička z priepustných alebo priesvitných materiálov. Pod určitým uhlom, ktorý sa nazýva Brewsterov uhol α_B , dochádza k úplnej lineárnej polarizácii odrazeného svetla. Brewsterov uhol sa mení v závislosti od indexu lomu odrazového prostredia n_2 a od vlnovej dĺžky polarizovaného svetla [3]. V tom prípade platí rovnica:

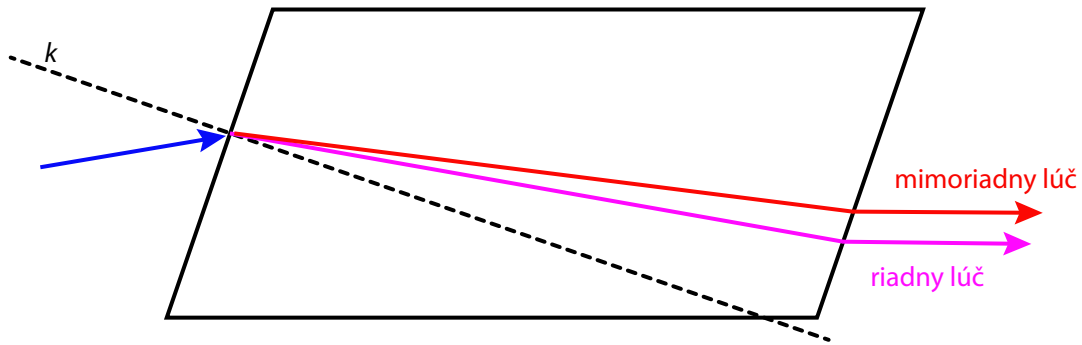
$$\operatorname{tg} \alpha_B = n_2. \quad (1.3)$$



Obr. 1.2: Brewsterov odraz svetla

1.1.2 Polarizácia dvojlomom

Polarizačný dvojlom nastáva len pri prechode svetla cez opticky anizotropné látky. Svetelný lúč sa rozdelí na riadny lúč, ktorý pokračuje v pôvodnom smere, mimoriadny lúč sa zasa odchýli od pôvodného smeru. Oba lúče sú polarizované, pričom vektory intenzity v riadnom a mimoriadnom lúči sú na seba kolmé, resp. sú v kolmých rovinách [4].



Obr. 1.3: Polarizácia dvojlomom

1.1.3 Polarizácia polaroidom

V technickej praxi sa k polarizácii svetla používajú špeciálne filtre - polaroidy. Sú zhotovené z dvoch vrstiev plastického materiálu, medzi nimi sú kryštálíky mikroskopických rozmerov látky nazývanej herapatit. Táto látka vykazuje dvojlom a rôzne polarizované svetelné vlny sa v nich rozdielne absorbujú. Pri vhodnom usporiadaní kryštálov herapatitu z polaroidu vychádza len polarizované svetlo mimoriadneho paprsku. Polaroid v podstate funguje veľmi podobne ako farebné filtre. Tie prepúšťajú z bieleho svetla, ktoré na ne dopadá, len svetlo určitých farieb. Taktiež polaroid prepúšťa len svetlo polarizované v určitom smere. Pre ľudské oko sa polarizované svetlo nijako nelíši od svetla prirodzeného (nepolarizovaného). K tomu, aby polarizované svetlo bolo odlišené, je potrebné zistiť orientáciu roviny, v ktorej leží polarizovaná svetelná vlna a taktiež je potrebný analyzátor. Ten je tvorený vhodnými polarizačnými prostriedkami, ktoré prepúšťajú polarizované svetlo len s určitou orientáciou kmitovej roviny [4].

1.2 Stupeň polarizácie DOP

Stupeň polarizácie *DOP* (Degree of Polarization) predstavuje priemerný stav polarizácie svetla cez široký spektrálny rozsah. *DOP* je založený na Stokesových para-

metroch.

Za účelom vyhodnocovania polarizácie bola zavedená veličina stupeň polarizácie DOP , ktorá je definovaná ako pomer intenzít polarizovaného svetla I_p a celkového množstva svetla v uvažovanom optickom zväzku I_c [1].

$$DOP = \frac{I_p}{I_c} \leq 1. \quad (1.4)$$

Stupeň polarizácie tak vyjadruje pomer intenzít svetla istým spôsobom polarizovaného a všetkého uvažovaného svetla vo zväzku. Pre špeciálne prípady polarizačných stavov boli ďalej zavedené skratky $DOLP$ a $DOCP$ vyjadrujúce stupeň lineárnej, respektíve kruhovej polarizácie, pričom platí, že

$$DOLP = \frac{I_{LP}}{I_c} \leq 1 \quad (1.5)$$

a podobne

$$DOCP = \frac{I_{CP}}{I_c} \leq 1, \quad (1.6)$$

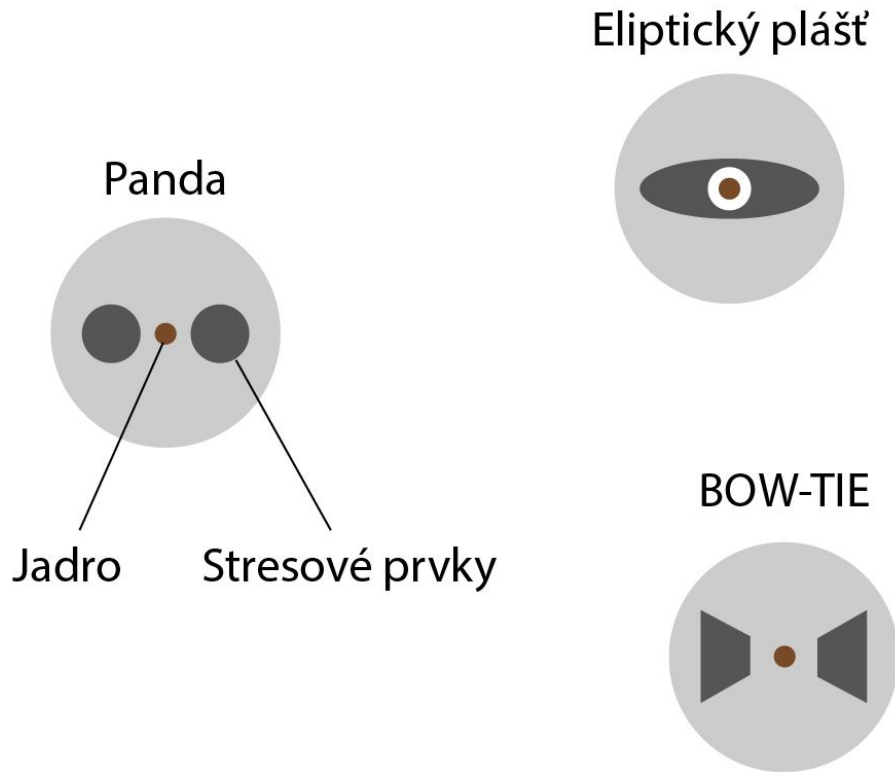
kde I_{LP} predstavuje optickú intenzitu lineárne polarizovaného svetla a I_{CP} predstavuje optickú intenzitu kruhového polarizovaného svetla [1, 5].

Ďalej platí, že

$$DOP = \sqrt{DOLP^2 + DOCP^2}. \quad (1.7)$$

1.3 Polarizované optické žiarenie vo vláknach zachovávajúcich polarizáciu

Špeciálnym prípadom optických vlákien, ich vlastnosti sú v práci ďalej využívané, sú vlákna zachováajúce polarizáciu PMF (Polarization Maintaining Fiber). Tieto vlákna sú vyrobené v podstate podobnou technológiou ako bežné komunikačné jednovidové vlákna, avšak je v nich umelo vytvorené anizotropné prostredie na princípe vložení stresových oblastí do plášťa. Plášť tak má v rôznych miestach rôzne teplotné spektrum, príklad môžeme vidieť na obrázku viz 1.4 [6, 7].



Obr. 1.4: Priečny rez PMF typu PANDA, BOW-TIE a Elipsa

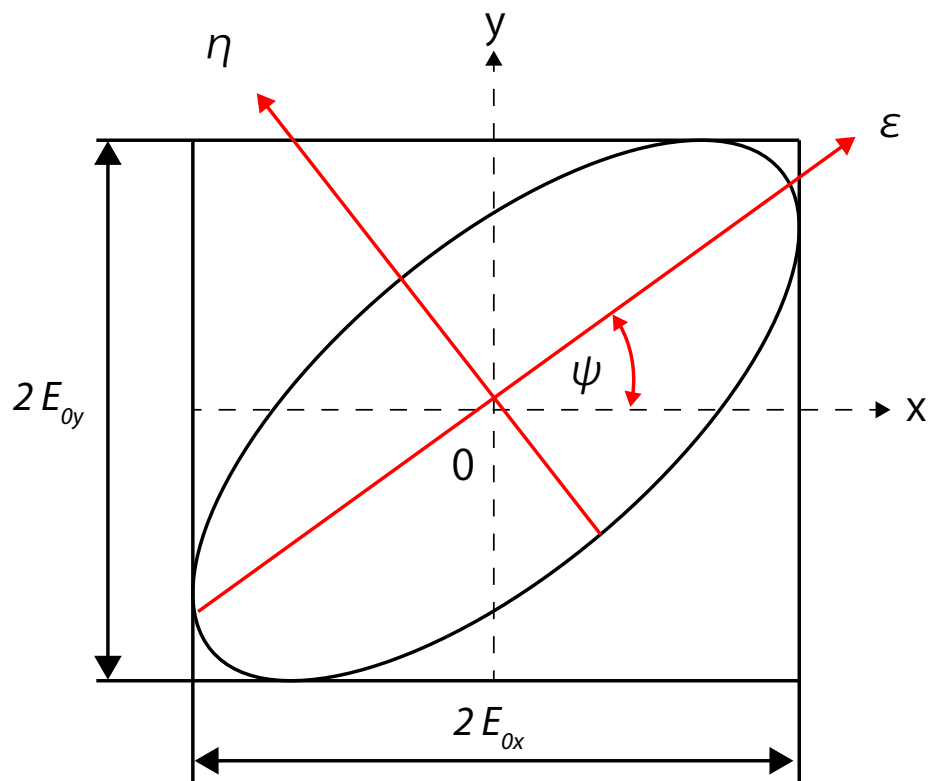
1.4 Polarizačná elipsa

Pokiaľ špička vektora intenzity elektrického poľa \vec{E} meniaci sa v čase opisuje elipsu, tak následne vzniká polarizačná elipsa. Podľa výskumu Fresnelovej vlnovej teórie $E_x(z, t)$ a $E_y(z, t)$ popisujú vzájomnú sínusovú osciláciu v rovinách $x - z$ a $y - z$. V rovnici elipsy je však vylúčené použitie propagátora časového priestoru $\omega t - kz$ a rovnica elipsy má v konečnom dôsledku tvar:

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (1.8)$$

kde $\delta = \delta_y - \delta_x$.

Vyššie zmienená rovnica popisuje rovnicu elipsy, ktorá sa vzťahuje k polarizovanému svetlu. Zložky $E_x(z, t)$ a $E_y(z, t)$ tu zostávajú závislé na čase. Na nasledujúcom obrázku viz 1.5 je demonštrovaný rotačný $\xi - \eta$ súradnicový systém. Kvôli konštantným amplitúdam E_{0x} , E_{0y} a fáze δ zostáva polarizačná elipsa pevná tak, ako sa šíri paprsok [3].



Obr. 1.5: Polarizačná elipsa

1.5 Poincarého guľa

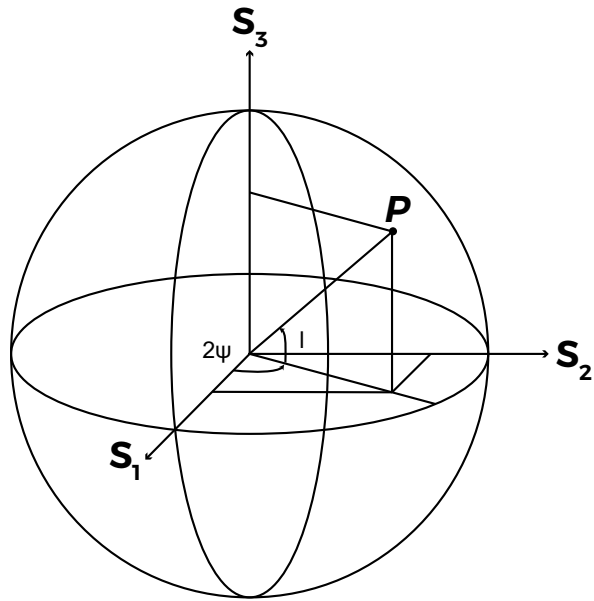
Poincarého guľa (The Poincaré Sphere) je obrazný prostriedok, pomocou ktorého sme schopní zobraziť polarizačné stavy v 3D zobrazení. Všetky stavy polarizácie sú predstavované bodom na povrchu tejto gule. Tento bod je tzv. koncovým bodom vektora s počiatkom v strede gule. Stupeň polarizácie DOP závisí od vzdialenosti bodu od stredu Poincarého gule. V prípade, že sa bod nachádza v tomto strede, je to jasný znak toho, že ide o nepolarizované svetlo. Avšak pokiaľ sa nachádza na povrchu, tak je to polarizované svetlo.

Jednotkovú rovnicu Poincarého gule definujeme:

$$\begin{aligned} x &= \cos(2\chi) \cos(2\psi), 0 \leq \psi < \pi, \\ y &= \cos(2\chi) \sin(2\psi), -\frac{\pi}{4} < \psi \leq \frac{\pi}{4}, \\ z &= \sin(2\psi), \end{aligned} \tag{1.9}$$

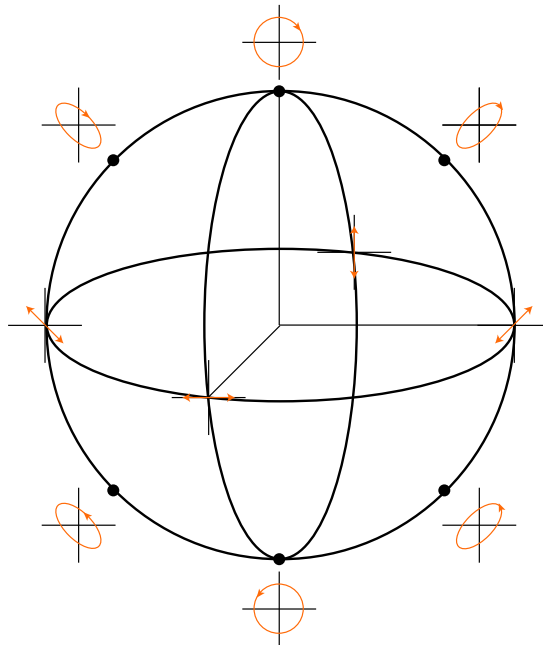
kde platí $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ pre guľu s polomerom $r=1$ [3].

Body na severnej hemisfére reprezentujú pravotočivú polarizáciu a body na južnej hemisfére reprezentujú ľavotočivú polarizáciu. Severný a južný pól gule reprezentujú pravú a ľavú kruhovú polarizáciu. Rovník gule reprezentuje lineárne polarizo-



Obr. 1.6: Poincarého guľa

vané žiarenie, pričom priesečník rovníka s kladnou osou s_1 reprezentuje LP (lineárny polarizátor) v smere osi x a priesečník rovníka s osou $-s_1$ reprezentuje polarizáciu v smere osi y . Body na tom istom poludníku reprezentujú polarizáciu s rovnakou orientáciou hlavnej osi elipsy. Body na tej istej rovnobežke reprezentujú polarizáciu s tou istou elipticitou.



Obr. 1.7: Zobrazenie stavov polarizácie na Poincarého guli

1.6 Stokesov formalizmus

Užitočné znázornenie polarizačného stavu svetla podal G. G. Stokes v roku 1852. Tieto parametre sú funkciou pozorovateľnej svetelnej vlny a je možné s nimi popísať stav polarizácie každého svetelného paprsku. Stokesov vektor je definovaný:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_x - I_y \\ I_{+\frac{\pi}{4}} - I_{-\frac{\pi}{4}} \\ I_r - I_l \end{bmatrix}, \quad (1.10)$$

kde štyri veličiny (S_0, S_1, S_2, S_3) sú nazývané Stokesové parametre. Nižšie máme vyjadrený popis týchto veličín.

S_0 - celková intenzita optickej vlny

S_1 - intenzita s horizontálnou preferenciou

S_2 - intenzita s preferenciou $+45^\circ$

S_3 - intenzita pre pravotočivú kruhovú preferenciu

V prípade záporných hodnôt prvkov Stokesového vektora sa transformuje kruhová polarizácia na ľavotočivú. Prvky Stokesového vektora je možné určiť niekoľkými spôsobmi [3], pričom základnou metódou určenia Stokesového vektora je zmeranie všetkých intenzít zväzku zodpovedajúcim konkrétnym Stokesovým prvkom vrátane prvkov na seba vzájomne kolmých.

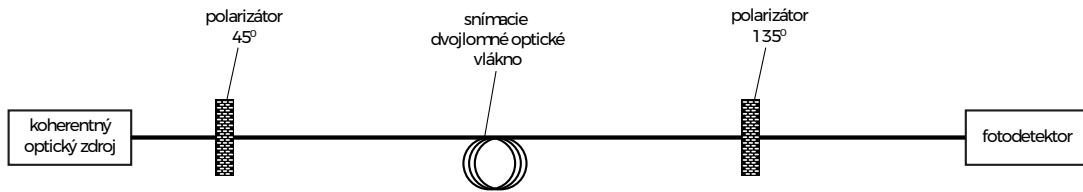
1.7 Polarizačné optické vláknové senzory

Viacere technicky významné fyzikálne veličiny môžu ovplyvňovať polarizáciu žiarenia šíriaceho sa optickým vláknom. Ide najmä o tlak, teplotu, mechanické napätie, elektrické a magnetické pole a vibrácie. Znalosť mechanizmov ovplyvňovania stavu polarizácie umožňuje konštruovať polarizačné optické vláknové senzory. Snímacím elementom môže byť objemový optický materiál, napríklad islandský vápenec, olovnaté optické sklo alebo LiNbO_3 v prípade integrovaných optoelektronických prvkov. Pre polarizačné *OVS* (optické vláknové senzory) je výhodné použiť snímacie vlákno so známymi a dobre definovanými polarizačnými vlastnosťami. Principiálne je možné konštruovať polarizačné *OVS* na báze bežných jednovidových vlákien. Často sa však takéto senzory konštruujú na báze polarizačných vlákien *PMF*. V niektorých aplikáciách sa používajú špeciálne optické vlákna s minimálnym vstavaným dvojlomom. Použitie mnohovidových vlákien nie je pre polarizačné *OVS* vhodné, pretože každému šíriacemu sa vidu zodpovedá nezávislý stav polarizácie *SOP* (State of Polarization) a výsledný polarizačný profil je v mnohovidovom vlákne relatívne zložitý.

Jednoduchý vláknový polarimetrický senzor je na obrázku viz. 1.8. Lineárne polarizované žiarenie je naviazané pod 45° uhlom vzhľadom k vlastným osiam vlákna do dvojlomného optického vlákna tak, že sú rovnako vybudené oba základné vidy. Zmeny polarizačného stavu žiarenia na výstupe snímacieho optického vlákna sa transformujú na zmeny veľkosti intenzity žiarenia pomocou polarizátora, ktorý v tomto prípade nazývame polarizačným analyzátorom. Intenzita žiarenia detegovaného fotodetektorom závisí od fázového posunu δ medzi dvomi ortogonálnymi vidmi šíriacimi sa vláknom podľa vzťahu [8]:

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos \delta), \quad (1.11)$$

pričom fázový posun δ je nositeľom informácie o snímanej veličine. Takto skonštruovaná aparátúra je však citlivá na fluktuácie intenzity žiarenia zdroja.

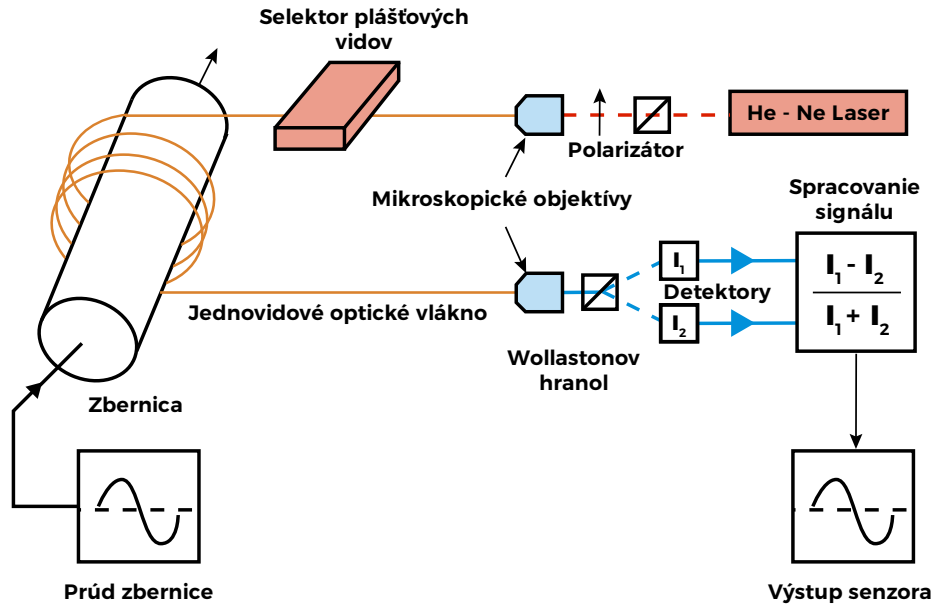


Obr. 1.8: Princíp konštrukcie polarizačných OVS s dvomi polarizátormi

Dôležitú triedu polarizačných *OVS* tvoria senzory elektrického napätia a prúdu pre odvetvie distribúcie elektrickej energie. Viacero priemyselných laboratórií predstavilo prototypy takýchto zariadení a mnohé z nich sú dnes komerčne dostupné. Optické prevodníky prúdu merajú hustotu magnetického toku v blízkosti prúdovodiča na základe Faradayovho javu. Ide o otočenie roviny polarizácie vplyvom magnetického poľa. Takýto senzor elektrického prúdu je znázornený viz. 1.9. Ak je na vstupe optického vlákna s minimálnou hodnotou vstavaného lineárneho dvojlomu (low birefringence fiber) lineárne polarizované žiarenie, na výstupe vlákna bude v dôsledku vplyvu magnetického poľa pôvodný smer lineárnej polarizácie otočený o uhol θ daný rovnicou [9]:

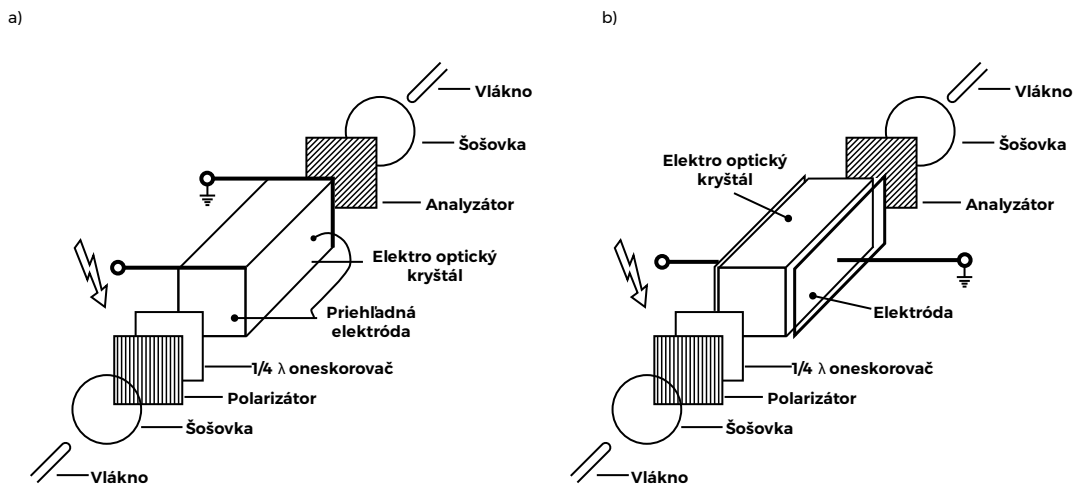
$$\Theta = V \cdot B \cdot l, \quad (1.12)$$

kde V je takzvaná Verdeho konštanta optického materiálu ($rad \cdot T^{-1} \cdot m^{-1}$), v ktorom sa žiarenie šíri, B je magnetická indukcia spôsobená pretekajúcim prúdom a l je dĺžka interakčnej oblasti vlákna. Detekcia signálu z takéhoto senzora je opäť realizovaná pomocou dvoch polarizátorov umiestnených na vstupe a výstupe senzora.



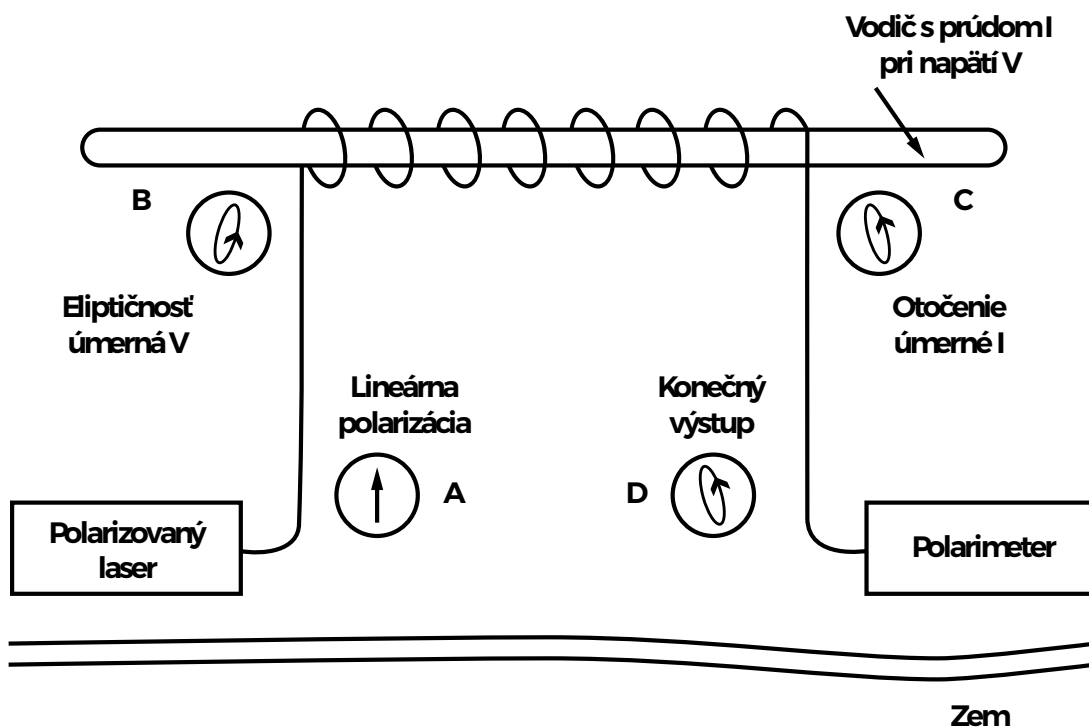
Obr. 1.9: Polarizačný *OVS* elektrického prúdu využívajúci Faradayov jav

Polarizačné *OVS* napätia využívajú zmenu polarizácie žiarenia šíriaceho sa opticky aktívnym kryštálom. V dôsledku Pockelsonovho javu vyvolá zložka intenzity elektrického poľa, priečna na smer šírenia sa žiarenia, dodatočný lineárny dvojlom, to znamená, že sa zmení rozdiel v rýchlosti šírenia sa dvoch ortogonálnych vidov. Na obrázku viz. 1.10 je znázornený polarizačný *OVS* na meranie elektrického napätia. Štvrtvlnová doštička slúži na dosiahnutie vhodnej citlivosti a linearity. Komerčne dostupné *OVS* napätia dosahujú skreslenie signálu menšie ako 0,5 %, pre dynamický rozsah 1 V až 1000 V a pracujú v rozsahu teplôt od -25 °C do 80 °C [9].



Obr. 1.10: Polarizačný *OVS* elektrického napätia a) pozdĺžny b) priečny

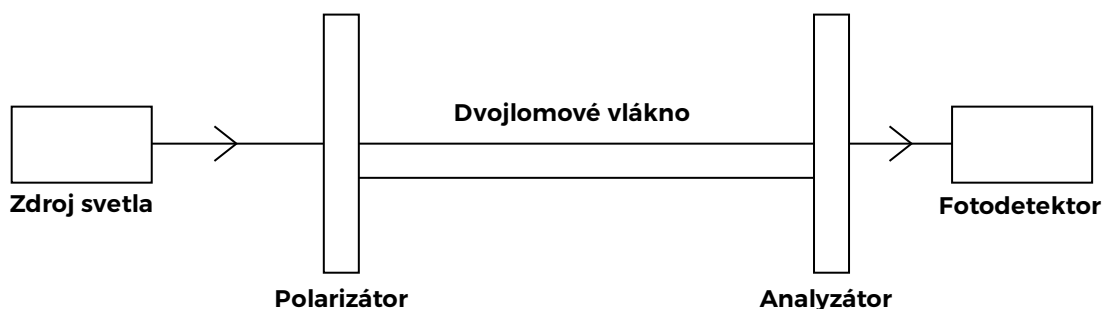
Polarizačné *OVS* možno využiť aj na súčasné meranie prúdu a napätia vo výkonových vedeniach.



Obr. 1.11: *OVS* na súčasné meranie prúdu a napätia vo výkonových vedeniach

1.7.1 Princíp činnosti polarizačného OVS

Vo veľkej väčšine prípadov používajú polarimetrické senzory lineárne polarizovaný zdroj svetla (prípadne v kombinácii s lineárnym polarizátorom), ktoré je nasmerované do dvojlomného vlákna pod uhlom 45° od hlavnej osi tak, aby boli obidva ortogonálne osi polarizácie (pomalá a taktiež rýchla) zhodne efektívne [9].



Obr. 1.12: Princíp činnosti polarizačného optického vláknového senzoru

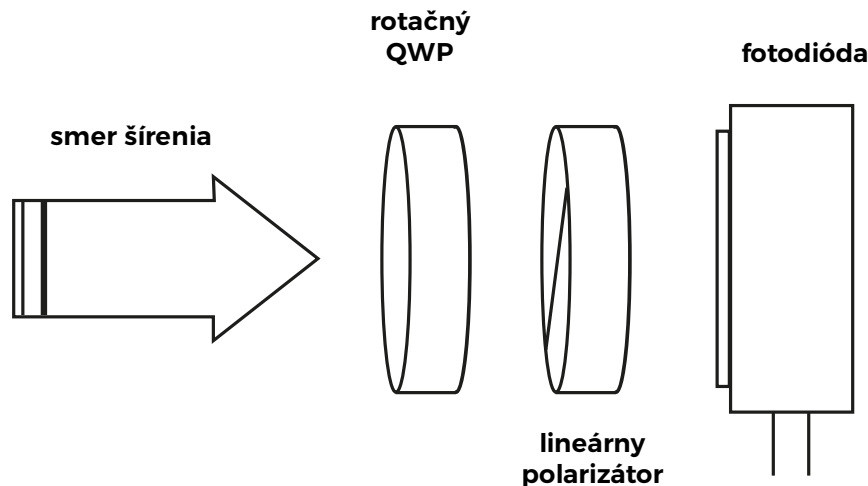
Použitie tzv. polvlnovej doštičky môže značne zjednodušiť nastavenie orientácie vstupnej polarizácie. Na výstupe dvojlomného vlákna sa pred detektorom umiestni analyzátor (tj. polarizátor) pre určenie stavu polarizácie viz. 1.12. Prechod svetla vláknom spôsobí, že sa zmení polarizačný stav *SOP*, takže intenzita pozorovaná detektorom sa bude líšiť. Nevýhodou tejto zostavy je jej citlivosť na zmeny intenzity zdroja. Taktiež je možné použiť delič polarizácie (napr. islandský vápenec), ktorý rozdelí svetlo do dvoch ortogonálnych paprskov a merať ich vzájomné fázové omeškanie. V neposlednom rade je potrebné dodať, že táto metóda vyžaduje náročnú meraciu techniku a dokonalú synchronizáciu [10, 11].

Všeobecne platí, že polarimetrické senzory sú zložitejšie a drahšie než senzory amplitúdové alebo fázové, pretože je nevyhnutné použiť drahé vlákna, ktoré navyše vyžadujú nákladnú montáž. Polarizačné *OVS* môžeme použiť vo veľmi širokých možnostiach. Ich výhody sú hlavne v citlivosti na celú škálu neelektrických [9], ale aj elektrických [12] veličín.

1.8 Meranie polarimetrom

Polarimeter je flexibilný a výkonný merač polarizačných stavov založený na modúlárnej platforme. Je vhodný pre rôzne aplikácie od klasických polarizačných meraní, stanovený konečným pomerom polarizácií zachovávajúcich vlákien *PMF* a k prispôbovaniu *PMF* laserových modulov na komplexné úlohy, ako je vyhodnocovanie optických komponentov s Jonesovými alebo Müllerovými maticovými výpočtami.

V spojení s ďalšími rozširujúcimi modulmi umožňuje vybudovať kompletný systém merania polarizačnej vidovej disperzie. Základom pre činnosť polarimetra je polarimetrický modul s rotačnou $\lambda/4$ vlnovou doštičkou, ktorá umožní meranie stavu polarizácie *SOP* svetla. Výstupom sú všetky štyri hodnoty stokesovho vektora, ktoré plne charakterizujú *SOP*. Tieto hodnoty sú dodávané v digitálnom tvare pre počítač k ďalšiemu spracovaniu. Medzi výhody polarimetra taktiež patria ďalšie funkcie, ktoré rozširujú možnosti, najmä kombinácie s ďalšími modulmi, flexibilná konfigurácia pomocou ovládačov *LabVIEW™*, *MSVC*, *Borland C* a relatívne ľahko použiteľné grafické používateľské rozhranie. Pre zobrazenie stavov polarizácie používa polarimeter Poincarého guľu. Ako je uvedené v odstavci viz. 1.6, guľa je zobrazená v kartéziánskom súradnom systéme, pričom kartéziánske súradnice ľubovoľného bodu v Poincarého guľi reprezentujú 3 normalizované Stokesové parametre S_1 , S_2 a S_3 . Azimut a tzv. elipticitu polarizačnej elipsy je možné mapovať jednoznačne na sférických súradniciach [5].



Obr. 1.13: Princíp činnosti polarimetra - technika otáčajúcej sa vlnovej doštičky

1.9 Zlučovanie kanálov v optickej sieti

V optických sieťach sa často využíva multiplexovanie alebo zlučovanie kanálov. Je to proces, pri ktorom sa digitálne dátové toky, ale aj analógové signály zlučujú do jedného signálu. Je to hlavne kvôli efektívnemu využitiu prenosového média a týmto spôsobom sa vedia dosť znížiť náklady. Zariadenie, ktoré vytvára multiplexovanie, sa nazýva multiplexor. O opačný proces sa stará demultiplexor. Demultiplexor prevádza zlúčený signál späť na jednotlivé zložky [13].

1.9.1 Časový multiplex TDM

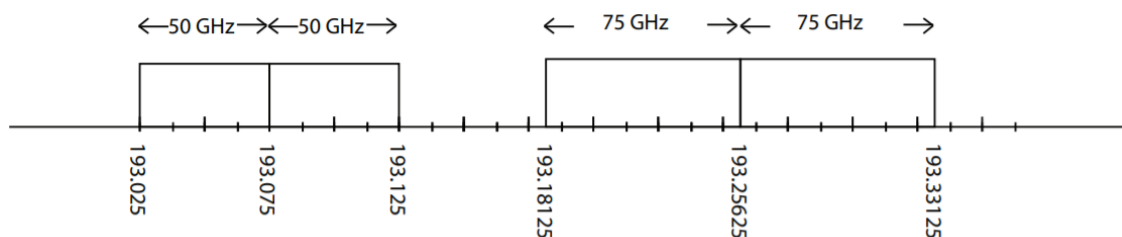
Time Division Multiplex je jedným zo základných druhov multiplexu. Funguje na princípe, že všetky jednotlivé signály sú vysielané len v určitom časovom úseku, tzv. časovom slotu. Časové sloty majú svoju definovanú dĺžku a zoskupujú sa do rámcov (frames), ktoré tvoria celkovú rámcovú štruktúru. Problém, ako rozlíšiť sloty konkrétnych signálov od seba, sa rieši pridaním synchronizačného slotu, ktorý sa nachádza na začiatku rámca a má presne definovanú štruktúru.

1.9.2 Vlnový multiplex WDM

Wavelength Division Multiplex, často nazývaný aj ako vlnový multiplex, je v optických sieťach využívaný pre multiplexovanie na základe rozdielnej vlnovej dĺžky svetelných zdrojov. Pri prenose po metalickom vedení sa používa označenie *FDM* (Frequency Division Multiplex), pretože sa za typickú vlastnosť tohto signálu považuje frekvencia. Základom *WDM* systému sú multiplexer a demultiplexer, ktoré rozdeľujú a resp. spájajú signály [14, 15].

1.9.3 Hrubý vlnový multiplex CWDM

Coarse Wavelength Division Multiplex vyjadruje skutočnosť, že vlnové dĺžky signálov použitých pre prenos majú medzi sebou veľkú rozteč. Ešte pred štandardizáciou *ITU* (International Telecommunication Union) sa využívali dve pásma, a to 1550 nm a 1310 nm. V roku 2003 bola štandardizovaná kanálová rozteč 20 nm, a to pri rozsahu vlnových dĺžok 1270 nm až po 1610 nm. Veľmi zaujímavé je to, že prakticky sa využíva pásmo až od 1470 nm, pretože pod ním je zvýšený útlm. Široká kanálová rozteč má veľkú výhodu, pretože je možné použiť teplotne nestabilizované lasery [16].



Obr. 1.14: Vlnové dĺžky CWDM

1.9.4 Hustý vlnový multiplex DWDM

Dense Wavelength Division Multiplex technológia je už zdokonalená verzia *CWDM* a umožňuje odstup jednotlivých kanálov od seba o 0,8 nm. Vďaka tomu je možné v jednom optickom vlákne prenášať až desiatky kanálov. Využívajú sa pri tom jednovidové lasery s úzkou spektrálnou čiarou a úzkopásmové interferenčné filtre. Štandard medzinárodnej telekomunikačnej únie ITU-T 694.1 definuje prenosové kanály pre odstup jednotlivých kanálov 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz a 100 GHz. Tieto rozstupy sú konštantné v celom rozsahu. V poslednej dobe sa už vo väčšom rozsahu využívajú pružné mriežky, tzv. flexible grids. Ako jeden z dôvodov, prečo sa rozširujú, je hlavne väčšia možnosť optimalizácie a využitie prenosovej šírky. Ako príklad môže byť využitie dvoch 50 GHz a dvoch 75 GHz slotov [15, 17].

Rozstup vlnových dĺžok a počet kanálov

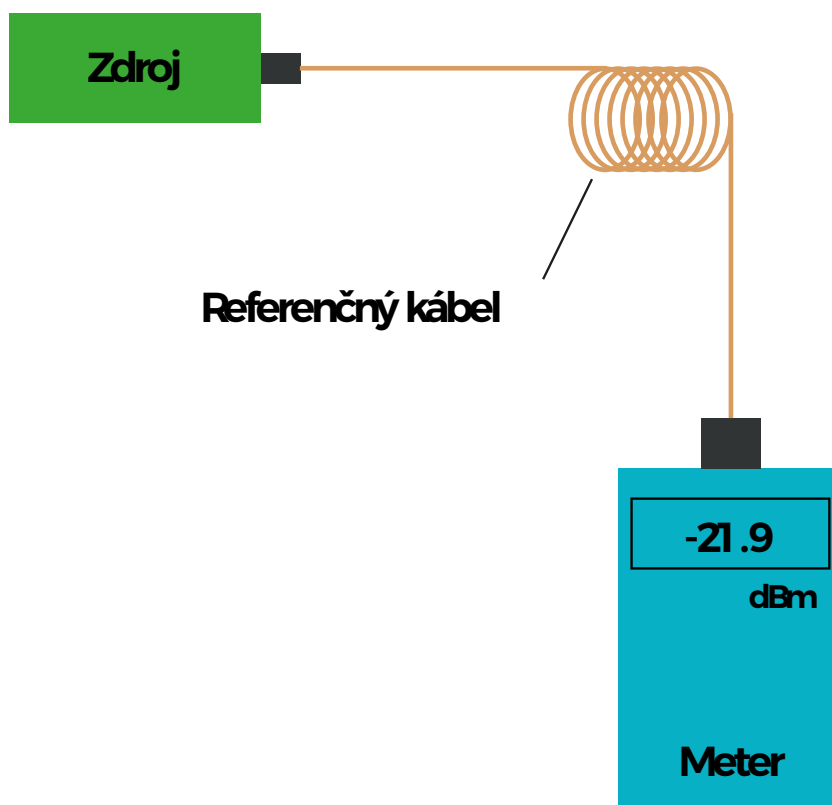
Jedným z kľúčových rozdielov *CWDM* oproti *DWDM* je vzdialenosť, ktorú každá technológia používa na oddelenie prenášaných signálov. *CWDM* poskytuje až 18 kanálov s rôznymi vlnovými dĺžkami, každý kanál je od seba vzdialený presne 20 nm. Technológia *CWDM* má oveľa väčšie kanálové rozstupy ako *DWDM*. Tá je schopná prenášať 40, 80 alebo až 160 kanálov vlnovej dĺžky s rozstupom 0,8 alebo 0,4 nm [18].

Prenosová vzdialenosť

Technológia *DWDM* je schopná prenášať veľké vzdialenosti na úzkych vlnových dĺžkach. Systémy *CDWM* sú schopné vysielat na vzdialenosť až 160 km, avšak obmedzenie vzdialenosti je spôsobené tým, že vlnové dĺžky, ktoré prenáša, nie sú zosilnené. *DWDM* spojenia je však možné zosilniť, takže táto technológia je schopná prekonať oveľa väčšie vzdialenosti [18].

2 Meranie optického výkonu

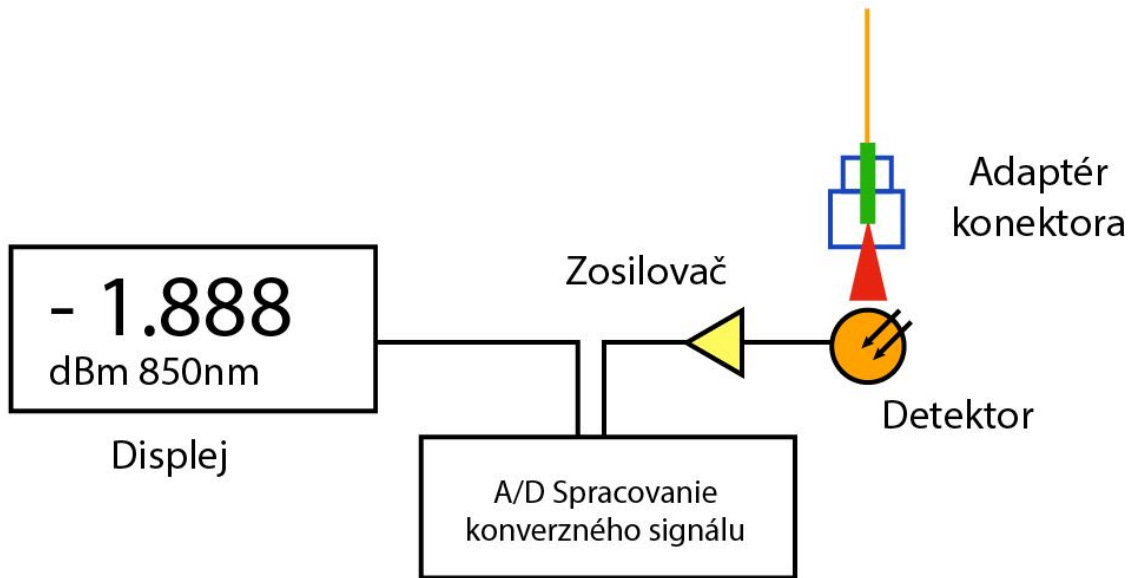
Najzákladnejším meraním z optických vlákien je meranie optického výkonu. Toto meranie je základom pre meranie strát, ako aj pre napájanie zo zdroja alebo z prijímača. Vysielač aj prijímač majú zvyčajne zásuvky pre konektory z optických vlákien, takže meranie výkonu vysielača sa vykonáva pripojením testovacieho kábla k zdroju a meraním výkonu na druhom konci. Pri prijímačoch sa odpojí kábel pripojený k zásuvke prijímača a meria sa výstup pomocou meracieho prístroja. Keď sa systém s optickými vláknami stáva čoraz bežnejším a stále sofistikovanejším, bude meranie optického výkonu, najzákladnejšie pôsobenie procesu testovania s optickými vláknami, čoraz zložitejšie. Na vykonanie spoľahlivých meraní musia ľudia vziať do úvahy vlastnosti a vzájomné pôsobenie optického merača výkonu, svetelného zdroja s optickými vláknami, typov detektorov, útlmu, zadných svetiel, odraz, rušenie a divergencia lúčov [19].



Obr. 2.1: Jednoduché zapojenie pracoviska pre meranie optického výkonu

Zatiaľ čo optické merače výkonu sú primárnym prístrojom na meranie výkonu, súpravy na testovanie strát merajú aj súpravy na testovanie optickej straty (OLTS) a

reflektometre s optickou časovou doménou (OTDR). Štandardný test TIA FOTP-95 pokrýva meranie optického výkonu.



Obr. 2.2: Bloková schéma merača optického výkonu

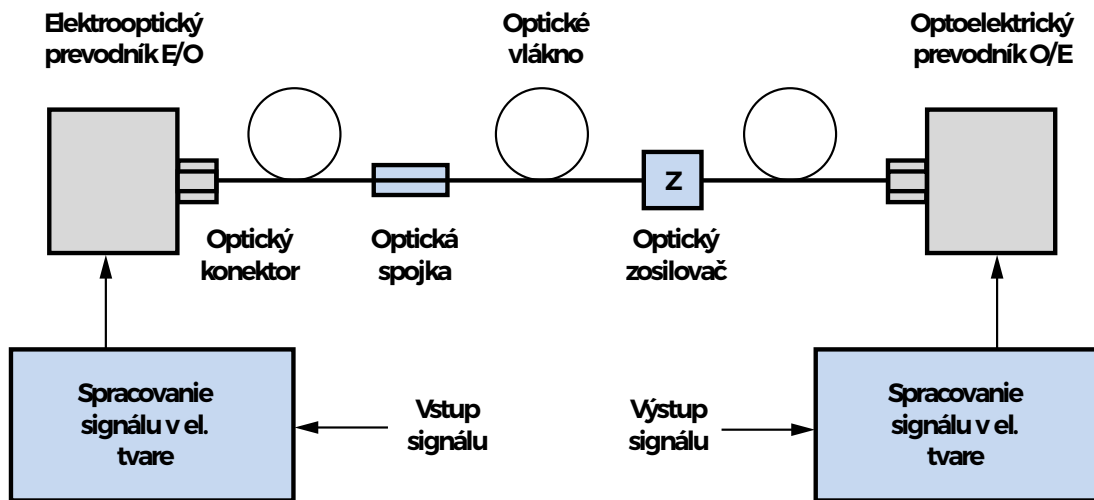
2.1 Metódy merania

Merač optického výkonu sa používa na meranie absolútnej optickej energie alebo relatívnej dĺžky straty optickej energie z optických vlákien. Meraním absolútneho výkonu vysielacej koncovej optickej siete je merač výkonu schopný vyhodnotiť výkonnosť koncového zariadenia svetla. Základným predpokladom merania optického výkonu je hodnota na výstupe z glukomeru priamo úmerná optickému vstupnému výkonu. Táto vlastnosť proporcionality je definovaná ako linearita a odchýlka od tejto priamej proporcionality je definovaná ako nelinearita [19].

2.2 Optický merací systém

Typický systém merania optického výkonu pozostáva z detektora a zobrazovacej jednotky, ktorá počíta optický výkon alebo energiu predstavovanú elektrickým signálom. Merania sa zobrazujú alebo ukladajú vo vhodných formátoch, ako je napríklad analógový alebo digitálny výstup alebo záznamy v súbore zberu údajov. Optický detektor prevádza optický signál na elektrický signál. Najbežnejšími typmi detektorov optického signálu sú fotodiódy, termopily a pyroelektrické detektory. Fotodiódy využívajú energiu fotónu na vytvorenie páru elektrónových otvorov. Termopilové

detektory sa používajú pre vysoko výkonné laserové zdroje až do desiatok kilowat-
tov optickej energie. Pyroelektrické senzory sú populárne pre pulzné laserové zdroje.
Z týchto typov detektorov sa najčastejšie používajú fotodiódové senzory [19].



Obr. 2.3: Meranie optického výkonu na optickej trase

2.3 Jednotky merania: „dB“ a „dBm“

Pri vykonávaní testov v sieťach s optickými vláknami sa výsledky zobrazia na odpočte merača v „dB“. Optická strata sa meria v „dB“, zatiaľ čo optický výkon sa meria v „dBm“. Strata je záporné číslo rovnako ako väčšina meraní tohto výkonu. Keď robíme merania pomocou optických vlákien, meriame výkon vo svetle, ktoré meriame. Normy, ktoré používame na meranie výkonu a ktoré zachováva *NIST* (americký národný inštitút pre štandardy a technológie), sú v skutočnosti určené tepelným účinkom svetla absorbovaného v detektore.

Optický výkon vo vláknovej optike je podobný vykurovaciemu výkonu žiarovky pri oveľa nižších úrovniach výkonu. Aj keď žiarovka môže vyžarovať 100 wattov, väčšina zdrojov z optických vlákien sa pohybuje v rozmedzí od miliwattu po mikrowatt (0,001 až 0,000001 wattu), takže nebudete cítiť výkon vychádzajúci z vlákna a vo všeobecnosti to nie je škodlivé. V začiatkoch vláknovej optiky sa výstupný výkon zdroja zvyčajne meral v miliwattoch a strata sa merala v dB alebo deciBels. V priebehu rokov sa všetky merania pre pohodlie presunuli na dB. Merania strát sa všeobecne merali v dB, pretože dB je pomer dvoch úrovní výkonu, z ktorých jedna sa považuje za referenčnú hodnotu [20]. Vyjadruje sa tým úroveň optického výkonu, ktorá sa vzťahuje k jednému miliwattu

$$L = 10 \log \frac{P[mW]}{1[mW]}. \quad (2.1)$$

Pomocou veličiny L je veľmi ľahké stanoviť útlm A v relatívnych decibeloch [dB] podľa vzorca:

$$A = L_2 - L_1, \quad (2.2)$$

kde L_1 a L_2 sú úrovne výkonu získané napr. pri meraní na vstupe a výstupe optickej trasy. Merače optického výkonu majú aj tzv. funkciu referencie, ktorá umožňuje uložiť do pamäte referenčný výkon P_1 a následne merať relatívnu úroveň L_r ľubovoľného optického výkonu voči tejto referencii. Útlm A je:

$$A = -L_r = -10 \log \frac{P_2}{P_1}. \quad (2.3)$$

Útlm býva na meracích prístrojoch zobrazovaný ako záporné číslo rovnako ako väčšina meraní optického výkonu [21].

2.4 Snímače optického žiarenia

Merače optického výkonu obvykle využívajú väčšinou polovodičové fotodetektory, pretože sú citlivé na svetlo vo vlnových dĺžkách a výkonových úrovniach používaných v optických vláknach. Princíp činnosti fotodiódy je založený na hradlovom jave.

Hlavnými typmi používaných fotodiód sú diódy PN, PIN, Schottkyho diódy a lavínové diódy. Výber vhodného typu diódy umožňuje pokryť merania celého spektra žiarenia od oblasti UV až po NIR. Na výrobu sa najčastejšie používajú materiály ako kremík, germánum, ale aj ďalšie materiály, ktoré obsahujú gálium a to konkrétne GaAs, GaAsP, GaP a InGaAs. Kremíková fotodióda môže detekovať celé pásmo od UV až po NIR (190 nm až 1100 nm, s vrcholom pri 960 nm). Typické rozsahy jednotlivých typov fotodiód sú [22]:

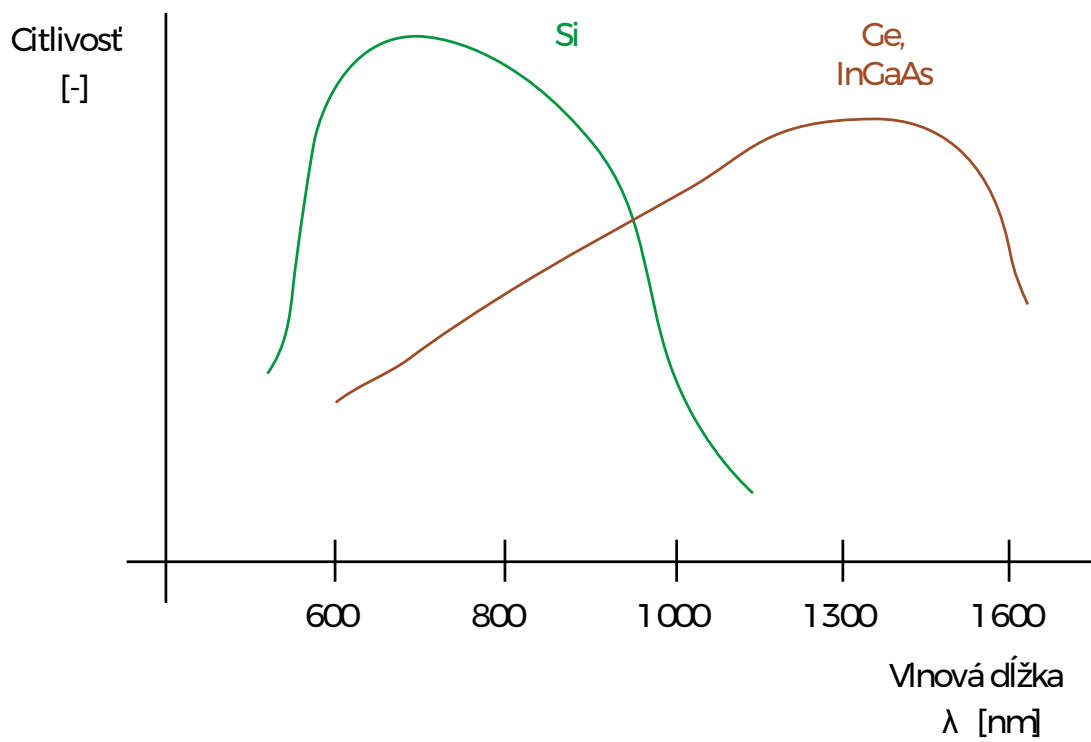
- Kremíková dióda PIN má rozsah 320 nm až 1100 nm
- Schottkyho (GaAsP) fotodióda má úzku spektrálnu oblasť od UV po viditeľnú oblasť (190 nm až 680 nm)
- GaP fotodióda 190 nm až 550 nm
- Kremíková lavínová fotodióda pokrýva viditeľnú až UV oblasť 400 nm až 800 nm
- Germániové a InGaAs detektory sú citlivé na svetlo v rozmedzí od 800 nm do 1700 nm

2.5 Fotodetektory Si, Ge, InGaAs

Väčšina meračov optického výkonu sa v dnešných podmienkach vyrába s detektormi z kremíka (Si), germánia (Ge) alebo India-Gália-Arzénidu (InGaAs). Čo sa týka kremíkových diód, tak ide o nízkošumové fotodiódy, ktoré majú nízky „dark current“, tj. prúd, ktorý prechádza fotodiódou, na neho nedopadá žiadne svetlo. Rastie s predpínajúcim napätím a ziskom diódy.

Pri germániových fotodiódach má meranie nižších vlnových dĺžok vyšší šum. Tento šum je priamo úmerný ploche detektora. Z toho vyplýva, že pri použití menšieho detektora získame nižšiu úroveň šumu. Nevýhodou malých detektorov je nutnosť umiestnenia konca vlákna do stredu detektora, priamo v najcitlivejších oblastiach. Niektorí výrobcovia zariadení pre meranie optických výkonov chladia tieto veľké germániové detektory z dôvodu zníženia šumu a taktiež zisku nižších namerných hodnôt pomocou termoelektrického chladenia.

InGaAs boli vyvinuté pre príjmače vysokorýchlostných komunikačných systémov. Tieto detektory majú rovnaký rozsah citlivosti ako Ge detektory, ale majú omnoho menší šum a vysokú rýchlosť odozvy. S týmto typom detektorov je možné veľmi ľahko zmerať hodnoty optického výkonu [20]. Na grafe viz. 2.4 máme zobrazenú citlivosť troch najpoužívanejších fotodetektorov v závislosti od vlnovej dĺžky.

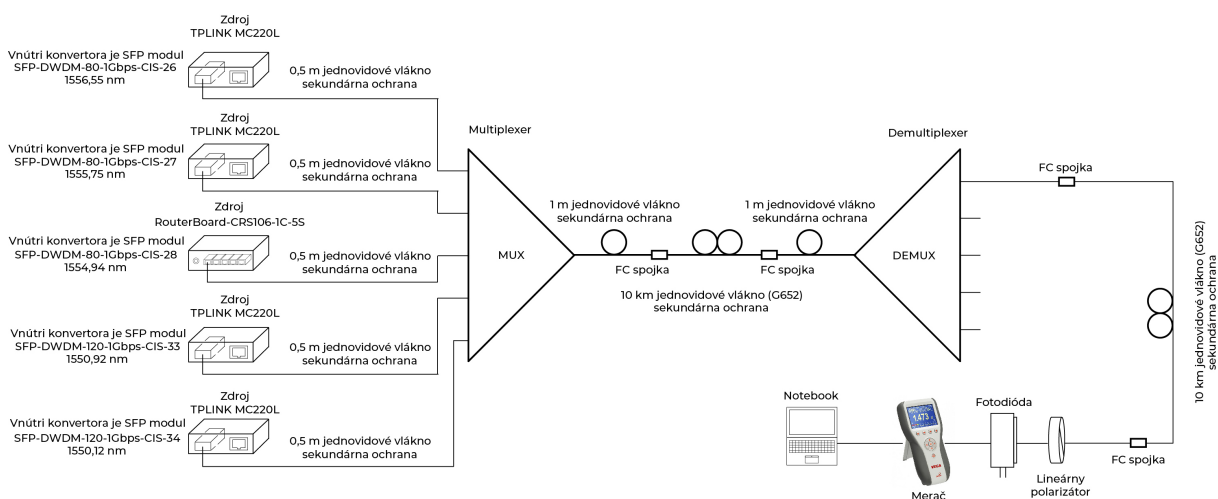


Obr. 2.4: Cítlivost detektorov Si, Ge, InGaAs v závislosti od vlnovej dĺžky a materiálu

3 Návrh pracoviska pre meranie

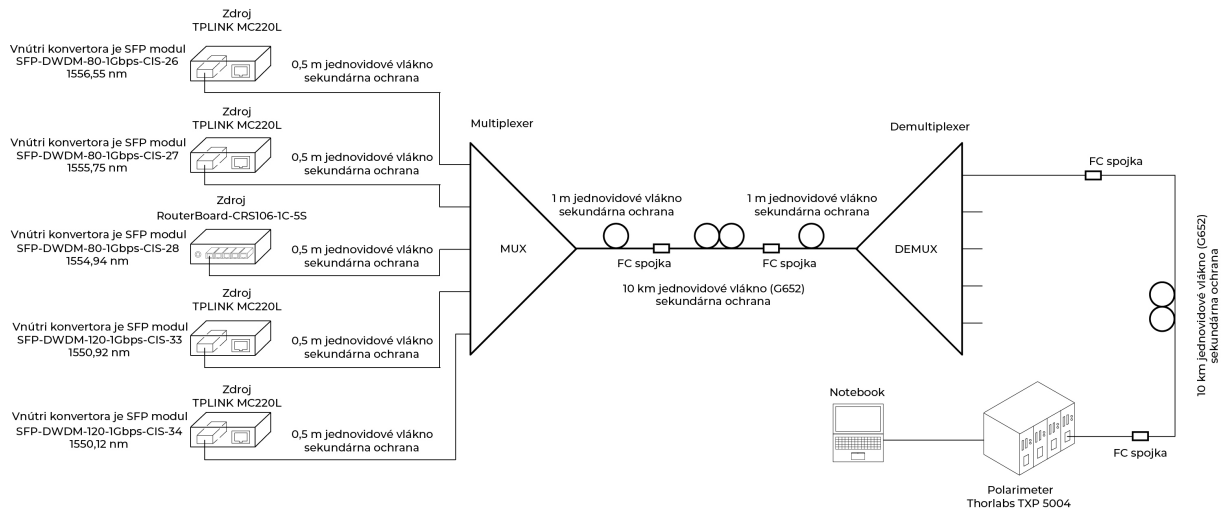
V teoretickej časti sme objasnili všetky informácie, ktoré sú potrebné k meraniu, ako Poincarého guľa, DOP, Stokesov formalizmus, meranie výkonu a rôzne typy polarizácie. Nasledujúca časť tejto práce je venovaná kompletnému návrhu pracoviska pre meranie a analýze komponentov pracoviska. Samotné merania budú realizované v dvoch variantoch zapojenia, a to s lineárnym polarizátorom, fotodiódou Thorlabs/Qphotonics a meračom optického výkonu VEGA. Druhé meranie bude s polarimetrom PAX5710IR3-T od firmy Thorlabs. Taktiež najprv prebehnú merania s jedným zdrojom signálu TP-Link MC220L. Po premeraní všetkých scenárov s jedným zdrojom signálu budú v pracovisku pripojené štyri zdroje signálu a jeden RouterBoard presne podľa schém viz. 3.1 a 3.2. Čo sa týka použitých optických vlákien, voľba padla pre tieto merania na jednovidové vlákna a pre túto prácu volíme vlnovú dĺžku 1550 nm.

3.1 Schémy zapojenia



Obr. 3.1: Návrh pracoviska s DWDM a fotodiódou

- **RB** - RouterBoard
- **MC** - Média-konvertor
- **MUX** - DWDM Multiplexer
- **FC** - FC spojky
- **PM G.65xx** - Optické vlákno SM
- **DEMUX** - DWDM Demultiplexer
- **LP** - Lineárny polarizátor
- **FD** - Fotodióda



Obr. 3.2: Návrh pracoviska s DWDM a polarimetrom

- **VEGA** - Optický merač výkonu
- **POL** - Polarimeter
- **COMP** - Notebook

3.1.1 RouterBoard

Na začiatok pracoviska bude pripojený routerboard CRS106-1C-5S od spoločnosti Mikrotik [23]. Je to relatívne malý a v celku finančne dostupný optický prepínač/-smerovač s plnohodnotným operačným systémom RouterOS - L5. Je vybavený 5x SFP a 1x combo (SFP/ETH) portom. Čo sa týka vybavenia, je poháňaný procesorom QCA8511 taktovaným na 400 MHz s 128 MB operačnou pamäťou RAM a 16 MB úložným priestorom. Zariadenie je možné napájať cez klasický napájací adaptér 10 až 28 V, ale taktiež aj cez pasívny PoE. Súčasťou tohto zariadenia je aj 24 V/0,8 A napájací adaptér.



Obr. 3.3: RouterBoard CRS106-1C-5S

3.1.2 Zdroj signálu

V návrhu pracoviska budeme používať štyri zdroje tohto typu. Média-konvertor siete Gigabit Ethernet TP-Link MC220L [24] umožňuje prevod médií z optického vedenia 1000Base-LX/LH na metalické vedenie 1000Base-T a naopak. Podporuje rýchlosti až 1000 Mbit/s a tento média-konvertor je možné využiť pre prenos na vzdialenosť až do 10 km v jednovidových optických káblach alebo 0,55 km v mnohovidových. Pre použitie s optickým káblom s konektorom typu SC/LC a zodpovedá štandardom IEEE802.3ab 1000Base-T a IEEE802.3z 1000Base-LX/LH. TP-Link MC220L využíva vlnovú dĺžku 1550 nm pre odosielanie dát s jednovidovým optickým káblom a vlnovú dĺžku 1310 nm pre prijímanie dát s jednovidovým optickým káblom. Podporuje automatickú detekciu MDI/MDI-X pre port Tx a stavové LED kontrolky na čelnom paneli.



Obr. 3.4: Média-konvertor TP-Link MC220L

Konektor pre pripojenie do metalickej siete je štandardný RJ45, avšak pre pripojenie optického vlákna sa používa *SFP* (small form-factor pluggable) slot. V zapojení využívame štyri média-konvertory. Do média-konvertorov bude pripojený *SFP* [25] modul, malý vysielateľ/prijímač bežne používaný v rôznych telekomunikačných sieťach. Je dôležité pripomenúť, že zdrojom žiarenia v *SFP* moduloch je laserová dióda vyžarujúca lineárne polarizované svetlo, takže už nie je potrebné použiť ďalšie polarizátory.

V našich meraniach je nutné využívať *SFP* moduly, ktoré podporujú pripojenie a prenos technológiou *DWDM*. Čo sa týka dĺžky trás, budeme realizovať merania,

kde celková dĺžka optických vlákien neprekročí 80 km, takže zvolíme modul, ktorý má dosah 80 km a prenosovú rýchlosť 1,25 Gbps.



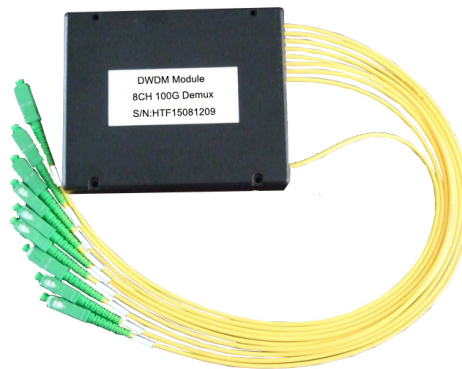
Obr. 3.5: Mikrotik SFP S-55DLC80D

3.1.3 PM vlákna a spoje

Ako je už známe, tieto špeciálne optické vlákna boli vyvinuté z vlákien SM a používajú sa v senzorike a v interferometrii pre vedenie polarizovaného svetla. Tento druh vlákna má oproti klasickým SM vláknam navyše v plášti pridaný tzv. stresový prvok. Taktiež sú PM vlákna založené na presnej technike pripojenia. V laboratórnom meraní budeme využívať len vlákna, ktoré zachovávajú polarizáciu podľa štandardu G.657A a G.652D na vlnovej dĺžke 1550 nm.

3.1.4 DWDM modul

Ďalším prvkom v pracovisku je DWDM mux/demux modul. Pre meranie v našom pracovisku využijeme dva 8-kanálové moduly DMCES-18D-C34-310-SC/APC od firmy Bank Photonics [26]. Multiplexovanie s hustou vlnovou dĺžkou je vyhradené pre veľmi úzke frekvenčné rozostupy. Zariadenie DWDM (multiplexer alebo Mux) kombinujú výstup z niekoľkých optických vysieláčov pre prenos cez jediné optické vlákno.



Obr. 3.6: DWDM multiplexor

3.1.5 Polarimeter

Ďalšou dôležitou súčasťou pracoviska je voľba vhodného polarimetra. Toto koncové zariadenie meracej sústavy vykonáva analýzu meracej trasy. Pre porovnanie sa meranie prevedie na dvoch typoch polarimetrov. Ako prvý prebehne na polarimetri PAX5710IR3-T, taktiež od firmy Thorlabs [27]. Celá sústava je napojená na prenosný počítač, na ktorom sú už ukladané logy priamo do excel súborov. V skratke je princíp založený na tom, že sa privedie optický signál na hlavicu TXP 5004, ktorá je zložená z otočnej vlnovej doštičky pevného polarizátora a fotodiódy. Vlnová doštička najprv transformuje vstupnú polarizáciu v závislosti na skutočnom uhle natočenia. Polarizátor následne prepúšťa len časť svetelného signálu, ktorý je rovnobežný s osou priebehu. Na konci sa nachádza fotodetektor dodávajúci prúd, ktorý je úmerný optickému výkonu. K úplnému a presnému výpočtu polarizačných stavov SOP a stupňov polarizácie DOP sa používa rýchla furierová transformácia FFT .

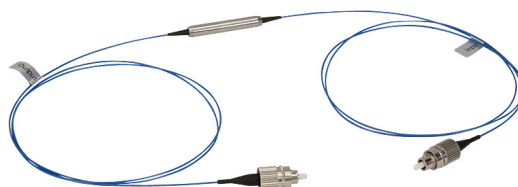
V druhom scenári bude zvolený model PAX1000IR2/M [28], ktorý je novší a integruje obidve časti staršieho typu do meracej sondy v omnoho menších rozmeroch. Meranie polarizácie je založené podobne ako v predchádzajúcom type na rotujúcich doštičkách s väčšou vzorkovacou frekvenciou. Výsledky sa dajú zobrazit v grafickom rozhraní na Poincarého guli, polarizačnej elipse, v tabulkovej forme a taktiež aj vo forme grafov.



Obr. 3.7: Polarimeter Thorlabs PAX1000IR2/M

3.1.6 Lineárny polarizátor

Lineárny polarizátor Thorlabs ILP1550PM-FC [29] je špeciálne navrhnutý a používaný na prepustenie polarizovaného svetla (lineárne polarizovaného). Taktiež má za úlohu blokovať pravouhlú polarizáciu. Táto pravouhlá polarizácia pochádza z nepolarizovaného svetelného zdroja. Lineárny polarizátor bude využitý v meraní so zapojením pred fotodiódou. Konkrétne tento polarizátor pracuje na vlnovej dĺžke 1550 nm. Výrobca udáva jeho maximálny pracovný výkon zhruba 300 mW. Taktiež výrobca udáva pracovnú operačnú teplotu v rozmedzí od $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.



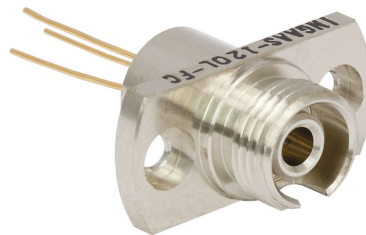
Obr. 3.8: Lineárny polarizátor ILP1550PM-FC

3.1.7 Fotodiódy

Dôležitým faktorom je taktiež správny výber fotodiódy. V tomto meraní boli zvolené fotodiódy typu InGaAs od firiem Qphotonics - QPDF-200 [30] a Thorlabs - FGA01FC [31], pretože dokážu pracovať na vlnovej dĺžke 1550 nm. Charakteristiky fotodiód boli podrobnejšie rozobrané v kapitole 2.4. V tabuľke 3.1 máme základné vlastnosti, ide o drahšie typy s aktívnou oblasťou \varnothing 120 - 200 μm . Takisto sa tieto fotodiódy charakterizujú vysokou rýchlosťou, rýchlou odozvou a nízkou kapacitou.

Parametre navrhovaných fotodiód			
Názov diódy	Vlnová dĺžka [nm]	Doba nábehu [ps]	Cena [€]
FGA01FC	800-1700	300	145
QPDF-200	800-1700	200	120

Tab. 3.1: Parametre vlastnosti fotodiód



Obr. 3.9: Príklad použitej fotodiódy Thorlabs FGA01FC

3.1.8 Merač optického výkonu

Ďalším navrhovaným komponentom je merací prístroj pre získanie dát z optickej trasy. Voľba padla na prístroj VEGA P/N 7Z01560 [32], ktorý pomocou snímačej hlavice PD300 vyhodnocuje prijatý optický výkon. Detekcia zmien polarizácie meračom výkonu je v podstate analogickým meraním k meraniu fotodiódou, avšak môžeme túto metódu merania považovať za metódu kontrolnú. Tento prístroj umožňuje merať dopadajúci optický výkon privádzaný z výstupu senzoru priamo na snímaciu hlavicu PD300 prostredníctvom FC konektora. Merač optického výkonu je pripojený k notebooku pomocou USB zbernice, čo umožňuje priamo namerané hodnoty štatisticky spracovávať pomocou softvéru OPHIR Starlab.



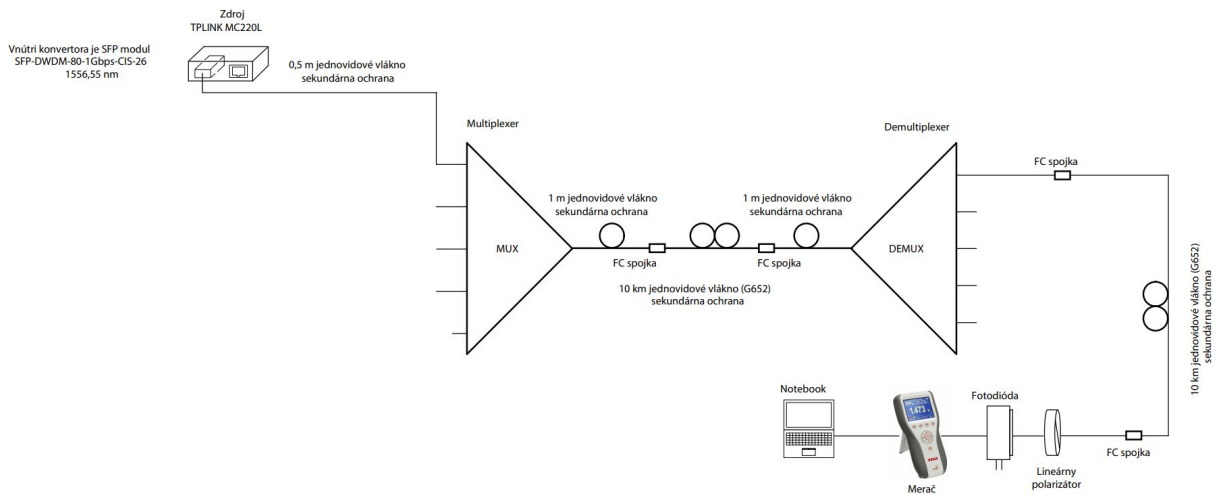
Obr. 3.10: Merač optického výkonu Vega

4 Realizácia meraní

V tejto kapitole sa venujeme realizácii navrhovaných riešení, grafickým závislostiam a spracovaním výsledkov meraní. Je potrebné zdôrazniť, že všetky demonštrované merania mali rozdielne naplánovaný priebeh merania, či už z časového hľadiska alebo rôzne zapojeného pracoviska s jedným alebo s piatimi zdrojmi signálu. Taktiež polovica scenárov bola premeraná bez 10 km SM vlákna zapojeného pred fotodiódou alebo polarimetrom, avšak druhá polovica scenárov mala zapojené 10 km SM vlákno a v jednom meranom scenári dokonca 40 km SM vlákno.

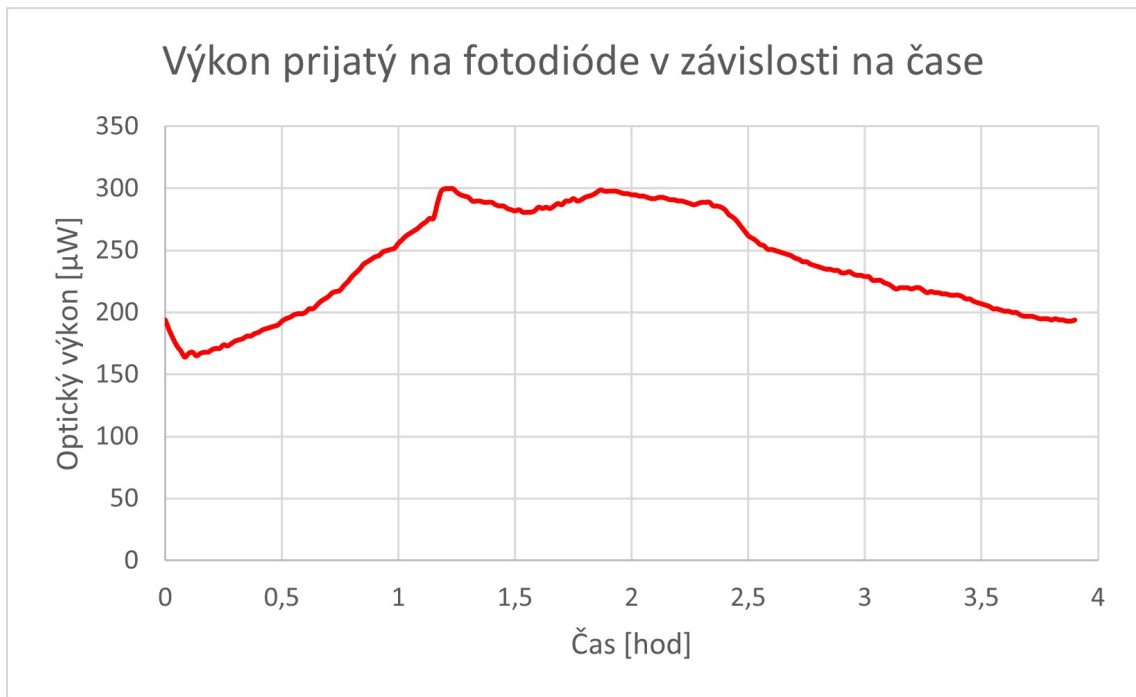
4.1 Meranie výkonu prijatého na fotodióde s jedným zdrojom signálu

V celej praktickej časti prebehli merania s viacerými scenármi, ktoré boli vopred navrhnuté a postupne aj prakticky demonštrované. Medzi prvými meraniami bolo pracovisko zapojené viz. 4.1 s jedným zdrojom TP-Link MC220L bez SM vlákna a taktiež aj s SM vláknom G.652 v dĺžke 10 km. Taktiež je dôležité povedať, že merania prebehli bez teplotného zdroja a v laboratórnom prostredí bolo izbových 24 °C. Na grafoch 4.2 a 4.3 môžeme vidieť prijatý optický výkon na fotodióde. Prvé meranie prebehlo v 4-hodinovom intervale a druhé meranie prebehlo v 24-hodinovom intervale.



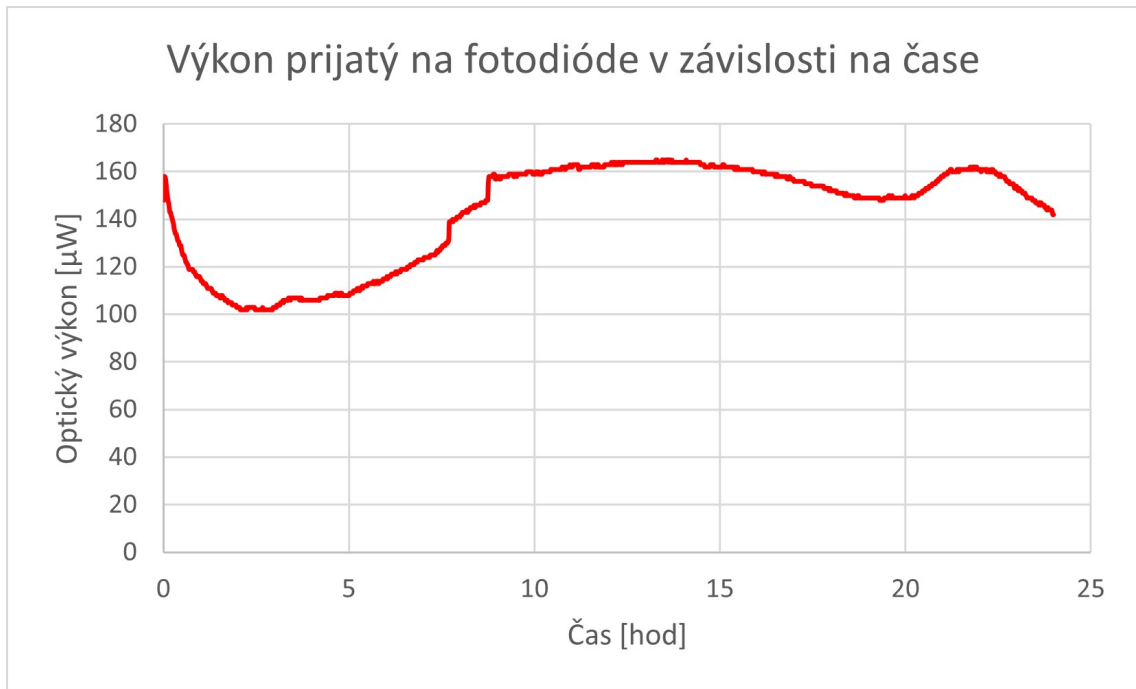
Obr. 4.1: Návrh pracoviska s DWDM, jedným zdrojom a fotodiódou

4.1.1 Meranie výkonu prijatého na fotodióde s jedným zdrojom signálu bez SM vlákna



Obr. 4.2: Optický výkon snímaný fotodiódou pri 4-hodinovom meraní priebehu

Ak si porovnáme graf pri 4-hodinovom a graf pri 24-hodinovom meraní, je očividné, že dĺžka merania nemá príliš vplyv na dosiahnuté výsledky a prijatý optický výkon na fotodióde. Všetky hodnoty optického výkonu boli v rozmedzí 102 μW - 295 μW .



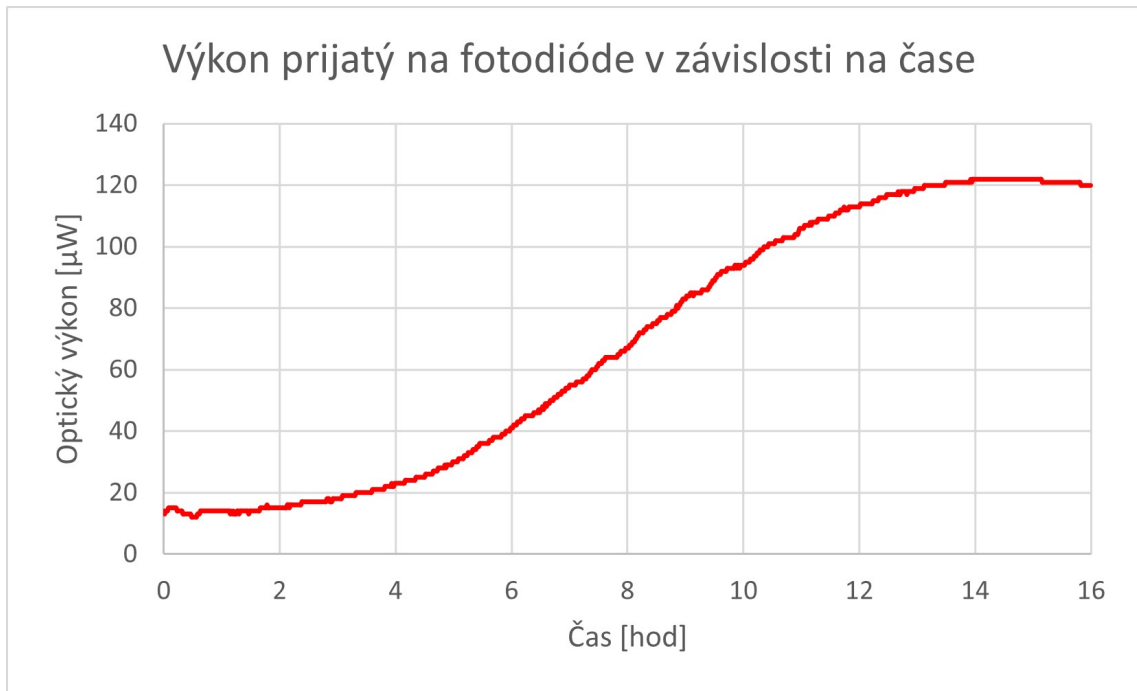
Obr. 4.3: Optický výkon snímaný fotodiódou pri 24-hodinovom meraní priebehu

4.1.2 Meranie výkonu prijatého na fotodióde s jedným zdrojom signálu a 10km SM vláknom

V ďalšom meraní, ktoré prebiehalo 16 hodín, bolo v pracovisku pridané 10 kilometrové SM vlákno G.652 pred lineárny polarizátor, fotodiódu a pred optický merač.

V tejto grafickej závislosti môžeme vidieť v druhej polovici merania jemne zvyšujúci sa výkon. Najnižšia nameraná hodnota bola zhruba $12 \mu\text{W}$ a najvyššia zhruba $122 \mu\text{W}$.

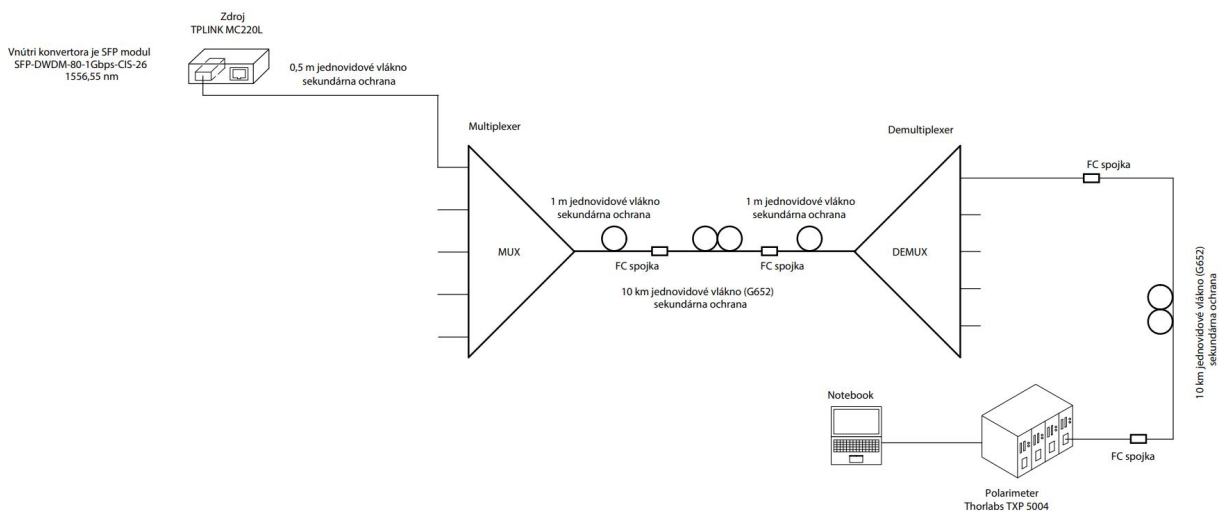
Ak si to porovnáme s grafmi 4.2 a 4.3, kde bolo zapojenie bez trasy s 10 km SM vláknom tak vidíme, že nameraný optický výkon je zhruba priemerne o $100 \mu\text{W}$ nižší, čo je koniec koncov dôkaz toho, že optický výkon je s dlhšou trasou nižší než s modelovou trasou, ktorá je o 10 km kratšia.



Obr. 4.4: Optický výkon snímaný fotodiódou pri 16-hodinovom meraní priebehu s 10 km SM vláknom

4.2 Meranie výkonu prijatého na polarimetri s jedným zdrojom signálu

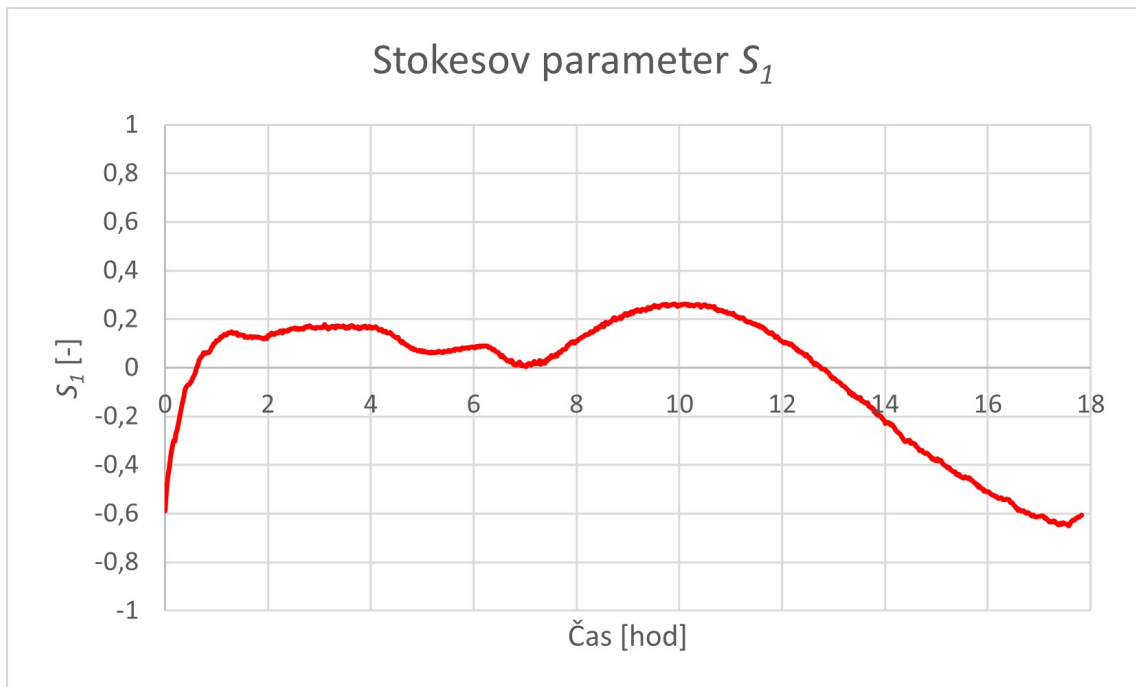
V ďalšom meraní priebehu bolo potrebné preveriť meranie s jedným zdrojom signálu, avšak s tým, že celkový výkon bol privedený na polarimeter.



Obr. 4.5: Návrh pracoviska s DWDM, jedným zdrojom a polarimetrom

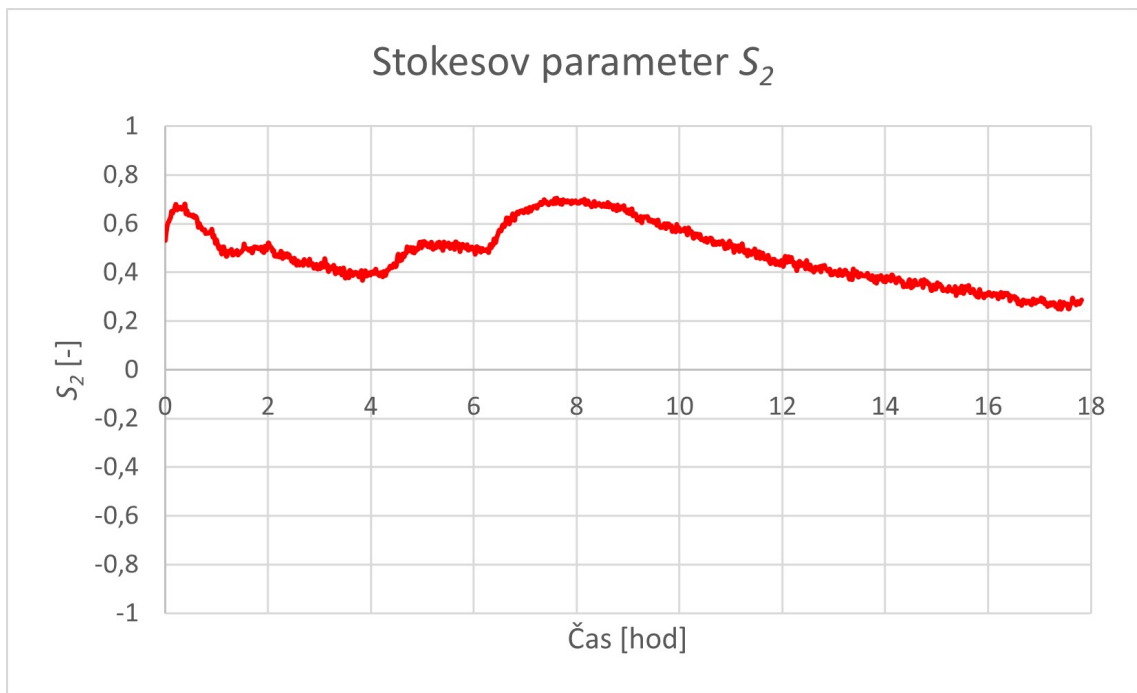
Meranie na polarimetri je dôležité pre kontrolu meraní na fotodióde. Zapojenie bolo s jedným zdrojom signálu TP-Link MC220L bez trasy s 10 km SM vlákna. Ako môžeme vidieť v schéme viz. 4.5, zapojenie pracoviska je v prvej časti totožné ako pri meraní na fotodióde s optickým meračom, avšak v poslednej časti už je polarimeter.

V nasledujúcich grafoch sú zobrazené výsledky 17,5-hodinového merania na polarimetri. Ako už bolo spomenuté, toto meranie je dôležité aj preto, pretože meranie na fotodióde nemusí byť vždy presné, a to hlavne v dôsledku toho, že merať dlhé trasy v kilometrových dĺžkach v laboratórnych podmienkach namiesto reálnych trás zakopaných v zemi v ochranných plastových/kovových rúrach má svoj dopad aj na celkové výsledky. Z tohto dôvodu môžeme považovať meranie polarimetrom za kontrolné meranie.



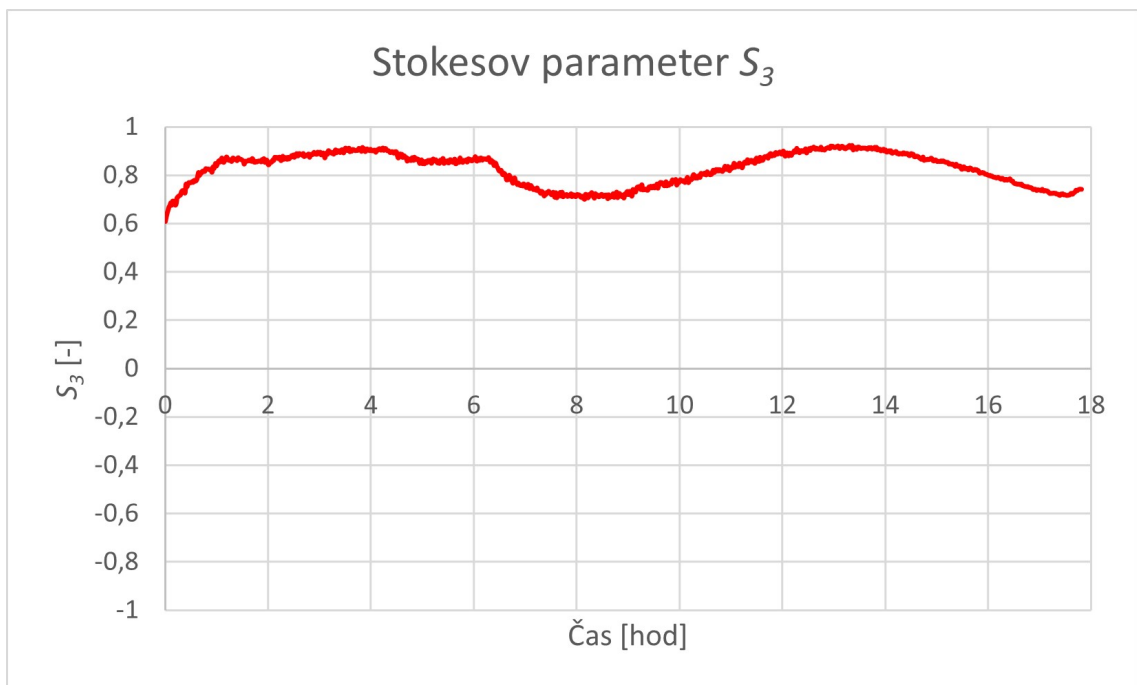
Obr. 4.6: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_1

Medzi najviac významný Stokesový vektor pre naše meranie sa radí S_1 , pretože sledované body sa pri meraní pohybovali na Poincarého guli najviac v rovine tohto vektoru, nadobudli aj záporné a taktiež aj kladné hodnoty ako budeme môcť vidieť na grafoch. Meranie je taktiež ovplyvnené aj laboratórnymi podmienkami, a to hlavne teplom, keďže meranie bolo realizované v zimných mesiacoch kalendárneho roka a vytápajúce prostredie bolo preukázateľné. Optické SM vlákno je citlivé na každú zmenu teploty takéhoto typu a taktiež aj na rôznorodé prúdenie vzduchu v miestnosti.



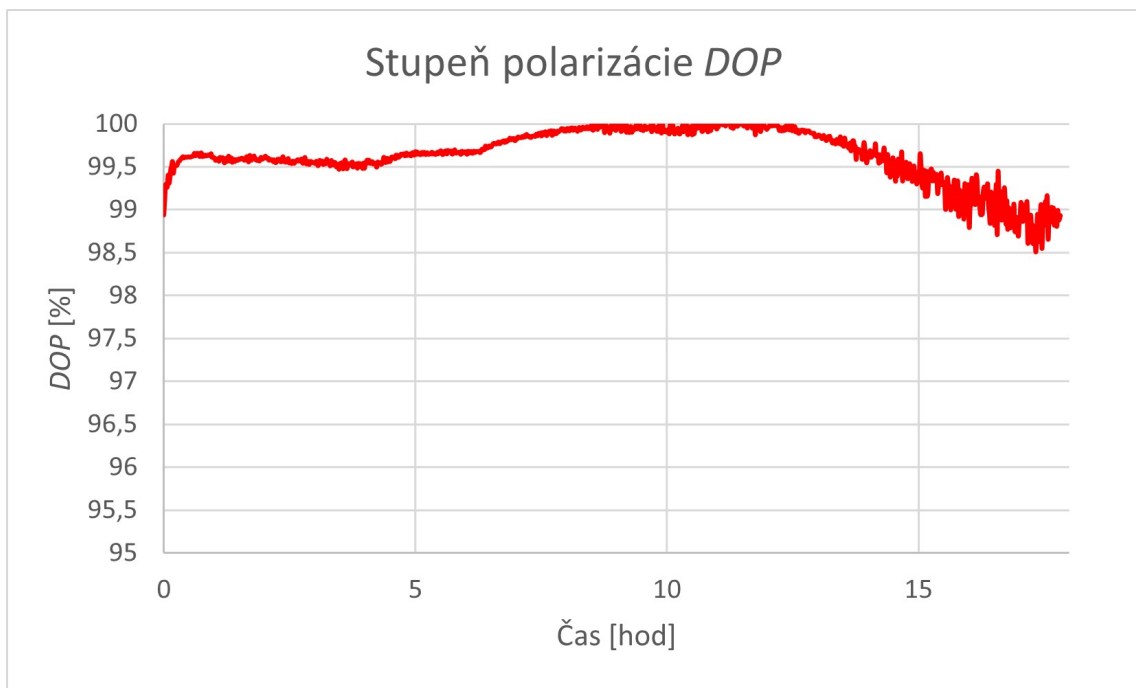
Obr. 4.7: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_2

Stokesov parameter S_2 predstavuje rozdiel medzi intenzitou polarizačných párov pod uhlami 45°C a -45°C , a zodpovedá tak intenzite optického zväzku meraného za lineárnym polarizátorom.



Obr. 4.8: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_3

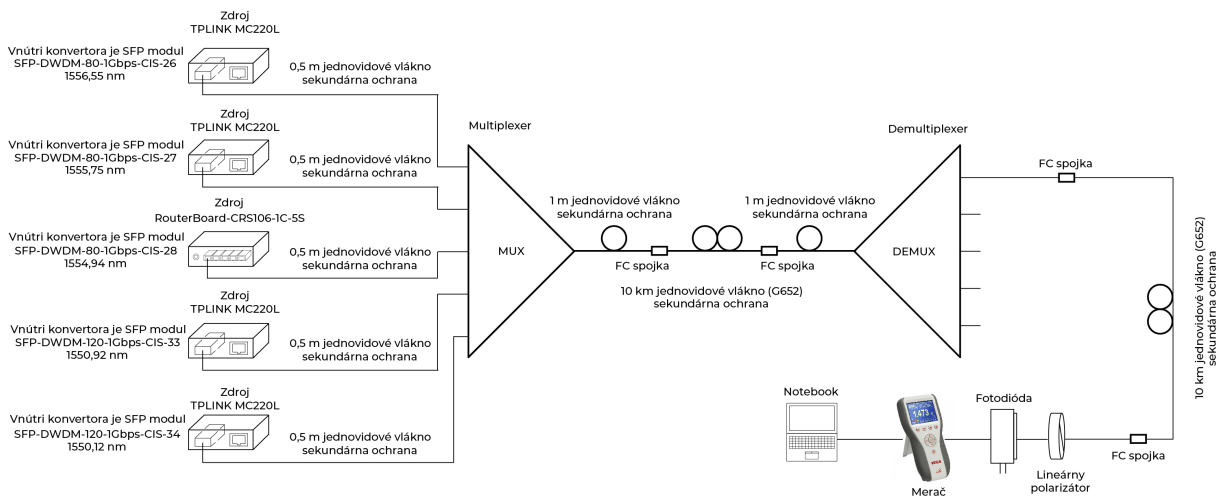
Stupeň polarizácie dokazuje priemerný stav polarizácie za určitú dobu a je vyjadrovaný v percentách. Ako môžeme vidieť na grafe viz. 4.9, v nameraných priebehoch sa stupeň polarizácie pohybuje zhruba od 98 % k takmer 100 %. Je potrebné dodať, že na osi y je priamo zvýraznený percentuálny stav od 95 % do 100 % pre lepšiu viditeľnosť zmien polarizačného stupňa. V konečnom dôsledku, ak zoberieme do úvahy to, že stupeň polarizácie vyjadruje pomer medzi vlastnosťami, ktoré sú merané a celkovým množstvom svetla vo zväzku, máme jasný dôkaz toho, že namerané výsledky sa týkajú jedného svetelného zväzku a nie sú ovplyvňované inými svetelnými zväzkami.



Obr. 4.9: Znáozornenie stupňa polarizácie *DOP*

4.3 Meranie výkonu prijatého na fotodióde s piatimi zdrojmi signálu

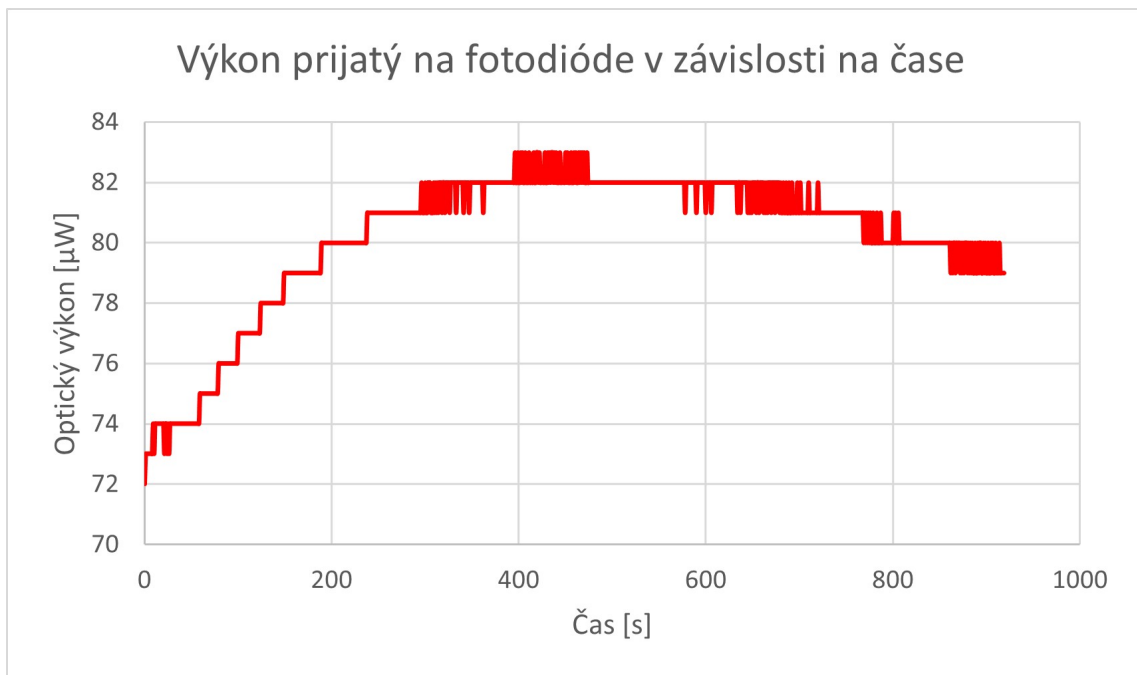
V druhej časti merania sa pracovisko zapojilo s piatimi zdrojmi signálu. Konkrétne bolo pripojené jedno zariadenie RouterBoard CRS106-1C-5S viz. 3.3 a hneď rovno štyri zariadenia TP-Link MC220L viz. 3.4. Merania prebehli v 15-minútovom intervale. Ako prvé prebehlo meranie s 10 km SM vláknom a následne so 40 km SM vláknom, ktoré si postupne predstavíme a zanalyzujeme. Takisto je potrebné zdôrazniť, že ako aj pri meraniach s jedným zdrojom signálu, tak aj teraz s piatimi zdrojmi prebehli merania pri laboratórnej teplote 24 °C.



Obr. 4.10: Návrh pracoviska s DWDM, piatimi zdrojmi a fotodiódou

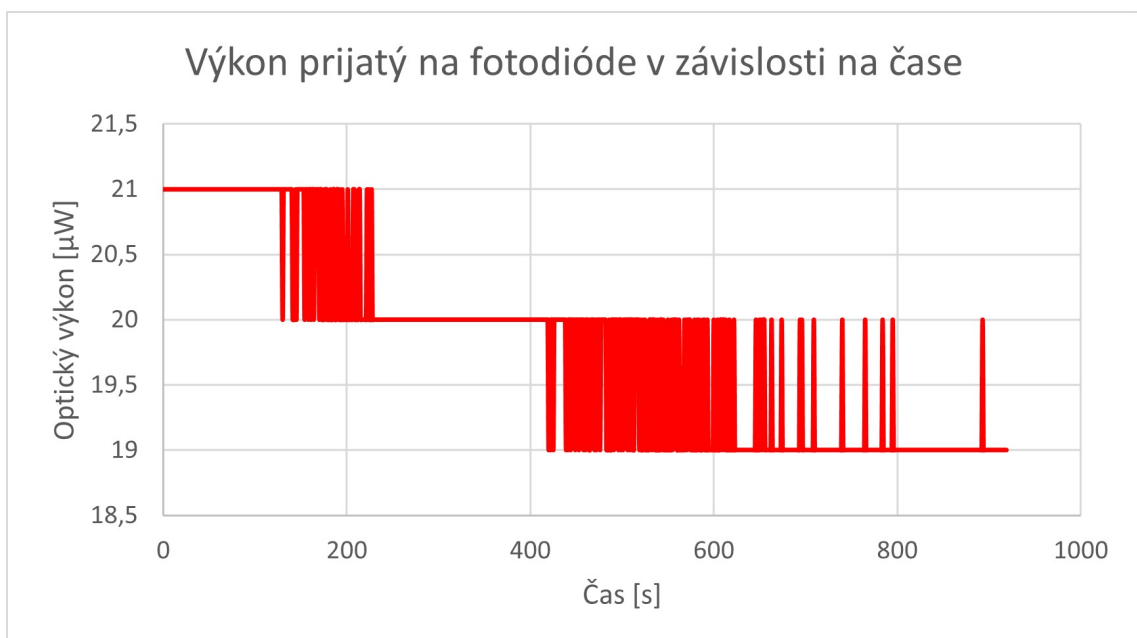
4.3.1 Meranie výkonu prijatého na fotodióde s piatimi zdrojmi signálu a 10 km SM vláknom

Po zapojení piatich zdrojov signálu do pracoviska prebehlo viacero scenárov znova za rovnakých podmienok a skúmalo sa správanie DWDM multiplexera a demultiplexera a taktiež merača optického výkonu, či bude mať vplyv väčší počet zdrojov na nameraný optický výkon. Taktiež sme porovnali, či dĺžka optickej trasy bude mať vplyv na nameraný optický výkon. V nasledujúcich dvoch grafoch môžeme vidieť namerané hodnoty pri zapojení s 10 km trasou a taktiež pri zapojení so 40 km trasou. Treba zdôrazniť, že taktiež ide o SM vlákna G.652.



Obr. 4.11: Optický výkon snímaný fotodiódou pri 15-minútovom meraní priebehu s 10 km SM vláknom

4.3.2 Meranie výkonu prijatého na fotodióde s piatimi zdrojmi signálu a 40 km SM vláknom

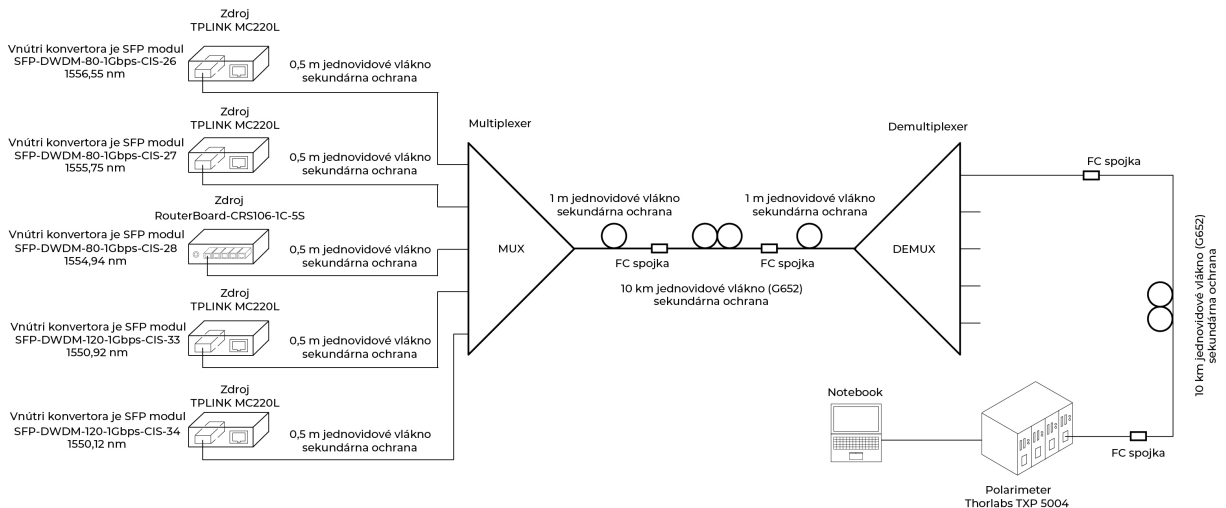


Obr. 4.12: Optický výkon snímaný fotodiódou pri 15-minútovom meraní priebehu s 40 km SM vláknom

Ak sa zameriame na namerané hodnoty, môžeme vidieť, že so zapojeným 10 km SM vláknom sa optický výkon priemerne pohybuje v rozmedzí 72 μW - 83 μW . No veľmi zaujímavé namerané hodnoty vyšli so zapojeným 40 km SM vláknom, a to zhruba v rozmedzí 19 μW - 21 μW . Ak si to prepočítame, tak vidíme, že optický výkon nám so 4-násobne dlhším optickým vláknom klesol 4-násobne, čo potvrdzuje to, že dĺžka trasy rapídne ovplyvňuje optický výkon.

4.4 Meranie výkonu prijatého na polarimetri s piatimi zdrojmi signálu

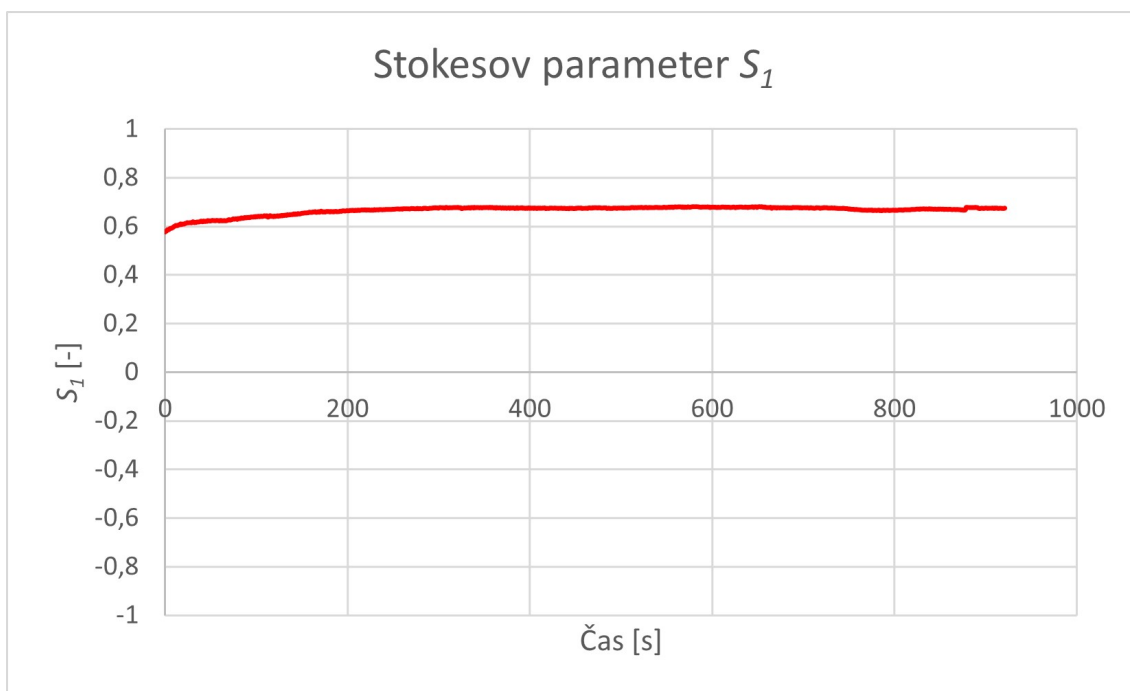
V ďalšom meraní sa to isté pracovisko s piatimi zdrojmi prerobilo a meralo v zapojení s polarimetrom podľa schémy viz. 4.13. Vďaka polarimetru je možné vidieť všetky grafické polarizačné stavy.



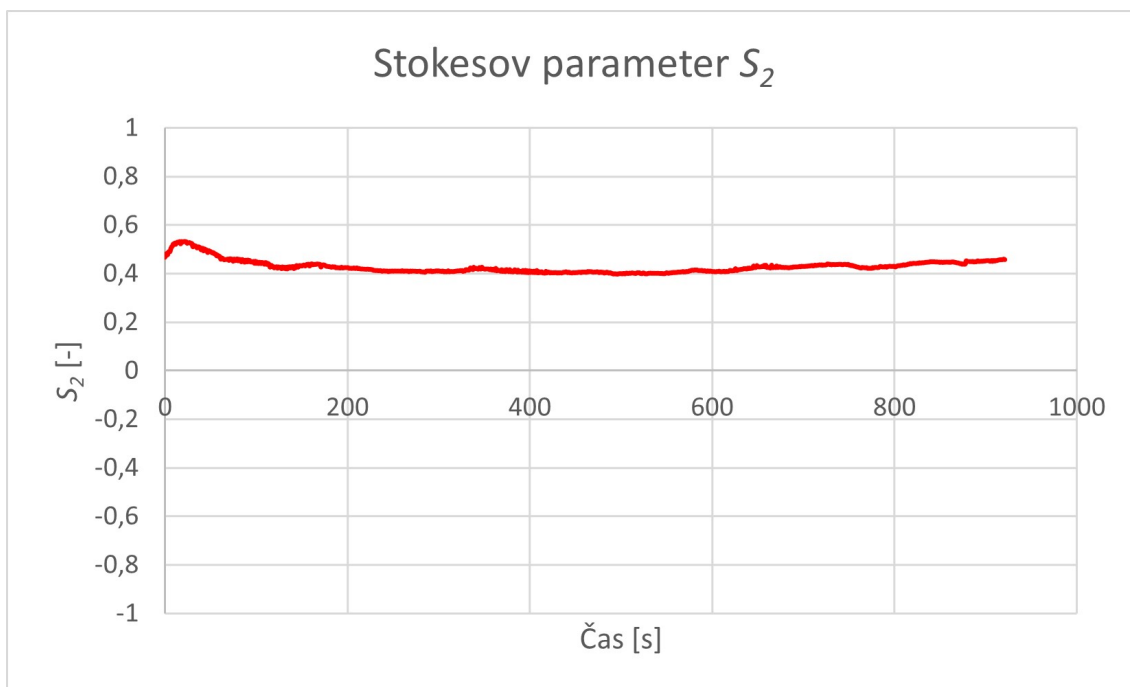
Obr. 4.13: Návrh pracoviska s DWDM, piatimi zdrojmi a polarimetrom

Keď sa pozrieme na grafy s parametrami S_1 , S_2 a S_3 , môžeme vidieť, že zmeny polarizačného svetla síce sú, ale treba uznať, že sú rovnomerne rozprestrené v čase, a to je dôsledok toho, že tie zmeny sú malé.

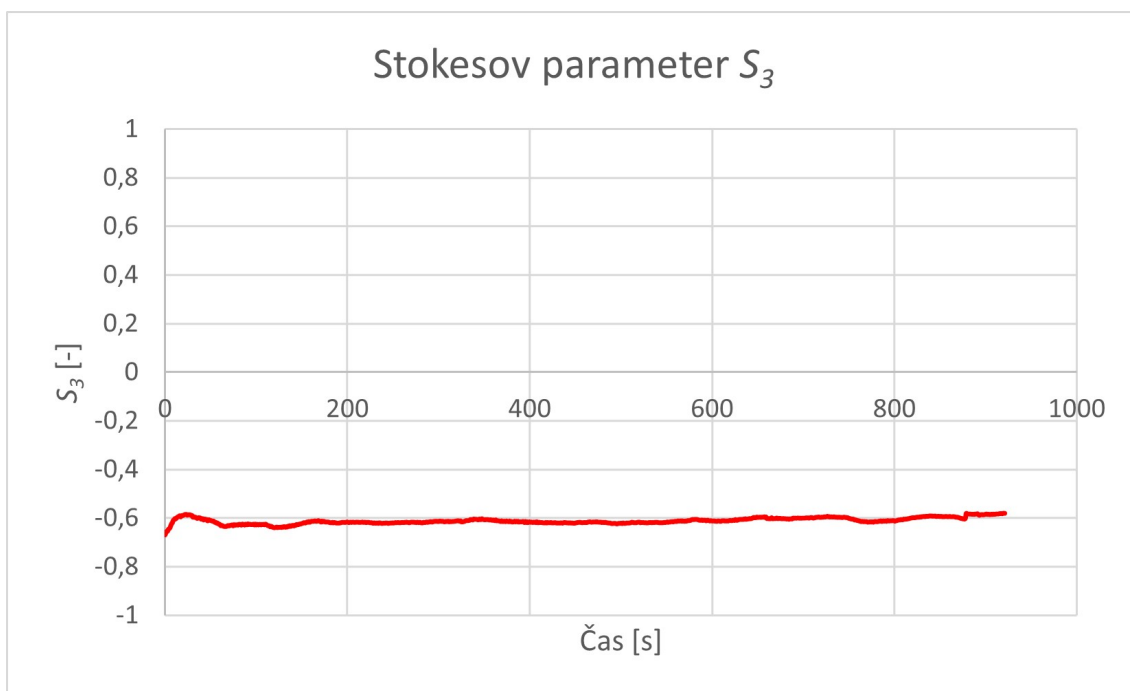
Znova je dôležité zdôrazniť, že stupeň polarizácie viz. graf 4.17, sa pohybuje na úrovni 99 % aj pri meraní s piatimi zdrojmi. Z tohto dôvodu môžeme dávať patričnú dávku dôveryhodnosti nameraným Stokesovým parametrom, pretože je zjavné, že tieto parametre sa týkajú jedného svetelného zväzku, nie sú ovplyvňované inými svetelnými zväzkami a môžeme ich hodnotiť ako polarizačné vlastnosti, ktoré je možné použiť v senzorovej technike.



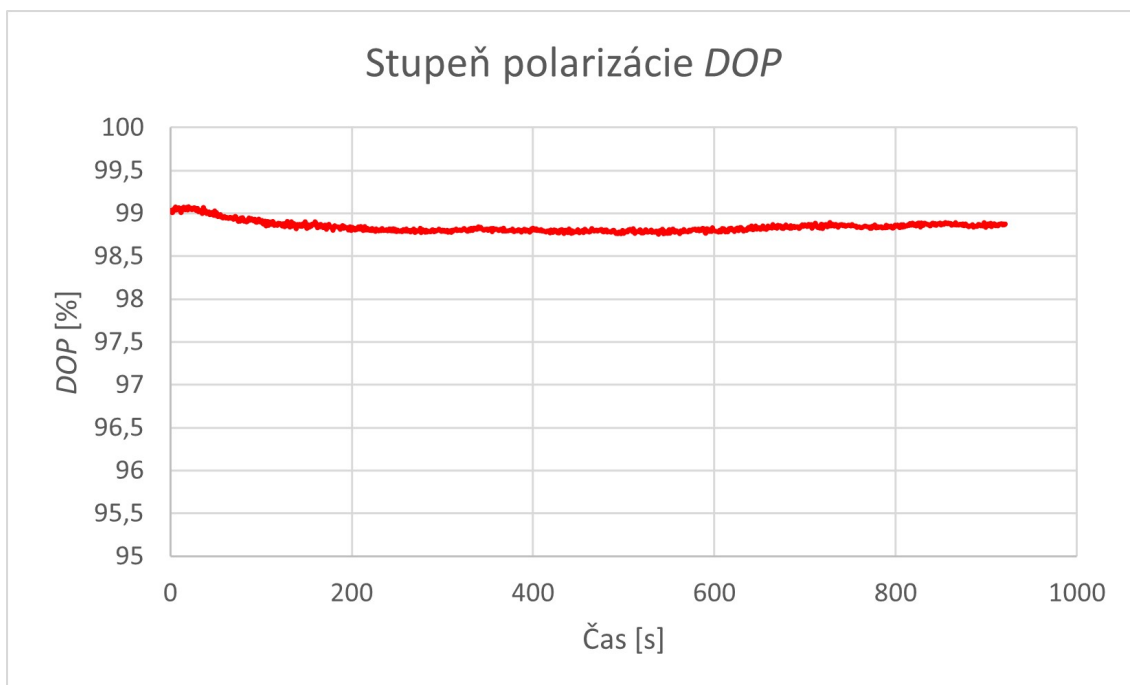
Obr. 4.14: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_1



Obr. 4.15: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_2



Obr. 4.16: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesového vektora S_3



Obr. 4.17: Znázornenie stupňa polarizácie DOP

5 Diskusia

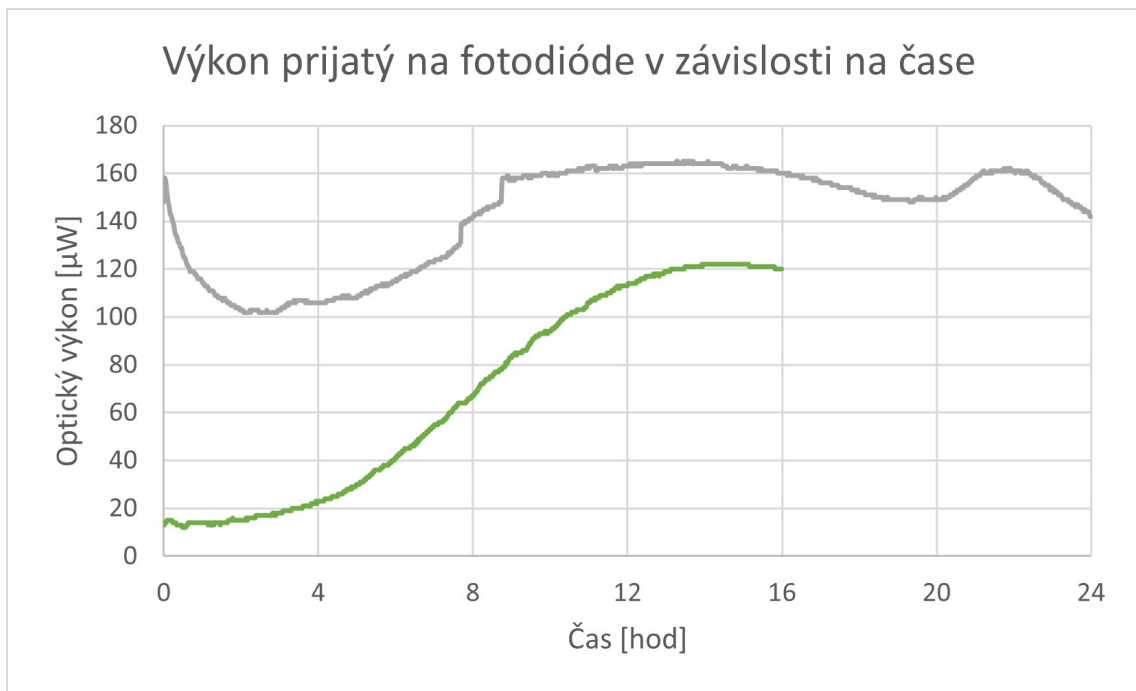
Cielom tejto práce bolo preukázať, že svetlo hustého vlnového multiplexu *DWDM* je vhodné pre napájanie optovláknového polarizačného senzora. V praktickej časti tejto práce sme demonštrovali navrhované riešenia, vyniesli grafické závislosti a namerané hodnoty so spracovaním výsledkov. Meranie bolo spravené pomocou fotodiód FGA01FC od firmy Thorlabs a taktiež QPDF-200 od firmy Qphotonics a samozrejme, aj s lineárnym polarizátorom. Následne za rovnakých podmienok s polarimetrom PAX5710 taktiež od firmy Thorlabs.

Je potrebné zdôrazniť, že medzi meraniami na fotodióde a meraním polarimetrom sú zásadné rozdiely, ktoré sa taktiež premietli aj do vyhodnotených grafov. Prvý veľký rozdiel spočíva v tom, že v schéme zapojenia a v zapojenom pracovisku je použitý lineárny polarizátor pred fotodiódou. V dôsledku tejto skutočnosti je zrejmé, že lineárny polarizátor obmedzil naše meranie do jednej roviny, respektíve priamky. Avšak na polarimetri vidíme odozvu omnoho presnejšiu, pretože tam už pracujeme s 3D guľou, nielen s priamkou. Ak nám lineárny polarizátor zníži citlivosť merania, na druhej strane nám umožní použiť relatívne lacnú fotodiódu a taktiež eliminuje nevyhnutnú potrebu využívať oveľa drahší polarimeter.

Z týchto dôvodov môžeme potvrdiť fakt, že v laboratórnom meraní je presnejšie merať polarimetrom, avšak pre zostrojenie hotového optovláknového senzora so svetlom hustého vlnového multiplexu je to nereálne pre vysokú cenu polarimetra. V našich nameraných výsledkoch, ktoré podrobnejšie rozoberieme, zanalyzujeme a taktiež dokážeme, že senzor s lineárnym polarizátorom a fotodiódou, je pre praktickú realizáciu v reálnych podmienkach so svetlom *DWDM* vhodný.

5.1 Porovnanie merania fotodiódou s jedným zdrojom bez SM vlákna a s SM vláknom 10 km

Na grafe viz. 5.1 môžeme sledovať priebeh merania s jedným zdrojom signálu v zapojení bez 10 km SM vlákna a taktiež aj so zapojeným 10 km SM vláknom. V prvých hodinách týchto meraní taktiež ovplyvnilo meranie viacero faktorov, ako pohyb v miestnosti a taktiež aj laboratórne podmienky a vykurovanie. Avšak po vzhliadnutí týchto kriviek môžeme konštatovať, že bez trasy fotodióda prijala vyšší optický výkon ako s trasou. Treba taktiež zohľadniť fakt, že porovnáваме merania v laboratórnych podmienkach, kde SM vlákno je stočené na jednom káblovom bubne a nie je zakopané v zemi, ako to býva pri reálnych podmienkach v praxi. Tento fakt sa pričínal o to, že prvé hodiny merania s 10 km SM vláknom neprijala fotodióda dostatočný optický výkon, resp. potenciál fotodiódy prijať optický výkon bol omnoho

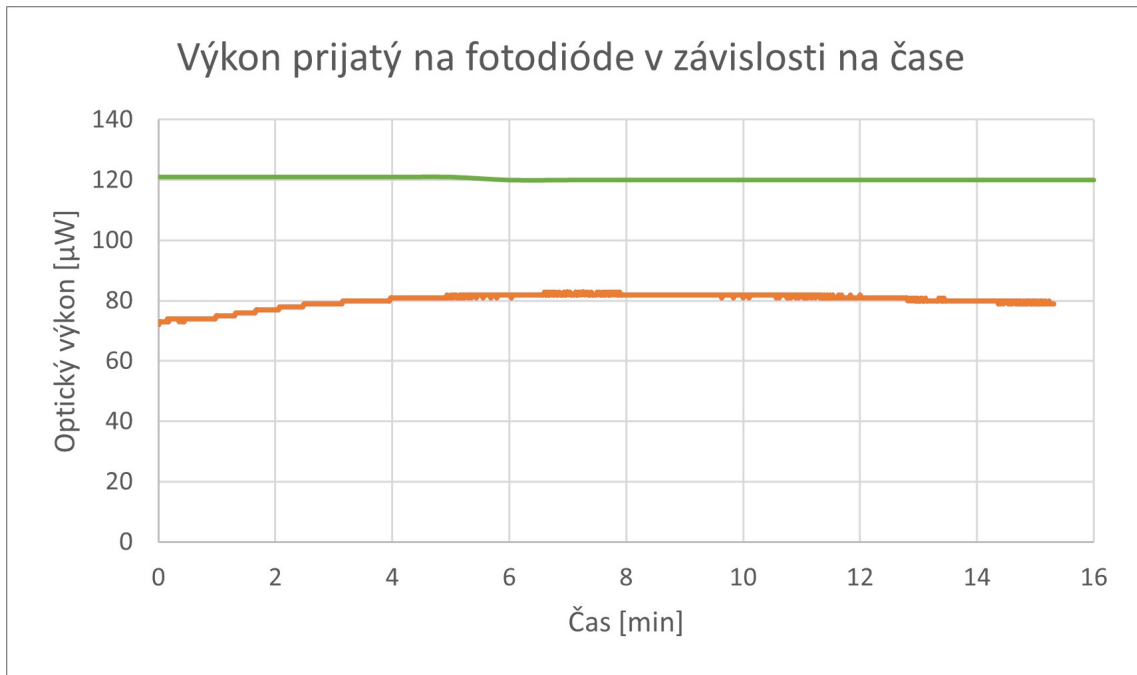


Obr. 5.1: Porovnanie optického výkonu pri meraní s jedným zdrojom bez SM vlákna a s 10 km SM vláknom

vyšší, čo vidíme v druhej polovici zelenej krivky.

5.2 Porovnanie merania fotodiódou s jedným zdrojom a s piatimi zdrojmi s SM vláknom 10 km

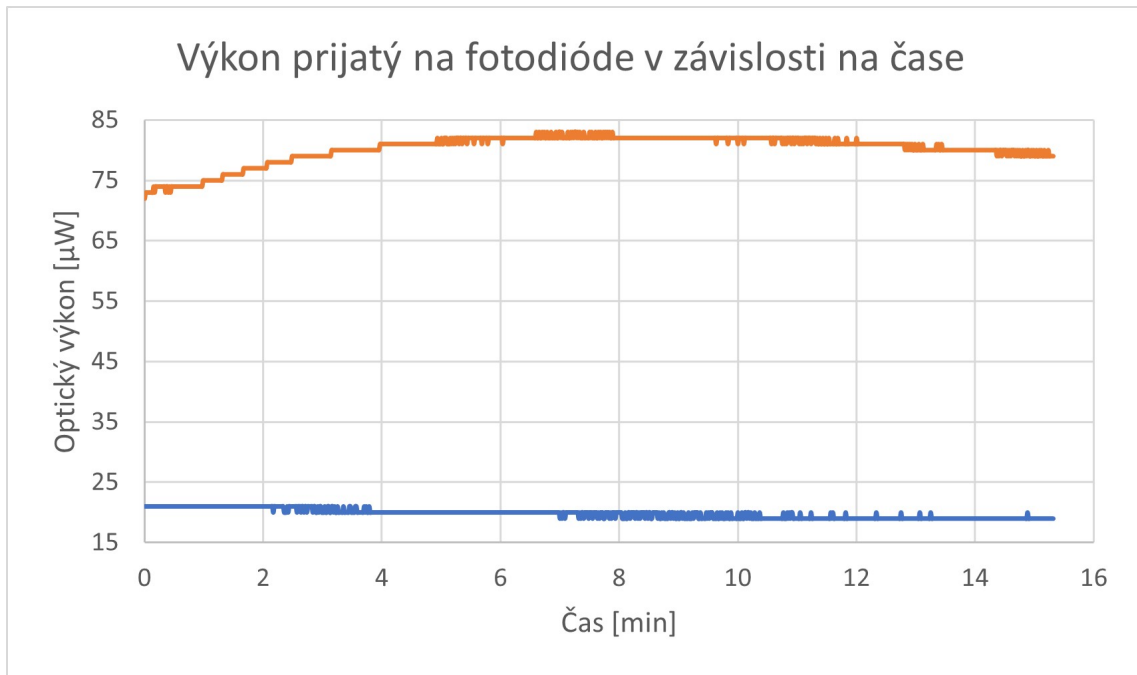
Na grafe viz. 5.2 môžeme vidieť porovnanie merania 10 km trás s SM vláknom, avšak v prvom prípade s meraním s jedným zdrojom signálu a v druhom prípade rovno s piatimi zdrojmi signálu. Týmto meraním môžeme konštatovať to, že väčší počet zdrojov v pracovisku znížil prijatý výkon na fotodióde zhruba tretinovo, čo sa aj očakávalo.



Obr. 5.2: Porovnanie optického výkonu pri meraní s jedným zdrojom a s piatimi zdrojmi s 10 km SM vláknom

5.3 Porovnanie merania fotodiódou s piatimi zdrojmi s SM vláknom 10 km a 40 km

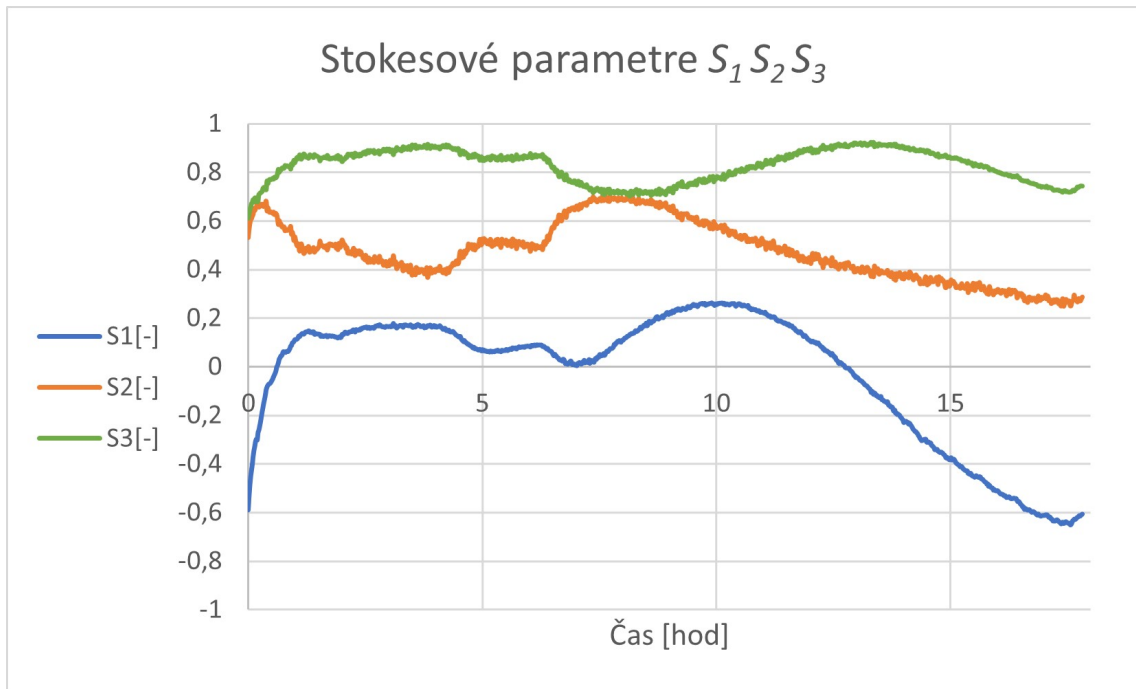
V ďalšej analýze sa zameriavame na dĺžku trasy. Ak si vynesieme krivky z merania piatimi zdrojmi a porovnáme graf s SM vláknom 10 km s grafom, kde máme predradné SM vlákno v celkovej dĺžke 40 km, môžeme jasne konštatovať na grafe viz. 5.3, že s dlhšou optickou trasou celkový prijatý výkon na fotodióde postupne klesá. Ak sa bližšie pozrieme na krivky, tak na nich vidíme jemné skoky a nepravidelnosť, čo je spôsobené tým, že merač optického výkonu Vega nie je schopný merať v μW na desatinné miesta, ale len celé čísla. Taktiež má najnižšiu vzorkovaciu frekvenciu približne 1 s.



Obr. 5.3: Porovnanie optického výkonu pri meraní s piatimi zdrojmi s 10 km a 40 km SM vláknom

5.4 Porovnanie všetkých Stokesových parametrov pri meraní polarimetrom s jedným zdrojom bez SM vlákna

Na grafe viz. 5.4 môžeme vidieť pokojné priebehy Stokesových parametrov S_2 a S_3 , čo dokazuje, že zmeny polarizačného svetla síce sú, ale sú rovnomerne rozprestrené v čase a taktiež môžeme zhodnotiť aj to, že sú tie zmeny malé, čo je pre senzor so svetlom hustého vlnového multiplexu *DWDM* výborné konštatovanie. Parameter S_1 v počiatkovej fáze nadobudol záporné hodnoty a v posledných hodinách sa taktiež vrátil do záporných čísel. Takýchto relatívne agresívnejších zmien by v grafoch nemalo byť veľa, pretože v takých miestach boli evidentne vonkajšie vplyvy. To je pravdepodobne dôsledkom toho, že na meranie mal značný vplyv pohyb obsluhy okolo pracoviska a taktiež aj laboratórna teplota v miestnosti, kde bolo meranie realizované. Rovnako treba vziať do úvahy aj to, že meranie bolo realizované v zimných a chladných mesiacoch a taktiež svoju rolu zohralo aj vykurovanie miestnosti.

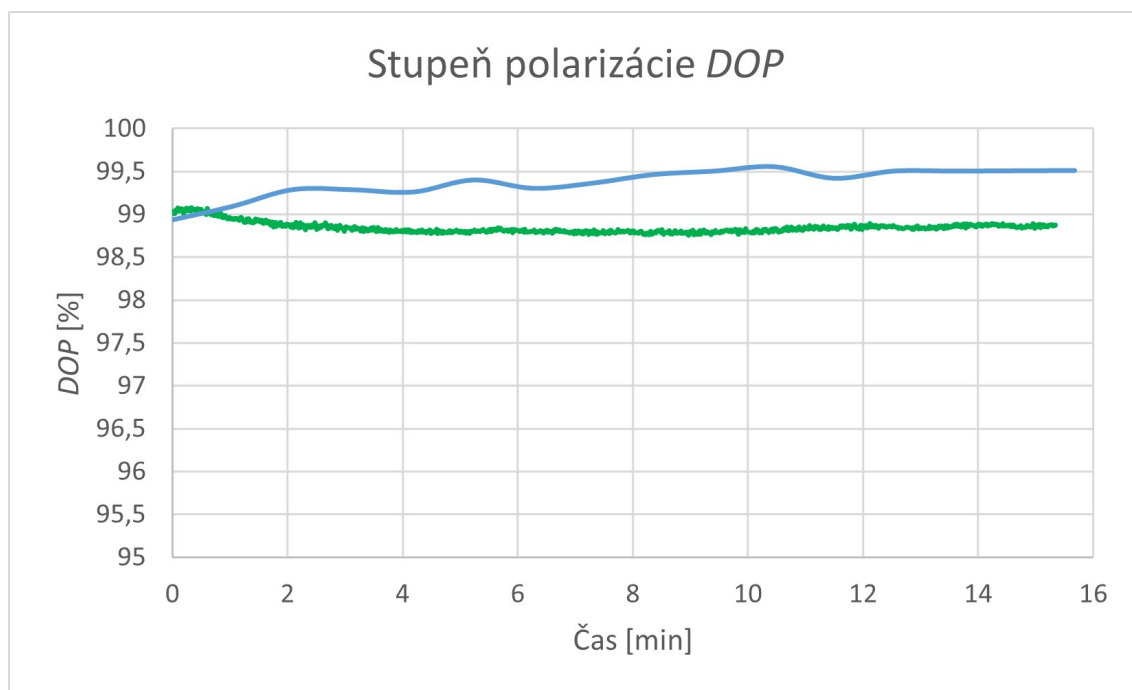


Obr. 5.4: Porovnanie všetkých Stokesových parametrov pri meraní s jedným zdrojom bez SM vlákna

5.5 Porovnanie stupňov polarizácie *DOP* pri meraní polarimetrom s jedným zdrojom a s piatimi zdrojmi

Na záver tejto diskusie o nameraných výsledkoch sa ešte vrátíme k porovnaniu stupňa polarizácie či už s prevzatými počiatočnými prvkami z dlhodobého merania s jedným zdrojom signálu alebo s kratším meraním s piatimi zdrojmi signálu. Na grafe viz. 5.5 je po zaostrení osi y stupňa polarizácie viditeľné, že ani počet zdrojov signálu, ani závislosť času a taktiež ani dĺžka SM vlákna nemala vplyv na meranie polarizovaného svetla v hustom vlnovom multiplexe *DWDM* na Poincarého guli. Taktiež stojí za zmienku spomenúť aj to, že pomalé polarizačné zmeny sú prístupné a nehrajú žiadnu škodlivú rolu či už pri Stokesových parametroch alebo aj priamo v stupni polarizácie v tomto type senzora.

Z finálneho hľadiska môžeme konštatovať, že stupeň polarizácie, viz. krivky grafu 5.5, sa pohybuje približne v rozmedzí na úrovni 99 % až 99,5 %. Z tohto dôvodu môžeme uznať a dať patričnú dávku dôveryhodnosti nameraným Stokesovým parametrom, lebo je zrejmé, že tieto parametre sa týkajú jedného svetelného zväzku, nie sú ovplyvňované inými svetelnými zväzkami a môžeme ich hodnotiť ako polarizačné vlastnosti, s ktorými je možné ďalej pracovať a taktiež aj ako vlastnosti, ktoré je možné použiť v sensorovej technike s *DWDM* multiplexom.



Obr. 5.5: Porovnanie stupňa polarizácie pri meraní s jedným zdrojom a s piatimi zdrojmi

6 Zhrnutie a záver

Práca popisuje teoretickú analýzu polarizovaného svetla, ktorá sa venovala matematickému popisu parametrov polarizácie s využitím Stokesovho formalizmu, Poincarého gule, vláknam zachovávajúcim polarizáciu a taktiež zlučováním kanálov v optickej sieti. Takisto boli popísané merania optického výkonu a taktiež zamernie na optické snímače žiarenia a komplexná analýza fotodetektorov, kde sa neskôr ukázali fotodetektory InGaAs ako najvhodnejšie pre použitie do praktickej časti a ktoré vedia pracovať na požadovanej vlnovej dĺžke. V práci sa porovnávalo meranie fotodetektorov s meraním na polarimetri v rôzne navrhnutých scenároch. Od tretej kapitoly sme už riešili samotnú praktickú realizáciu návrhu pracoviska pre meranie. Bola navrhnutá schéma pracoviska so všetkými potrebnými zariadeniami. Následne je demonštrovaná voľba vhodných zariadení pre zvolenú vlnovú dĺžku 1550 nm a taktiež aj samotný popis všetkých zvolených komponentov, hlavne ich základné vlastnosti, stručný popis a princíp zariadení a zvolených súčiastok.

Cieľom práce bolo dokázať, že ak sa polarizačný stav svetla vo vlákne mení, čo je dokázané tým, že je zaradený do pracoviska lineárny polarizátor s optickým meračom Vega a vykázané krivky, resp. prijatý optický výkon na fotodióde v závislosti na čase kolíše resp. v ňom prebieha zmena, tak sa zároveň mení aj polarizačný stav svetla vo vlákne. Dôležité zistenie bolo taktiež to, ako prudko sa mení polarizačný stav svetla. Môžeme konštatovať, že namerané výsledky preukazujú veľmi pomalé zmeny polarizačného stavu. Ďalším cieľom práce bolo preukázať, že svetlo hustého vlnového multiplexu *DWDM* je vhodné pre napájanie optovláknového polarizačného senzora, čo sme preukázali, pretože sme zistili, že zmeny polarizačného svetla síce sú, ale sú rovnomerne rozprestrené v čase a taktiež sú to zmeny malé. Treba podotknúť, že pomalé zmeny sú prístupné a neprekážajú nám. Po porovnaní rôznych scenárov v meraní na fotodióde a taktiež s meraním na polarimetri môžeme konštatovať ďalšie fakty. V konečnom dôsledku môžeme preukázateľne povedať, že meranie polarimetrom je v laboratórnych podmienkach síce presnejšie ako meranie na fotodióde, ale v reálnych podmienkach nemôže byť polarimeter súčasťou hotového senzora pre vysokú cenu. Preto je v praxi (napr. vo vojenskom muničnom sklade) vhodnejšie mať lineárny polarizátor a fotodiódu, keďže je to omnoho cenovo dostupnejšie.

Literatúra

- [1] M. BORN and E. WOLF, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light (7th Edition)*, 7th ed. Cambridge University Press, 1999, ISBN: 0521642221.
- [2] O. LEPIL and Z. KUPKA, *Fyzika pro gymnázia*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1993, ISBN: 80-042-6092-6.
- [3] E. COLLETT, *Field Guide to Polarization*. USA: SPIE Press, 2005, ISBN: 9780819458681.
- [4] S. PEKÁREK and M. MURLA, *Fyzika I*. Praha: České vysoké učení technické, 1997, ISBN: 80-01-01633-1.
- [5] M. KYSELÁK, “Využití polarizačních vlastností světla v senzorových a telekomunikačních systémech,” Habilitační práce, Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, Katedra elektrotechniky, Brno, 2018.
- [6] R. QUIMBY, *Photonics and Lasers*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2006, ISBN: 13-978-0-471-71974-8, DOI: 10.1002/0471791598.
- [7] “FOSCO: What are polarization maintaining fibers?” 2009. [Online]. Dostupné z: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95052422-what-are-polarization-maintaining-fibers>
- [8] J. TURÁN and S. PETRÍK, *Optické vláknové senzory*. Bratislava: Alfa, 1990, ISBN: 80-05-00655-1.
- [9] F. T. S. YU and S. YIN, *Fiber optics sensors*. New-York: Marcel Dekker, 2002, ISBN: 0-8247-0732-X.
- [10] J. M. LOPEZ HIGUERA, *Handbook of optical fibre sensing technology*. John Wiley and sons, New York, 2002, ISBN: 978-0-471-82053-6.
- [11] K. T. V. GRATAN and B. T. MEGGITT, *Optical Fiber Sensor Technology. Fundamentals, Applications and Systems*. Chapman and Hall, London England, 1999, ISBN: 978-1-4419-4736-9, DOI: 10.1007/978-1-4757-6077-4.
- [12] W. I. MADEN, *Optical Engineering*. Vol. 38, 1999.
- [13] “General Photonics Corporation,” Polarization Crosstalk in PM Fiber. [Online]. Dostupné z: <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/Polarization-Crosstalk-in-PM-Fiber.pdf>

- [14] “FOA: Guide To Fiber Optics & Premises Cabling,” Wavelength Division Multiplexing (WDM). [Online]. Dostupné z: <https://www.thefoa.org/tech/dwdm.htm>
- [15] “Optické systémy a sítě,” Systémy s vlnovým multiplexem – rastr CWDM a DWDM, požadavky na lasery pro DWDM. [Online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/241/07.html>
- [16] “Telecommunication Standardization Sector of ITU,” 2013, Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid. [Online]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I>
- [17] M. ROUSE, “Techtarget search networking,” 2018, Definition dense wavelength division multiplexing (DWDM). [Online]. Dostupné z: <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/dense-wavelength-division-multiplexing-DWDM>
- [18] “CWDM and DWDM Networks – Which is best for you?” Difference between CWDM and DWDM networks. [Online]. Dostupné z: <https://vitextech.com/cwdm-and-dwdm-networks-which-is-best-for-you/>
- [19] “Fiber Optic Solutions,” 2013, Better Knowing Optical Power Measurement. [Online]. Dostupné z: <http://www.fiber-optic-solutions.com/better-knowing-optical-power-measurement.html>
- [20] “FOA: Guide To Fiber Optics & Premises Cabling,” 2018, Measuring Power in Fiber Optics. [Online]. Dostupné z: <https://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/power.html>
- [21] M. FILKA, *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, (Druhé, rozšířené vydání)*. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017, ISBN: 978-80-86785-14-1.
- [22] M. HUSÁK, *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Praha: Academia, 2008, ISBN: 978-80-200-1478-8.
- [23] “Mikrotik,” CRS106-1C-5S, Routerboard. [Online]. Dostupné z: <https://mikrotik.com/product/CRS106-1C-5S>
- [24] “TP-Link,” MC220L, Gigabit Ethernet Media Converter. [Online]. Dostupné z: <https://www.tp-link.com/us/business-networking/accessory/mc220l/>
- [25] “Mikrotik,” S-55DLC80D, SFP 1.25 Gbps module for 80 km links with Dual LC-connector. [Online]. Dostupné z: https://mikrotik.com/product/s_55dlc80d

- [26] “Bank Photonics, Inc.” DMCES-18D-C34-310-SC/APC, DWDM Multi-Channel Mux/Demux Module. [Online]. Dostupné z: <http://www.bpi-inc.com/ppadwdmmodule.html>
- [27] “Thorlabs,” PAX5710-T, TXP Polarimeter Including PC with External Sensor, 1300 - 1700 nm. [Online]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/1182.PDF>
- [28] “Thorlabs,” PAX1000IR2/M, Polarimeter, Free Space and Fiber Coupled, 900 - 1700 nm, Metric Threading. [Online]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PAX1000IR2/M>
- [29] “Thorlabs,” ILP1550PM-FC, In-Line Fiber Polarizer, 1550 ± 50 nm, PM/PM Pigtail, FC/PC. [Online]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=ILP1550PM-FC>
- [30] “QPhotonics,” QPDF-200, Fiber coupled InGaAs PIN photodiode. [Online]. Dostupné z: <http://www.qphotonics.com/Fiber-coupled-InGaAs-PIN-photodiode-QPDF-200.html>
- [31] “Thorlabs,” FGA01FC, InGaAs PHOTODIODE, FC/PC. [Online]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FGA01FC>
- [32] “Ophir,” Vega P/N 7Z01560, Color Screen Handheld Laser Power & Energy Meter. [Online]. Dostupné z: <https://www.ophiropt.com/laser--measurement/laser-power-energy-meters/products/smart-displays/vega>

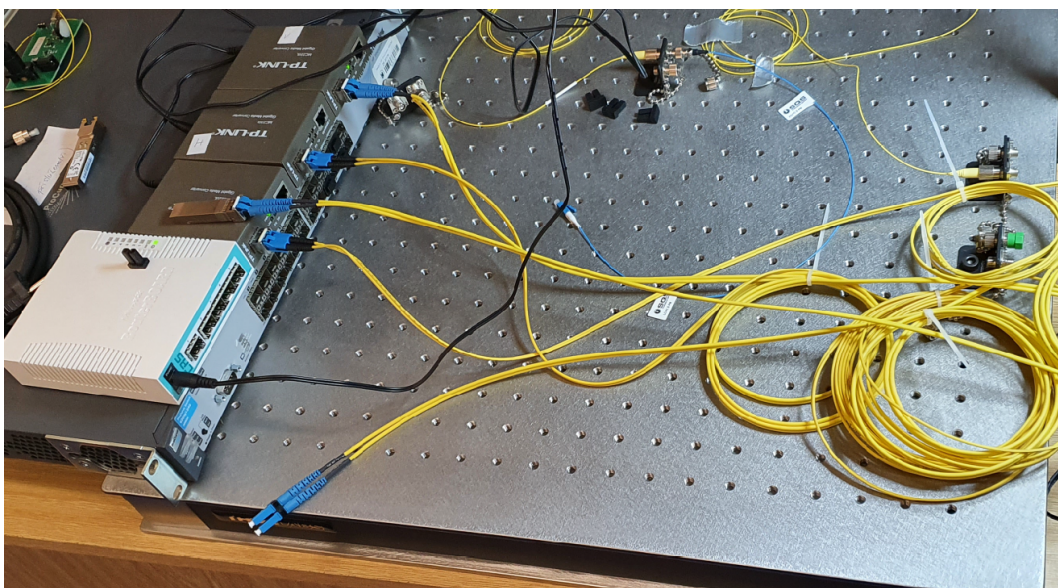
Zoznam symbolov, veličín a skratiek

CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex
DOCP	Degree of Circular Polarization
DOLP	Degree of Linear Polarization
DOP	Degree of Polarization
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
\vec{E}	Intenzita elektrického poľa
FDM	Frequency Division Multiplex
FFT	Fast Fourier transform
ITU	International Telecommunication Union
LED	Light Emmiting Diode
MSVC	Microsoft Visual C
NIST	National Institute of Standards and Technology
OLTS	Optical Loss Test Set
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer
OVS	Optické vláknové senzory
PBS	Polarization Beam Splitter
PC	Polarization Controller
PDM	Polarization Division Multiplexing
PM	Polarization Maintaining
PMF	Polarization Maintaining Fiber
PoE	Power over Ethernet
SFP	Small Form-Factor Pluggable
SOP	State of Polarization
SM	Single Mode
TDM	Time Division Multiplex
WDM	Wavelength Division Multiplex

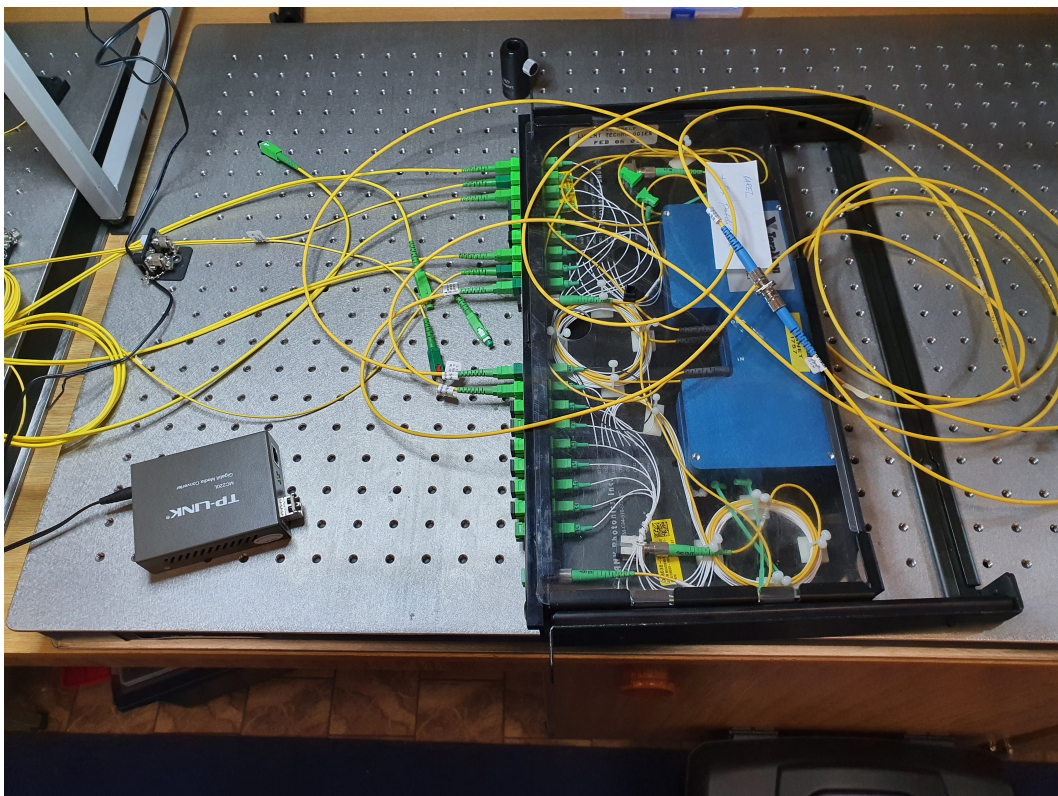
Zoznam príloh

A Fotografie pri navrhovaní pracoviska	65
B Elektronické prílohy - obsah	66

A Fotografie pri navrhovaní pracoviska



Obr. A.1: Voľba zdrojov



Obr. A.2: DWDM mux/demux

B Elektronické prílohy - obsah

V elektronických prílohách tejto práce sa nachádzajú všetky výstupy meraní na fotodióde a na polarimetri v excel súboroch a taktiež aj vytvorené grafické závislosti.