



# 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

# VÍCEKANÁLOVÉ POLARIZAČNÍ OPTOVLÁKNOVÉ SENZORY VE VLNOVÉ MULTIPLEXNÍ TECHNICE

MULTI-CHANNEL POLARIZATION OPTICAL FIBER SENSORS IN WAVE MULTIPLEX TECHNIQUE

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Švehlík

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2022

# Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Martin Švehlík

**ID:** 84500

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vícekanálové polarizační optovláknové senzory ve vlnové multiplexní technice

**POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Úkolem práce je analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami a zároveň analýza současných hustých vlnových multiplexních technik. Práce se zabývá teorií změn polarizačních stavů ve vláknech zachovávajících polarizaci a též běžných komunikačních vláknech při použití vlnového multiplexu a má za cíl navrhnout funkční uspořádání optovláknových komponent tak, aby senzorické polarizační vlastnosti světla byly vícekanálově použitelné v aplikacích vlnového multiplexu.

**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
- [3] Collett, E. Polarized Light in fiber optics, SPIE, New Jersey 2003, ISBN: 9780819457615

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 24.5.2022

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

**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**

Diplomová práce se zabývá sestavením a možnostmi optovláknového sensorického systému s využitím 100 GHz hustého vlnového multiplexu (DWDM) při použití standardních jednojádrových komunikačních vláken. V úvodu jsou rozebrány potřebné teoretické znalosti. Cílem je návrh senzoru narušení teplotního pole se vzdáleným buzením a detekcí. Praktická část obsahuje návrh a sestavení měřicího pracoviště. Dále jsou uvedeny výsledky jednotlivých měření, které jsou v závěru porovnány a vyhodnoceny.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

DWDM, polarizace světla, dělič polarizace, optický výkon, optické vlákno, senzor, polarizační multiplex.

## **ABSTRACT**

The diploma thesis deals with the optical fiber sensor system assembly and its possibilities using 100 GHz wavelength multiplexing (DWDM), when using standard single-mode communication fibers. In the introduction, the necessary theoretical knowledge is discussed. The aim of the work is to design a temperature field violation sensor with remote excitation and detection. The practical part of the thesis contains the design and assembly of the measuring workplace. Also, the results of each measurement are presented, and at the end, they are compared and assessed.

## **KEYWORDS**

DWDM, Polarization of Light, Polarization Beam Splitter, Optical Power, Optical Fiber, Sensor, Polarization Multiplex.

ŠVEHLÍK, Martin. *Vícekanálové polarizační optovláknové senzory ve vlnové multiplexní technice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 59 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení autora:</b>	Bc. Martin Švehlík
<b>VUT ID autora:</b>	84500
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2021/22
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Vícekanálové polarizační optovláknové senzory ve vlnové multiplexní technice

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. a doc. Ing. Martinu Kyselákovi, PhD. za umožnění zpracování tématu této práce, odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat Petru Hříbovi za pomoc při tvorbě textu a v oblasti jazykových korektur. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Polarizace světla</b>	<b>12</b>
1.1 Vektor elektrického pole	12
1.2 Eliptická polarizace	13
1.3 Lineární polarizace	15
1.3.1 Lineární polarizátory	15
1.4 Kruhová polarizace	18
1.5 Poincarého koule	18
1.6 Stokesovy polarizační parametry	20
1.7 Speciální optická vlákna zachovávající polarizaci	21
<b>2 Rozptyl záření</b>	<b>23</b>
2.1 Pružný versus nepružný rozptyl	23
2.2 Stokesovy a anti-Stokesovy složky rozptylu	23
2.3 Rayleighův rozptyl	24
2.4 Ramanův rozptyl	24
2.5 Brillouinův rozptyl	25
<b>3 Optoelektronické multiplexní systémy</b>	<b>26</b>
3.1 Technologie WWDM	26
3.2 Technologie DWDM	27
3.3 Technologie CWDM	27
<b>4 Optické vláknové senzory</b>	<b>28</b>
4.1 Základní vlastnosti optických vláknových senzorů	28
4.2 Rozdělení optických vláknových senzorů	29
4.3 Optické vláknové senzory a jejich kategorie	29
4.3.1 Senzory s modulací podle intenzity	30
4.3.2 Senzory s modulací podle fáze	30
4.3.3 Senzory s modulací podle vlnové délky	30
4.3.4 Senzory na základě rozptylu	31
4.3.5 Polarizační optické vláknové senzory	31
<b>5 Teplotní optické vláknové senzory</b>	<b>32</b>
5.1 Základní vlastnosti teplotních optických vláknových senzorů	32
5.2 Teplotní vláknové senzory a jejich rozdělení	33
5.2.1 Senzory odrazivosti a pohlcování	33

5.2.2	Fluorescenční senzory . . . . .	34
5.2.3	Senzory mikroohybu . . . . .	34
5.2.4	Dotovaná vlákna . . . . .	35
5.2.5	Černé těleso . . . . .	35
5.2.6	Interferometrické senzory . . . . .	36
5.2.7	Senzory s Braggovou mřížkou (FBG) . . . . .	36
5.2.8	Distribuované snímání teploty (DTS) . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Návrh vlastního řešení</b>	<b>39</b>
6.1	Měření optického výkonu . . . . .	39
6.2	Měření pomocí polarimetru . . . . .	40
<b>7</b>	<b>Komponenty a zapojení měřicího pracoviště</b>	<b>42</b>
7.1	Zdroj signálu . . . . .	42
7.1.1	Switch MikroTik . . . . .	42
7.1.2	SFP+ moduly . . . . .	42
7.2	Optická vlákna a spoje . . . . .	43
7.3	DWDM multiplexor/demultiplexor . . . . .	43
7.4	Dvouvláknový optický interferometrický senzor . . . . .	44
7.5	Dělič polarizačního paprsku . . . . .	44
7.6	Zapojení senzoru s děličem polarizace . . . . .	45
7.7	Optická vlákna a spoje . . . . .	47
7.8	Měřič optického výkonu . . . . .	47
<b>8</b>	<b>Výsledky měření</b>	<b>48</b>
8.1	Schéma zapojení pracoviště . . . . .	48
8.2	Grafické znázornění výsledků měření . . . . .	49
8.3	Shrnutí . . . . .	53
	<b>Závěr</b>	<b>54</b>
	<b>Literatura</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>58</b>



# Seznam obrázků

1.1	Grafické znázornění elektromagnetického vlnění. . . . .	13
1.2	Vznik vektoru elektrického pole. . . . .	13
1.3	Diferenciální skupinové zpoždění. . . . .	14
1.4	Polarizační elipsa. . . . .	14
1.5	Stavy polarizace v závislosti na amplitudách a fázových posunech. . .	16
1.6	Polarizace pomocí polaroidu. . . . .	17
1.7	Polarizace pomocí Nikolova hranolu. . . . .	18
1.8	Souřadnice Poincarého koule. . . . .	19
1.9	Degenerované stavy Poincarého koule. . . . .	20
1.10	Příklad stavů polarizace vynesené na Poincarého kouli. . . . .	20
1.11	Druhy vláken zachovávajících polarizaci: a) Eliptické b) Panda c) Mo- týlek. . . . .	22
2.1	Schematické znázornění energie rozptýlených fotonů. . . . .	24
2.2	Spektra rozptylu pro Rayleighův, Ramanův a Brillouinův rozptyl. . .	25
4.1	Obecná struktura sensorového systému. . . . .	28
5.1	Reflexní optický snímač teploty využívající bimetalový převodník. . .	33
5.2	Reflexní optický snímač teploty využívající diferenciální teplotní roz- tažnost. . . . .	33
5.3	Schematický diagram tradičního ponorného fluorometru. . . . .	34
5.4	Několik konfigurací pro monitor teploty ohybu. . . . .	35
5.5	Konfigurace senzoru teploty na základě černého tělesa. . . . .	36
5.6	Snímač teploty s jedním vláknem. Fabry-Pérotův dutinový interfero- metr. . . . .	36
5.7	Schéma teplotního senzoru FBG. . . . .	37
5.8	Princip fungování distribuovaného snímání teploty Ramanovým roz- ptylem. . . . .	38
6.1	Schéma zapojení navrhovaného pracoviště. . . . .	39
6.2	Rozestupy pro 100 GHz DWDM rastr dle ITU. . . . .	40
6.3	Měření pomocí polarimetru. . . . .	41
7.1	Přehled portů switchu MikroTik 05-1G-4S+IN. . . . .	42
7.2	Ilustrační fotografie DWDM multiplexoru/demultiplexoru. . . . .	43
7.3	Princip oddělení paprsků na lineární polarizace. . . . .	45
7.4	Dělič/slučovač optického paprsku Thorlabs BC1550SM-FC. . . . .	45
7.5	Polarizační stavy na vstupu polarizačního děliče a senzoru. . . . .	46
7.6	Polarizační stavy na výstupu polarizačního slučovače a senzoru. . . .	46
7.7	Přední pohled na měřič optického výkonu VEGA. . . . .	47
8.1	Schéma zapojení měřícího pracoviště. . . . .	48

8.2	Optický výkon na trase 12 km (vlnová délka 1555,75 nm). . . . .	49
8.3	Optický výkon na trase 12 km (vlnová délka 1554,94 nm). . . . .	49
8.4	Optický výkon na trase 4,5 km (vlnová délka 1555,75 nm). . . . .	50
8.5	Optický výkon na trase 4,5 km (vlnová délka 1554,94 nm). . . . .	50
8.6	Optický výkon na trase 4,5 km (vlnová délka 1550,92 nm). . . . .	51
8.7	Optický výkon na trase 4,5 km (vlnová délka 1550,12 nm). . . . .	51
8.8	Optický výkon na trase 1 km (vlnová délka 1555,75 nm). . . . .	52
8.9	Optický výkon na trase 1 km (vlnová délka 1554,94 nm). . . . .	52

# Úvod

Využití světla v komunikačních systémech je nezbytnou součástí moderní datové infrastruktury. Optické sítě, ve srovnání s ostatními komunikačními technologiemi, se vyznačují velkými přenosovými rychlostmi, necitlivostí vůči elektromagnetickému rušení, vysokou úrovní ochrany proti odposlechu (narušení integrity kabelu), nízkým útlumem signálu, požární bezpečností, trvanlivostí, malým objemem, hmotností atd. V rámci návrhu komunikačního systému je nutné počítat i s nevýhodami optických sítí. Mezi nevýhody patří problémy mající souvislost s instalací (cena, složitost, přesnost, odbornost atd.) a vnějšími vlivy na strukturu materiálu kabelu. Vývoj optických sítí je považován za jeden z ústředních směrů v oblasti komunikačních technologií. Některých vlivů na citlivost optických vláken lze v praxi využít, pozorováním jednotlivých veličin během provozu sítě, jako vlastností měřících zařízení. V rámci tohoto semestrálního projektu jsme se zaměřili na návrh sensorového systému, u kterého budeme sledovat změny teploty. Účel jeho využití je ideální pro prostředí citlivá na provoz běžných elektrických zařízení, u kterých může nastat, za běžných provozních podmínek, vlivem vysoké provozní teploty zařízení nebo jiskření v elektrickém obvodu, výskyt nežádoucích (nebezpečných) dějů. Další vlastností návrhu bude využití hustého vlnového multiplexu k přenosu více signálů různých vlnových délek pro výsledný sensorický systém.

# 1 Polarizace světla

Světlo je elektromagnetické vlnění. Jedná o kmitání vektoru intenzity elektrického pole a k němu kolmého vektoru indukce magnetického pole. Oba dva tyto vektory leží v rovině kolmé ke směru šíření vlnění a spolu s vektorem ve směru šíření vytváří pravotočivou soustavu, tudíž lze uvažovat pouze o jednom z těchto vektorů a většinou se volí vektor intenzity elektrického pole. V případě, že povedeme rovinu kolmou ke směru šíření svazkem světla a v každém bodu roviny bude mít vektor jiný směr a velikost, jedná se o nepolarizované světlo. O polarizovaném světle hovoříme tehdy, jestliže vektory protínající svazek světla mají v dané rovině stejný směr [14, 21].

Způsob šíření elektromagnetického vlnění dvou navzájem kolmých složek můžeme popsat rovnicemi:

$$E_x(r, t) = E_{0x} \cos(\omega t - k \cdot r + \delta_x), \quad (1.1)$$

$$E_y(r, t) = E_{0y} \cos(\omega t - k \cdot r + \delta_y),$$

kde  $k$  je vlnové číslo  $a$  popisuje směr šíření a  $r$  je bod v poli. V praxi se pole považuje za směřované podél osy  $z$ . Dvě výše uvedené rovnice pak mohou být zapsány jako:

$$E_y(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x), \quad (1.2)$$

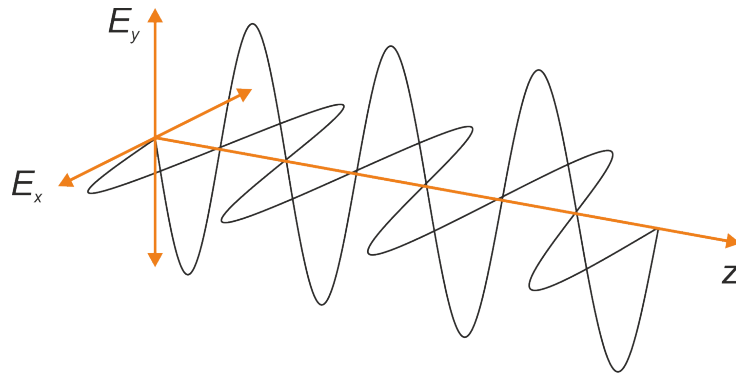
$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x).$$

kde  $\omega = 2\pi f$  je úhlová frekvence,  $k = 2\pi/\lambda$  je velikost vlnového čísla,  $E_x$  a  $E_y$  jsou maximální amplitudy a  $\delta_x$  a  $\delta_y$  jsou libovolné fáze, výraz  $(\omega t - kz)$  se nazývá propagátor.

Grafické znázornění rovnic 1.2 je zobrazeno na obrázku 1.1 [3]

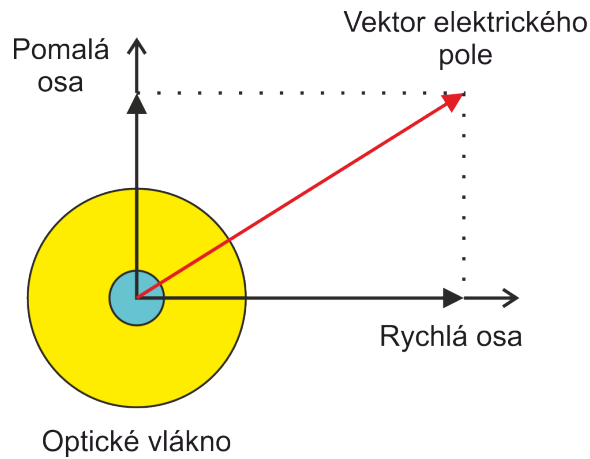
## 1.1 Vektor elektrického pole

Ve vláknu s jedním videm je světlo vedeno celým jádrem a částí pláště. Jak již bylo výše zmíněno, světlo se skládá ze dvou vektorů. U optických vláken je nejvýznamnější vektor elektrického pole. Tento vektor vzniká jako skalární součet dvou vektorů neboli hlavních stavů polarizace – PSP (Principal State of Polarization), takzvané „rychlé“ a „pomalé“ osy šíření. Hlavní polarizační stavy se v optickém vlákne šíří různými rychlostmi a jsou na sebe kolmé. Zpoždění, které mezi jednotlivými stavy



Obr. 1.1: Grafické znázornění elektromagnetického vlnění [1].

vzniká se nazývá skupinové zpoždění – DGD (Differential Group Delay, 1.3). Velikost zpoždění většinou nabývá hodnot v jednotkách pikosekund (ps) [9].



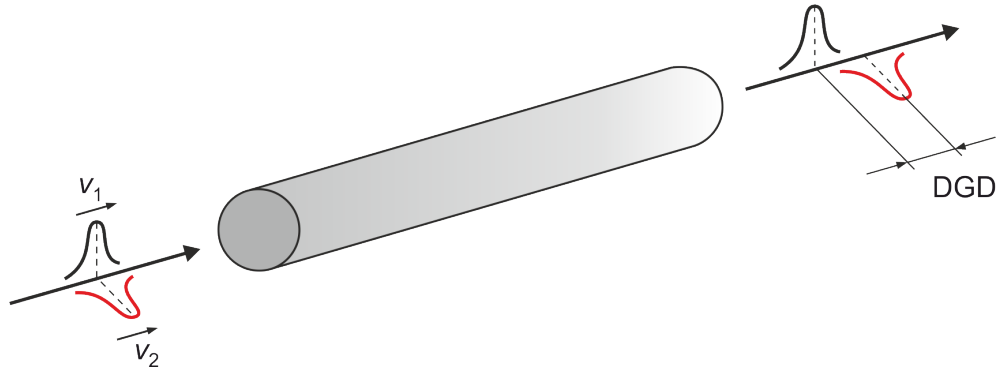
Obr. 1.2: Vznik vektoru elektrického pole [9].

## 1.2 Eliptická polarizace

Podle Fresnelovy teorie popisují  $E_x(z, t)$  a  $E_y(z, t)$  sinusové oscilace v rovinách  $x$ - $z$  a  $y$ - $z$ . Samy o sobě tyto rovnice nejsou nijak zvlášť objevené. Nicméně, odstranění fázově-prostorového propagátoru  $wt - kz$  z rovnic 1.2 vede k rovnici elipsy 1.3.

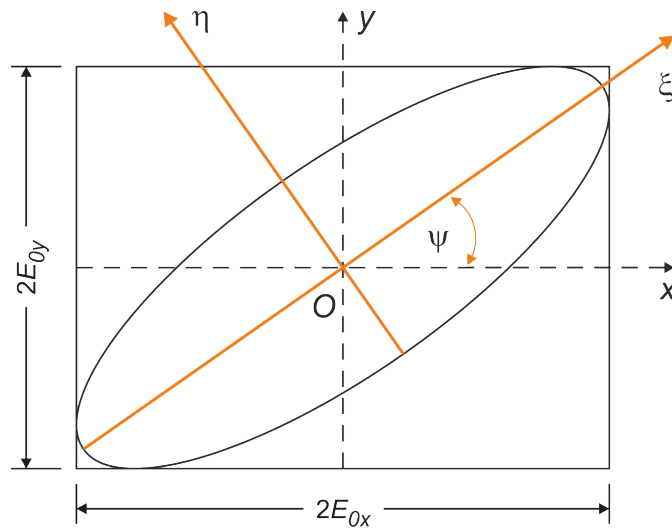
$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (1.3)$$

kde  $\delta = \delta_y - \delta_x$  je fázový rozdíl.



Obr. 1.3: Diferenciální skupinové zpoždění [9].

Výše uvedená rovnice popisuje elipsu v analytické podobě. Protože rovnice odkazuje na polarizované světlo, je nazývána polarizační elipsou. Z rovnice by vyloučen fázově-prostorový propagátor. Přesto složky  $E_x(z, t)$  a  $E_y(z, t)$  nadále zůstávají časově závislé. Graf polarizační elipsy je zobrazen na obrázku 1.4 [3].



Obr. 1.4: Polarizační elipsa. [1].

Dva úhlové parametry popisující polarizační elipsu se nazývají

- Eliptický úhel:

$$\tan 2\chi = \frac{2E_{0x} + E_{0y}}{E_{0x}^2 E_{0y}^2} \sin \delta, \quad (1.4)$$

kde  $-\pi/4 < \chi \leq \pi/4$ .

- Orientační úhel:

$$\tan 2\chi = \frac{2E_{0x} - E_{0y}}{E_{0x}^2 E_{0y}^2} \cos \delta, \quad (1.5)$$

kde  $0 \leq \psi \leq \pi$ .

Převedením rovnic 1.4 a 1.5 do trigonometrického tvaru vyjádříme definici pomocného úhlu  $\alpha$ .

$$\tan \alpha = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}, \quad (1.6)$$

kde  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ ,

$$\tan 2\psi = (\tan 2\alpha) \cos \delta, \quad (1.7)$$

$$\sin 2\chi = (\sin 2\alpha) \sin \delta,$$

kde  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$  a  $0 \leq \delta < 2\pi$ .

Obecně je optické pole elipticky polarizované, ale existuje několik kombinací amplitudy a fáze které jsou obzvláště důležité. Nazýváme je tzv. stavy degenerované polarizace.

- Lineárně horizontálně/vertikálně polarizované světlo (LHP/LVP),
- lineární  $\pm 45^\circ$  polarizované světlo (L+45P/L-45P),
- zprava doleva kruhově polarizované světlo (RCP/LCP).

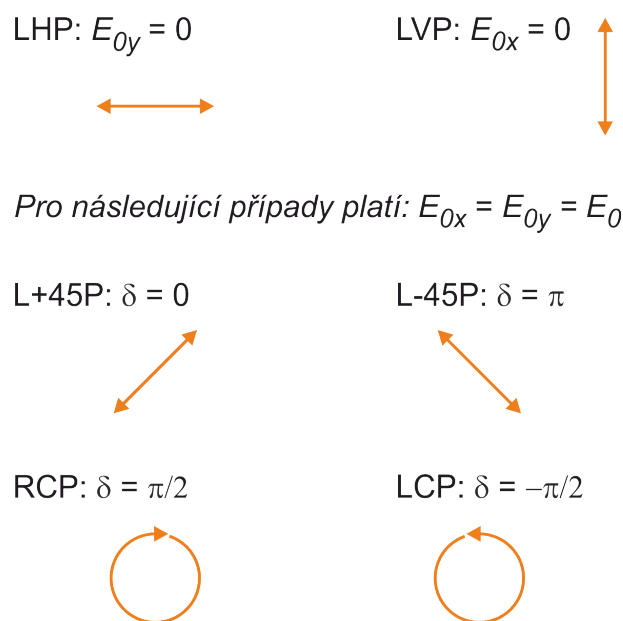
Stavy polarizace s matematickým popisem a odpovídajícím vykreslením (polarizační elipsy) jsou uvedeny na obrázku 1.5. RCP světlo se otáčí ve směru hodinových ručiček a LCP se otáčí proti směru hodinových ručiček, když se šíří směrem k pozorovateli.

## 1.3 Lineární polarizace

Jedná se o speciální případ eliptické polarizace. Pokud je jedna ze složek  $E_{0x}$ ,  $E_{0y}$  nulová (je-li fázový posun obou světelných vln nulový:  $\delta = 0$ ,  $\delta = \pi$ ), je světlo polarizováno lineárně [22].

### 1.3.1 Lineární polarizátory

Lineární polarizátory lze rozdělit do dvou obecných kategorií:



Obr. 1.5: Stavy polarizace v závislosti na amplitudách a fázových posunech [1].

- *absorpční polarizátory*, kde nežádoucí polarizační stavy jsou absorbovány zařízením,
- *polarizátory rozdělující paprsky*, kde je nepolarizovaný paprsek rozdělen na dva paprsky s opačnými polarizačními stavy.

Polarizátory, které udržují stejné osy polarizace s různými úhly dopadu, se často nazývají karteziánské polarizátory, protože polarizační vektory lze popsat jednoduchými kartézskými souřadnicemi (jejich hodnotami na horizontálních a vertikálních osách) nezávislými na orientaci povrchu polarizátoru. Když jsou dva polarizační stavy vztaženy vzhledem ke směru povrchu (obvykle nalezené s Fresnelovým odrazem), obvykle se nazývají  $s$  a  $p$ . Rozdíl mezi kartézskou a  $s$ - $p$  polarizací může být v mnoha případech zanedbatelný, ale stává se významným pro dosažení vysokého kontrastu a širokých úhlových rozptylů dopadajícího světla.

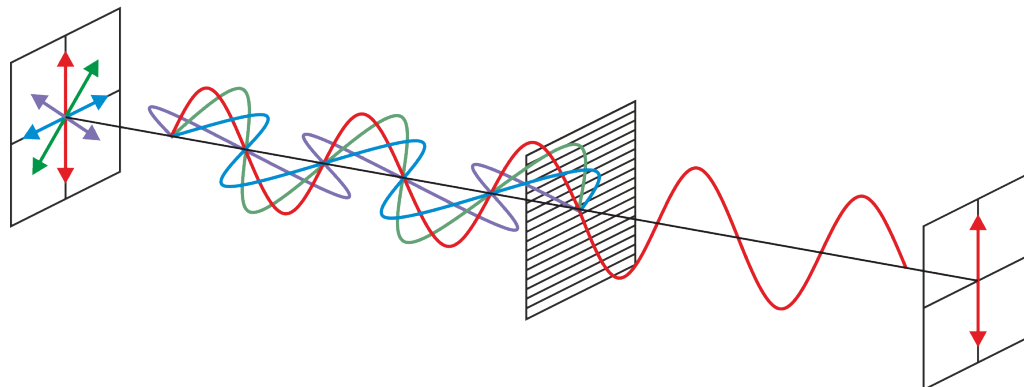
K vytvoření lineárně polarizovaného světla se používá polaroid, dvojlom a odraz [25].

## Polaroid

V podstatě se jedná o drátovou mřížku WGP (wire-grid polarizer), která se skládá z mnoha jemných paralelních kovových drátů umístěných v rovině. Jak je vidět na obrázku 1.6, polaroid převádí nepolarizovaný paprsek na paprsek s jednou lineární polarizací. Barevné šipky znázorňují vektor elektrického pole. K přenášené polarizaci



přispívají i diagonálně polarizované vlny. Jejich vertikální složky jsou přenášeny, zatímco horizontální složky jsou absorbovány a odráženy.



Obr. 1.6: Polarizace pomocí polaroidu [25].

### Polarizace odrazem

Když se světlo odráží (Fresnelovým odrazem) pod úhlem od rozhraní mezi dvěma průhlednými materiály, odrazivost je odlišná pro světlo polarizované v rovině dopadu a světlo polarizované kolmo k ní. Světlo se polarizuje odrazem, pokud bude dopadat pod Brewsterovým úhlem  $\mu$  na rozhraní dvou dielektrických prostředí, které mají indexy lomu  $n_1$  a  $n_2$ :

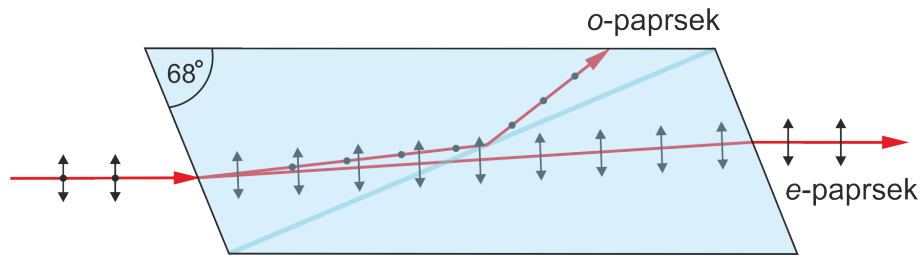
$$\theta = \theta_p = \tan^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right). \quad (1.8)$$

Světlo lomené bude částečně polarizováno a světlo odražené bude lineárně polarizované s vektorem intenzity kolmým na rovinu odrazu. Světlo lomené je kolmé na světlo odražené [25].

### Polarizace dvojlomem

Další typ lineárních polarizátorů využívá dvojlomné vlastnosti krystalů, jako je křemen a kalcit. V těchto krystalech se paprsek nepolarizovaného světla dopadajícího na jejich povrch rozdělí lomem na dva paprsky v různých polarizačních stavech.

Nicolův hranol byl raným typem dvojlomného polarizátoru, který se skládá z krystalu kalcitu, který byl rozštěpen a znovu spojen s kanadským balzámem. Krystal je řezán tak, že  $o$ - a  $e$ -paprsky jsou ve stavech ortogonální lineární polarizace. K úplnému vnitřnímu odrazu paprsku  $o$  dochází na rozhraní balzámu, protože u kalcitu dochází k většímu indexu lomu než v balzámu, a paprsek je vychýlen ke straně



Obr. 1.7: Polarizace pomocí Nikolova hranolu [25].

krystalu. Elektronický paprsek, který v kalcitu vidí menší index lomu, je přenášen rozhraním bez vychýlení.

Tyto hranoly nejsou skutečné polarizační rozdělovače paprsků, protože pouze vysílaný paprsek je plně polarizován [25].

## 1.4 Kruhová polarizace

Podobně jako lineární polarizace, kruhová polarizace vychází z popisu eliptické polarizace. V případě, že je fázový posun obou světelných vln roven  $\pi/2$  a jejich amplitudy jsou si rovny ( $E_0x = E_0y = E_0$ ), je světlo polarizováno kruhově. Chceme-li tedy kruhově polarizovat světlo z běžného zdroje (který vysílá nepolarizované světlo), je nutné z jedné vlny získat dvě lineárně polarizované vlny s navzájem kolnými vektory elektrické intenzity a navzájem fázově posunuté o  $\pi/2$  [22].

## 1.5 Poincarého koule

Polarizační elipsa je sama o sobě vynikajícím způsobem vizualizace polarizovaného světla. Z jejího znázornění, s výjimkou degenerovaných polarizačních stavů, je prakticky nemožné určit úhly orientace a elipticity.

Výpočty potřebné k určení nových úhlů polarizačního paprsku, který se šíří jedním nebo více polarizujícími prvky, jsou velmi obtížné. Jako řešení tohoto problému navrhl Poincaré použít kouli, nyní známou jako Poincarého koule, k reprezentaci polarizovaného světla. Obrázek 1.8 ukazuje Poincarého kouli a její sférické a kartézské souřadnice.

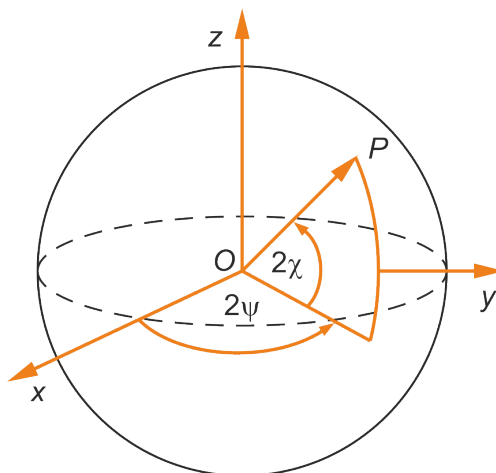
Zde  $x$ ,  $y$  a  $z$  jsou osy kartézské souřadnicové soustavy. Jejich hodnoty se nazývají Stokesovy parametry a tvoří tzv. Stokesův vektor, který obsahuje informaci o intenzitě vlny.  $\chi$  a  $\psi$  jsou ekvivalentní (sférické) úhly orientace a elipticity (popisují stav polarizace) a  $P$  je bod na povrchu koule. Vztah mezi soustavami je popsán rovnicemi 1.9 [1].

$$x = \cos(2\chi) \cos(2\psi), 0 \leq \psi < \pi, \quad (1.9)$$

$$y = \cos(2\chi) \sin(2\psi), -\pi/4 \leq \chi < \pi/4,$$

$$z = \sin(2\chi)$$

kde  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ , pro kouli s poloměrem jedna.

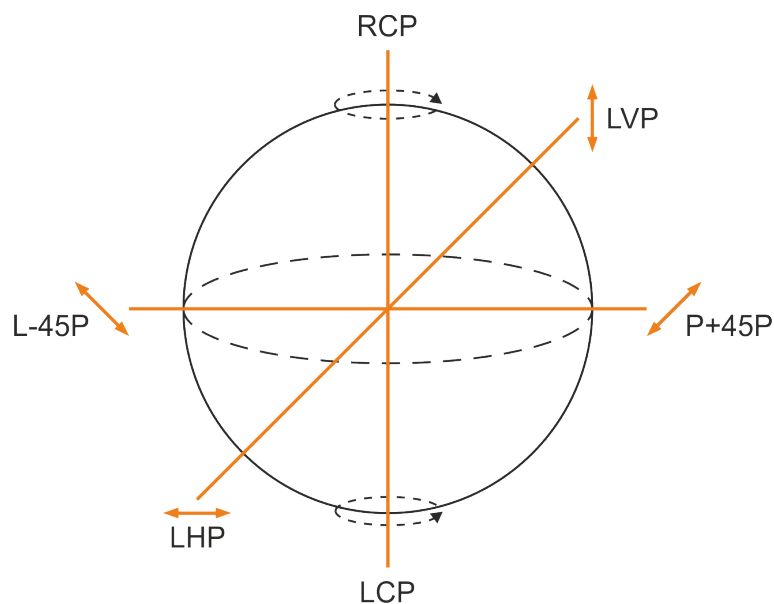


Obr. 1.8: Souřadnice Poincarého koule [1].

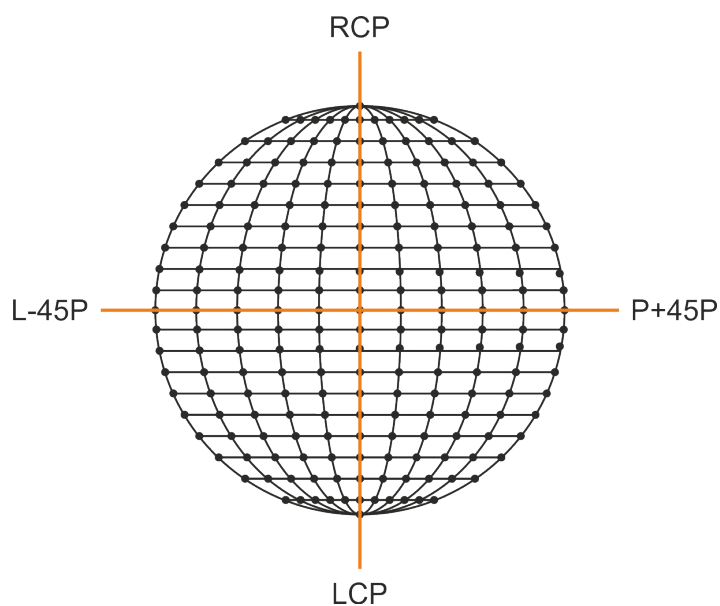
Z předchozích rovnic vyplývá, že libovolný polarizační stav může být reprezentován dvojicí souřadnic  $(\chi, \psi)$ . Stavy degenerované polarizace na Poincarého kouli jsou:

- LHP  $(0^\circ, 0^\circ)$ ,
- L+45P  $(90^\circ, 0^\circ)$ ,
- LVP  $(180^\circ, 0^\circ)$ ,
- L-45P  $(270^\circ, 0^\circ)$ ,
- RCP  $(0^\circ, 90^\circ)$ ,
- LCP  $(0^\circ, -90^\circ)$ .

Všechny stavy lineární polarizace leží na rovníku a stavy pravé a levé kruhové polarizace jsou na severním a jižním pólu. Elipticky polarizované stavy jsou zastoupeny všude na povrchu koule. Obrázek 1.10 ukazuje stavy polarizace vynesené na každém průsečíku zeměpisné šířky  $7.5^\circ$  a délky  $15^\circ$  [1].



Obr. 1.9: Degenerované stavy Poincarého koule [1].



Obr. 1.10: Příklad stavů polarizace vynesené na Poincarého kouli. [1]

## 1.6 Stokesovy polarizační parametry

Nejzávažnějším omezením Poincaré koule a polarizační elipsy je elipsa, která je okamžitou reprezentací polarizovaného světla, přičemž úhel rotace ani úhel elipticity nejsou přímo měřitelné.

K překonání těchto omezení je nutné určit měřitelné veličiny polarizovaného pole.

To lze provést pomocí časového průměru polarizační elipsy vycházející z rovnice 1.3 [1].

Časový průměr  $\langle E_i(z, t) E_j(z, t) \rangle$  je definován:

$$\langle E_i(z, t) E_j(z, t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_i(z, t) E_j(z, t) dt, \quad (1.10)$$

kde  $i, j = x, y$  a  $T$  je celkový průměrný čas. Aplikováním definice časového průměru na polarizační elipsu pak vznikne následující rovnice:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (1.11)$$

kde

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \quad (1.12)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2,$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta,$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta,$$

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

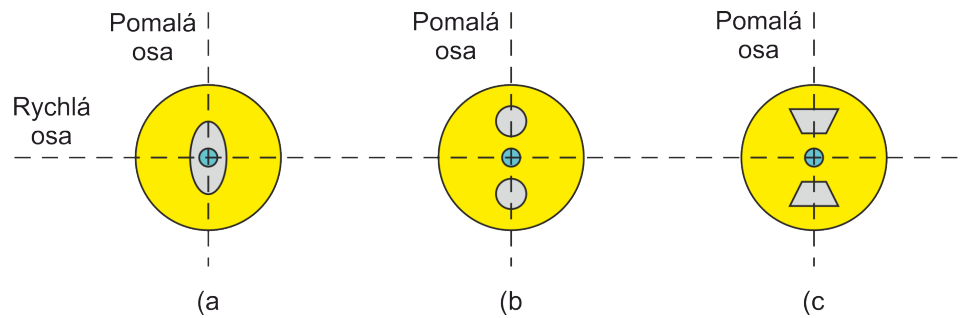
Veličiny  $S_0, S_1, S_2$  a  $S_3$  lze pozorovat v polarizovaném poli a jsou nazvány Stokesovými polarizačními složkami. Definují intenzitu a stav polarizace [1].

## 1.7 Speciální optická vlákna zachovávající polarizaci

Jená se speciální typ jednovidových vláken (PM). Tato vlákna umí zachovat polarizační stav vlny v jádře během jejího šíření, pomocí stejné rychlosti šíření optického signálu v pomalé a rychlé ose. Za určitých podmínek navázání optického vlákna do jádra nedochází k dvojlomu, a tím k předávání optického výkonu mezi pomalu a rychlou osou. Důležitým parametrem u vláken zachovávajících polarizaci je záznějová délka. Tento parametr ukazuje, jak si vlákno dokáže zachovat polarizační stav. Čím je její hodnota menší, tím lépe si vlákno zachová stejnou polarizaci. Tento parametr je nezávislý na délce optického vlákna. Tato vlákna mají při výrobě do pláště zavedeny vnitřní napěťové komponenty, díky kterým polarizace zůstává ve vlákne zachována a které také způsobují menší závislost na vnějších vlivech. Existují tři základní, nejčastěji používané, druhy:

- Eliptické,
- panda,
- motýlek.

V eliptických PM vláknech se využívá nesymetričnosti jádra. Vlákna typu Panda a Motýlek používají dva stresory. Ty jsou souběžné s pomalou osou a liší se mezi sebou tvarem, viz. 1.11



Obr. 1.11: Druhy vláken zachovávajících polarizaci: a) Eliptické b) Panda c) Motýlek.

## 2 Rozptyl záření

Šíří-li se světlo optickým vláknem, nastává při jeho šíření rozptyl světla. Tento rozptyl je několika druhů, které se liší příčinou vzniku, ale i způsobem ovlivnění světla šířícího se optickým vláknem [22].

Počátkem 70. let 20. století, brzy po rozpadu nízkoztrátového křemičitého optického vlákna, byl podrobně zkoumán efekt zpětného rozptylu [1–4]. Tento efekt byl použit k charakterizaci ztráty a nedokonalostí vlákna [5]; a byla vynalezena speciální technologie OTDR [6,7], která byla široce používána ve vláknové komunikační technologii. Vláknem v OTDR není pouze médiem pro přenos optických sond a signálů, ale také snímacím prvkem poskytujícím informace o stavu vlákna. Krátce později byly k vývoji různých distribuovaných senzorů také použity nelineární optické rozptylové efekty, včetně Ramanova rozptylu a Brillouinova rozptylu. V této kapitole jsou představeny základní fyzikální mechanismy.

### 2.1 Pružný versus nepružný rozptyl

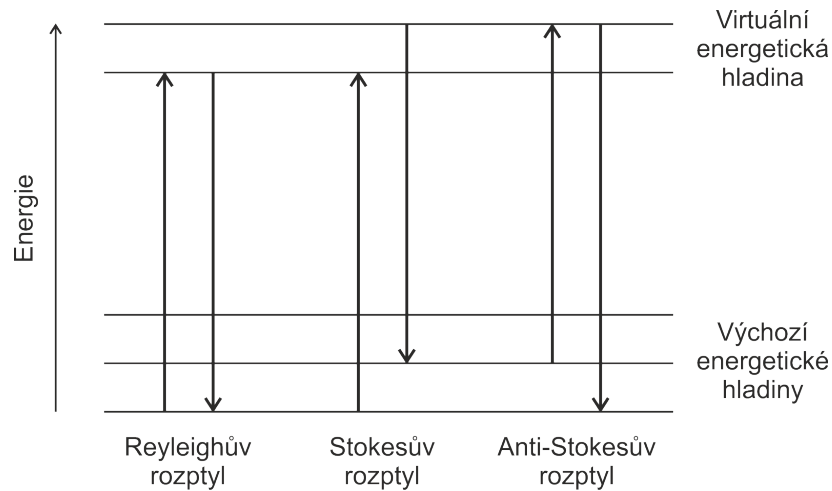
Vzhledem k duální povaze světla, kde v některých případech mohou být světelné fotony považovány za částice a v jiných za vlny záření, je snazší uvažovat o přicházejícím světle jako o částicích, když hovoříme o některých fyzikálních procesech rozptylu. V tomto případě se světelné částice – nebo fotony – srazí buď s výše popsányi nehomogenitami média, nebo s molekulární mřížkou média. Proces Rayleighova rozptylu se považuje za pružný, protože příchozí foton je odražen zpět v jiném směru bez přenosu energie, a tím se zachová jeho původní vlnová délka [6].

Když předmětné fotony interagují s molekulami v médiu takovým způsobem, že se energie při srážce buď získá, nebo ztratí, tak se vlnová délka rozptýlených fotonů posune. O takových procesech rozptylu se říká, že jsou nepružné. Ramanův a Brillouinův rozptyl jsou oba nepružné procesy, zahrnující tři vlnové interakce předmětné vlny, rozptýlenou vlnu a tepelně excitované molekulární vibrace uvnitř materiálu (sklo) [6].

### 2.2 Stokesovy a anti-Stokesovy složky rozptylu

Protože fotony v procesu neelastické srážky mohou získat a ztratit energii, budou mít rozptýlené fotony různé vlnové délky a v závislosti na tom, zda jsou posunuty nahoru nebo dolů, jsou pak známé jako Stokesovy, respektive anti-Stokesovy složky. Ztráta energie odpovídá rozptylu Stokesova typu, kde je rozptýlený foton frekvenčně posunut dolů (delší vlnová délka). Naopak získání energie ze srážky má u

rozptýleného fotonu za následek frekvenční posun nahoru (kratší vlnová délka), tedy anti-Stokesovu složku [6].



Obr. 2.1: Schematické znázornění energie rozptýlených fotonů.

## 2.3 Rayleighův rozptyl

Vzniká v důsledku nepravidelnosti struktury materiálu optického vlákna, mikroskopických změn hustoty materiálu a změn indexu lomu. Fotony procházející daným optickým prostředím částečně excitují elektrony v elektronových obalech atomů daného materiálu. Po následné spontánní emisi fotonů elektronem vznikají rozptýlené fotony, které mají stejnou frekvenci, jakou mají původní fotony přicházející do daného materiálu [23].

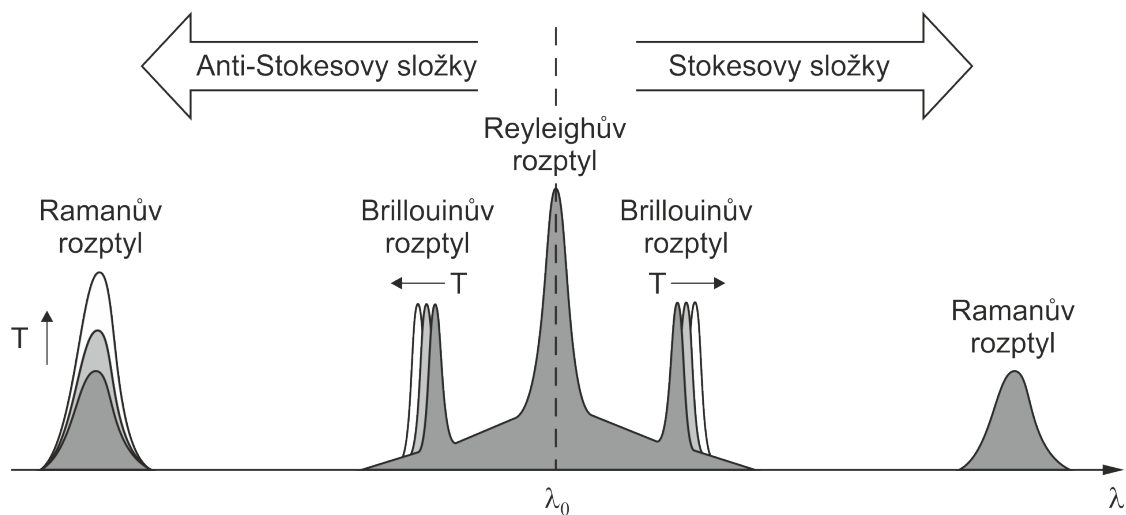
## 2.4 Ramanův rozptyl

Ramanův rozptyl v optických vláknech byl využit k vývoji distribuovaných senzorů, zejména pro snímání teploty. V literatuře se obvykle nazývá Ramanův distribuovaný teplotní senzor (RDTS) nebo distribuovaná anti-Stokesova Ramanova termometrie (DART). V této části jsou uvedeny základní charakteristiky Ramanova rozptylu v optických vláknech a jsou představeny konfigurace teplotních senzorů založených na Ramanově rozptylu [23].



## 2.5 Brillouinův rozptyl

Brillouinův rozptyl je způsoben interakcí mezi fotony a akustickými fonony a je citlivý jak na teplotu, tak na napětí. Senzory založené na Brillouinově rozptylu přilákaly široký zájem a jsou trendovým předmětem ve výzkumu a vývoji [23].



Obr. 2.2: Spektra rozptylu pro Rayleighův, Ramanův a Brillouinův rozptyl [6].

## 3 Optoelektronické multiplexní systémy

Multiplexování signálů na vedení umožňuje přenos většího počtu komunikačních kanálů. Tato technika slouží ke zvýšení efektivity využití přenosového média. Umožňuje rozšíření kapacity přenosového média nebo jeho využití pro obousměrnou komunikaci. Mezi způsoby vícenásobného přenosu patří [2]:

- **Frekvenční multiplex.** Vytvářejí se tzv. skupiny signálů přenášených ve vyšších kmitočtových pásmech. Tyto skupiny se moduluji na optický signál. Možnosti tohoto vícenásobného přenosu jsou omezeny, protože multiplexní systém zůstává v oblasti elektronických obvodů.
- **Časový multiplex.** Danému signálu je přidělen časový interval, ve kterém je připojen na vysílací straně vysílač a přijímací straně přijímač signálu.
- **Elektronický multiplex.** Po jednom vlákne se přenáší vícestavový signál, což má za následek, že přenosová rychlost se  $n$ -násobně zvýší. Prostorový multiplex využívá pro přenos různých signálů více optických vláken.
- **Vlnový multiplex.** Představuje přenos více optických signálů v jednom optickém vlákne s použitím různých vlnových délek, které jsou modulovány příslušnými informačními zdroji (využívají se "okna" v oblasti minimálního útlumu vláken).
- **Hybridní multiplex.** Představuje sloučení vlnového a elektronického multiplexu. Umožňuje maximální využití přenosové kapacity vlákna.

Pro využití přenosové kapacity optického vlákna je nejvýhodnější vlnový multiplex.

### 3.1 Technologie WWDM

WWDM, tzv. široký multiplex, obvykle používá vlnové délky 850 nm (vícevidová optická vlákna) nebo v oblasti 1300 nm a 1310 nm (vícevidová nebo jednovidová vlákna). Volba vlnových délek závisí na konkrétních podmínkách a mají odstup minimálně 25 nm.

Je ideálním řešením pro účinné slučování komunikačních kanálů. Neznemožňuje použití optických zesilovačů ani použití stávajících aktivních nebo pasivních prvků. Tato technologie je často používána u tras poslední míle, kde dokáže efektivně a levně zvojnásobit přenosovou kapacitu stávajících vláken [2].

## 3.2 Technologie DWDM

DWDM, tzv. hustý multiplex, používá minimální odstupy mezi jednotlivými kanály. Rozestupy mezi kanály mohou být 0,1 nm až 0,8 nm. Tento druh se používá na dlouhé vzdálenosti, protože signál se všemi kanály lze obnovovat a zesilovat. Využívá se jednovidových laserů a úzkopásmových interferenčních filtrů. Dále je nezbytné zajistit dostatečnou kmitočtovou stabilitu a extrémě úzkou spektrální čáru. Rozčlenění kanálu se musí provádět na mezifrekvenci pomocí elektrických filtrů, tzn. v přijímači musí být směšovač a místní oscilátor ve formě kmitočtově stabilizovaného vysoce koherentního zdroje světla.

Při návrhu přenosové soustavy je nutné počítat s tím, že dosah jednotlivých kanálů bude různý, protože útlum optického vlákna, svárů a konektorů pro různé vlnové délky je odlišný. Je nezbytné počítat s nejhorsími přenosovými vlastnostmi vybraných kanálů v multiplexu a případně je nepoužívat [2].

## 3.3 Technologie CWDM

CWDM, tzv. řídký multiplex, vznikl jako levnější varianta DWDM. Jedná se o formu vlnového multiplexu využívající větší odstup mezi jednotlivými přenosovými kanály než je tomu v případě DWDM. Používají se rozteče o šířce 20 nm a pro přenos se využívá pásmo 1271 nm – 1611 nm. Nejčastěji se využívá 8 kanálů v rozmezí 1470 nm – 1610 nm. Z pohledu ceny se jedná o nejdostupnější variantu z vlnových multiplexů [2].

## 4 Optické vláknové senzory

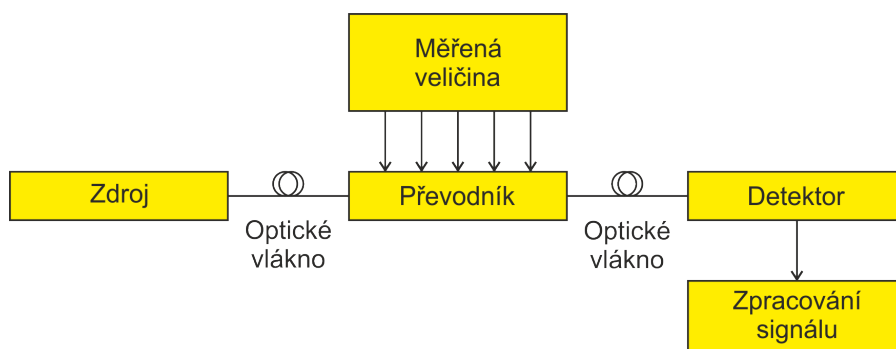
V této kapitole se seznámíme s některými typy optických senzorů, případně s jejich principem činnosti a aplikací.

Obecný senzor je definován jako zařízení, které snímá nebo reaguje na jakýkoli fyzikální, chemický nebo biologický stav. Optické senzory jsou zařízení, která převádí světelné paprsky na elektronické signály. Tyto signály mohou být měřeny přístrojem nebo zaznamenávány uživatelem (pozorovatelem). Pasivní povaha (velká šířka pásma, nízká hmotnost a odolnost) vůči elektromagnetické interferenci, vysoká přenosová rychlost a citlivost patří mezi jejich základní kladné vlastnosti. Vývoj technologie optických senzorů se vyvíjí přes 70 let a stále prochází inovacemi. Návrhy snímání jsou založeny na různých optických jevech sledující širokou škálu fyzikálních a chemických parametrů. Nejprve se jednobodové optické senzory používaly jako alarm k indikaci přítomnosti předmětu. S vývojem technologie a rozvojem funkcionality bylo možno určit polohu objektu [20, 5].

### 4.1 Základní vlastnosti optických vláknových senzorů

Senzory, založené na optickém principu, měří fyzikální veličinu v závislosti modulace na intenzitě, spektru, fázi nebo polarizaci světla procházejícího systémem optických vláken. Většina senzorů funguje na základě detekce změn intenzity světla, která se mění úměrně snímanému parametru jako je teplota, napětí nebo poloha. Princip snímání je možné rozšířit o sledování magnetického pole na základě konceptů polarizace.

Obecná struktura optického vláknového sensorového systému je znázorněna na obrázku 4.1. Je složena z optického zdroje, optického vlákna, snímače nebo modulatoru (převádí měřenou veličinu na optický signál), optický detektor, popř. elektronika ke zpracování přijatého signálu (osciloskop, spektrální analyzátor apod.) [5].



Obr. 4.1: Obecná struktura sensorového systému.

## 4.2 Rozdělení optických vláknových senzorů

Základní rozdělení optických vláknových senzorů je podle jejich konstrukce a principů činnosti [20]:

- *Vnitřní*: Sensory zabudovány do systému optických vláken nebo jsou jeho součástí. To má za následek drobné úpravy optického vlákna. Snímačem je samotné vlákno, protože vlákno je přímo ovlivněno měřenou veličinou. Měřené veličina ovlivňuje přenášené světlo v samotném vláknu. Světelný paprsek neopouští optické vlákno, ale mění se v jeho vnitřním prostředí.
- *Vnější*: U tohoto typu jsou senzory umístěny mimo systém optických vláken. Vlákno tedy pouze k registraci a přenosu snímané hodnoty do/z snímacího prvku. Zde vlákno přenáší světlo ze zdroje na konec detektoru, ale modulace probíhá mimo optické vlákno.
- *Hybridní*: Jedná se o kombinaci vnitřního a vnějšího typu optických senzorů. Zde vlákno přenáší světlo dovnitř i ven ze zařízení.

## 4.3 Optické vláknové senzory a jejich kategorie

Senzory z optických vláken lze rozdělit do pěti základních kategorií: senzory s modulací podle fáze, senzory s modulací podle intenzity, senzory s modulací podle vlnové délky, senzory na základě rozptylu a senzory na základě polarizace.

Senzory s modulací podle intenzity obecně souvisí s výtlakem nebo jinou fyzikální změnou odchytkou, která působí na vlákno nebo na mechanický převodník k vláknu připojený. Tato odchytka způsobuje změnu intenzity přijímaného světla, která je funkcí měřeného jevu.

Senzory s modulací podle fáze porovnávají fázi světla ve snímacím vláknu s referenčním vláknem v zařízení známém jako interferometr. Fázový rozdíl lze změřit s extrémní citlivostí. Sensory s modulací podle fáze jsou mnohem přesnější než senzory s modulací podle intenzity a lze je použít při mnohem větším dynamickém rozsahu. Nicméně, často bývají o mnoho dražší. Interferometry našly uplatnění zejména ve vojenských systémech, kde cena nebývá nutně hlavním faktorem. Na druhou stranu, senzory s modulací podle intenzity se dobře hodí k širokému průmyslovému použití.

Ve třetí kategorii, senzory s modulací podle vlnové délky zaznamenávají změnu vlnové délky související s výtlakem, teplotou, či přítomností chemických látek, které způsobují fluorescenci.

Senzory na základě rozptylu jsou spojeny se třemi typy rozptylu světla: Rayleighovým, Ramanovým a Brillouinovým. Odchytky ve vláknech jsou detekovány změn-

nami v rozptylu světla, které je zpětně odraženo do detektoru, který je začleněn do optického časového reflektometru. Odchylna v rozptýleném světle může způsobit změny intenzity či posuny vlnové délky, zapříčiněné snímaným parametrem, typicky je to teplota nebo zatížení.

Senzory na základě polarizace jsou založeny na jevech, jako je Faradayova rotace nebo dvojlom, jež mohou pozměnit polarizační stav, a tedy pozměnit intenzitu přenášeného světla [6].

### **4.3.1 Senzory s modulací podle intenzity**

Senzory s modulací podle intenzity jsou definovány jako senzory, které zaznamenávají změnu intenzity světla spojenou s rušivým prostředím. Obecné pojmy spojené s modulací podle intenzity zahrnují přenos, odraz a mikroohyb. Nicméně je zde několik dalších mechanismů, které lze použít nezávisle (vnitřně), nebo ve spojení se třemi výše uvedenými základními pojmy. Sem patří pohlcování, rozptyl, fluorescence, polarizace, a optické mřížky. Zatímco senzory s modulací podle intenzity jsou ze své podstaty analogové, mají významné využití v digitální (on/off) aplikaci u spínačů a čítačů [6].

### **4.3.2 Senzory s modulací podle fáze**

Kvůli své extrémní citlivosti jsou senzory s modulací podle fáze nejvíce popisované ze všech senzorů z optických vláken. Senzory z optických vláken s modulací podle fáze obvykle představují použití optických interferometrů k měření změny fáze jediného světelného signálu nebo, častěji, k měření relativní změny fáze mezi dvěma světelnými vlnami.

Obecně senzory s modulací podle fáze využívají zdroj souvislého laserového světla a dvě samostatné optické cesty nebo ramena. Světlo je rozděleno a je jím ozařováno každé rameno. Pokud prostředí narušuje jedno rameno poměrně vůči druhému, dochází k fázovému posunu, který lze přesně zaznamenat [6].

### **4.3.3 Senzory s modulací podle vlnové délky**

Senzory s modulací podle vlnové délky využívají ke snímání změny vlnové délky. Fluorescence a fosforescence, pokud jsou správně narušeny, vyzařují charakteristickou vlnovou délku světla. Například barvivo může v přítomnosti analytu vylučovat charakteristické excitační spektrum. Vyzařující spektrum poskytuje kvalitativní snímací funkci, ale pro kvalitativní snímací měření je potřeba intenzita spektra (obvykle poměrová) [6].

### 4.3.4 Senzory na základě rozptylu

Když monochromatická světelná vlna prochází skrze transparentní médium, jako je sklo, většina energie se šíří kupředu a přitom zaznamenává ztrátu z atenuace média. Nicméně malá část světla podléhá rozptylu, což je rozšíření světelného paprsku na množství dalších paprsků vyzařovaných různými směry, jakožto výsledek vzájemného působení mezi fotony světla a hmotou prostupného média.

Existuje několik mechanismů rozptylu ve skle. Jsou známé jako Rayleighův, Mieův, Ramanův a Brillouinův rozptyl. K Rayleighovu rozptylu dochází, když se fotony střetávají s nehomogenitami v prováděcím médiu. Takové nehomogenity mohou zahrnovat dutiny, změny hustoty, nečistoty, výkyv ve složení, strukturální odchylky, a další mikro a nanoskopické odchylky od standardu okolního média. Ramanův rozptyl nastává, když putující fotony interagují s tepelně excitovanými molekulárními vibracemi. Brillouinův rozptyl nastane, když putující fotony interagují s hromadnými molekulárními vibracemi [6].

### 4.3.5 Polarizační optické vláknové senzory

Senzory z optických vláken založené na polarizaci obvykle zahrnují vnější dvojlozmnou součást, která provede vlastní modulaci polarizace. Mezi vnitřní typy senzorů patří Faradayova rotace a některé Braggovy mřížky, které jsou zapsány v polarizačně závislých typech (PM) vláken. Další komponenty, požadované pro systémy s polarizátory a analyzátory, mohou být implementovány i do vlákna. Citlivost optických komponent na polarizaci je známá a zkoumá se už dlouhou dobu. Většina studovaných účinků se projevuje jako operace na lineární soustavě souřadnic.

Citlivost optických komponent na polarizaci je známa a studována již velmi dlouho. Většina studovaných efektů se projevuje jako operace na lineárních souřadnicových systémech. Opět se jedná o systémy, které mají lineární vlastní vektory. Na obr. 7.1 je podrobně znázorněn obecný komponent v lineárním pravotočivém souřadnicovém systému. Úhel světelného vektoru  $u$  je definován jako kladný při měření od vertikální souřadnice  $y$ , jak je pozorováno při pohledu do světelného zdroje.

Bylo vyrobeno několik komerčních snímacích systémů, které využívají techniky polarizační modulace pro provádění měření fyzikálních jevů. Obrázky 7.9 a 7.10 ukazují tuto technologii v praxi. Prvním systémem je snímač napětí z optických vláken, který využívá elektrooptický (E-O) krystal. Elektrické pole aplikované na E-O krystal ve správné orientaci bude modulovat dvojlom krystalu. Tento E-field senzor lze snadno nakonfigurovat pro měření napětí [6].

## 5 Teplotní optické vláknové senzory

Jeden z nejčastěji měřených parametrů je teplota. Teplotní změny mohou často být indikátorem reálných změn u dalších parametrů, které nás zajímají. Navíc, jelikož teplota může narušovat měření jiných fyzikálních proměnných, je nezbytné změřit teplotu, aby se korigovaly všechny teplotní vlivy, jež by mohly vést k chybám měření jiných veličin, jako je zatížení, tlak, výtlak, atd. Kromě toho mluví ve prospěch využití optických teplotních snímačů místo těch konvenčních (jako jsou termistory, termočlánky, odporové teplotní detektory (RTD), a podobné) i další faktory [6].

### 5.1 Základní vlastnosti teplotních optických vláknových senzorů

Často je třeba, aby byly termometry provozovány v přítomnosti silných elektromagnetických polí, při kontaktu s pacienty, nebo k použití na velké vzdálenosti. Senzory s kovovými vodiči budou v takových prostředích zaznamenávat vířivé proudy, které způsobí šum a možné zahřívání senzoru, což zase způsobuje nepřesnost v měření teploty. Při lékařském použití je nezbytně nutné dosáhnout elektrického odizolování a schopnosti spolupracovat se zařízeními na bázi magnetické resonance (MRI) a počítačové tomografie (CT). Teplotní senzory z optických vláken, které pro funkci nepoužívají kovové převodníky, disponují minimální tepelnou ztrátou při vedení a poskytují rychlou odezvu. Jelikož jsou méně náchylné vůči prostředí, mají potenciál být extrémně přesné [6].

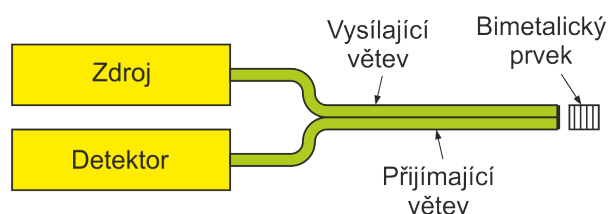
Bylo využito několik konceptů optických snímačů jak k vývoji termometrů, tak k vlastnímu měření teploty na základě odrazu, mikroohybu, fluorescence, pohlcování a černého tělesa, a také na základě modulace podle intenzity, fáze nebo vlnové délky. Kromě toho, jedinečná schopnost optického vlákna snímat teplotu umožňuje provádět měření teploty skutečně rovnoměrně rozložené po celé své délce díky použití Ramanova a Brillouinova rozptylu. V následujících podkapitolách je uveden přehled nejběžnějších metod optického snímání teploty.



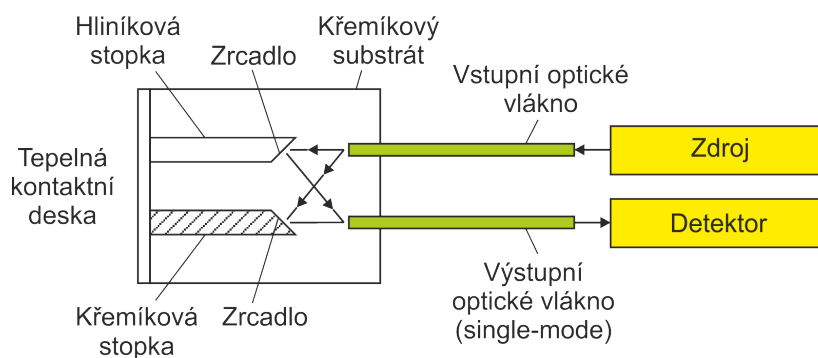
## 5.2 Teplotní vláknové senzory a jejich rozdělení

### 5.2.1 Senzory odrazivosti a pohlcování

Senzory odrazivosti mohou velmi přesně určit polohu. Tato vlastnost může být využita také pro měření teploty. Obrázek 5.1 znázorňuje bimetalový plíšek připojený jako převodník k rozdvojené, reflexní sondě optického vlákna. Bimetalový plíšek je vyroben tak, aby spínal při určité prahové teplotě, kdy se pohne směrem ke špičce sondy a tím se při dané teplotě přepne. Obrázek 5.2 znázorňuje jiný přístup, využívající rozdílnou teplotní roztažnost. Dva terče, které mají podstatně odlišnou tepelnou roztažnost materiálu, odrážejí světlo do výstupního optického vlákna. Jak se tyto terče teplotou vůči sobě navzájem pohybují, vznikají interferenční okraje, a ty jsou sčítány.



Obr. 5.1: Reflexní optický snímač teploty využívající bimetalový převodník.



Obr. 5.2: Reflexní optický snímač teploty využívající diferenciální teplotní roztažnost.

Pro snímání teploty lze použít širokou škálu materiálů, včetně tekutých krystalů, dvojlomných materiálů, polovodičů, fluorescenčních a termochromických látek, které mohou teplotou měnit spektrum [6].

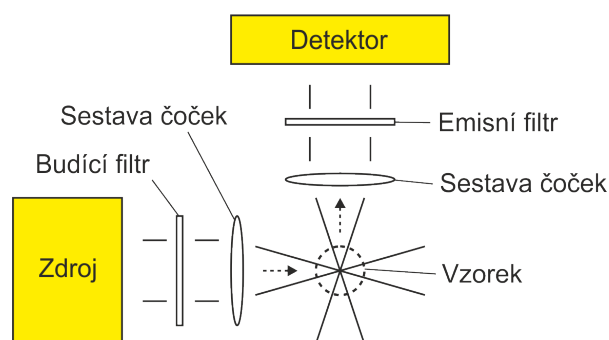
## 5.2.2 Fluorescenční senzory

Koncept odrazivosti může být rozšířen tak, aby zahrnovala fluorescenční terče. V takovém uspořádání terč neodráží příchozí světelný signál, ale spíše absorbuje dopadající UV excitační puls, který vytváří fluorescenční odezvu v citlivé sloučenině, která emituje viditelné záření. Senzor používá jediné vlákno, vyrobené z čistého křemene, aby maximalizoval přenos dopadajícího UV světla.

Jiným přístupem jsou měřeny relativní intenzity dvou prudkých fluorescenčních emisních čar, které se uvolní při reakci fosforu na UV záření. Tyto čáry se mění v závislosti na teplotě. Ve výsledku měříme teplotu jako poměr jejich intenzity.

Fluorescenční teplotní senzory jsou zvláště užitečné pro povrchové měření teploty. Mají velkou výhodu v tom, že mají nízkou tepelnou kapacitu a rychlou odezvu [6].

Až donedávna se ponorný fluorometr skládal z 5 hlavních optických součástí: světelný zdroj, systém čoček pro přenos vybuzeného světla do objemu vzorku, systém druhé čočky pro sběr emitované fluorescence, jeden nebo více optických filtrů pro oddělení vybuzené a emisní vlnové délky a fotodetektor. Toto uspořádání je schematicky znázorněno na obrázku 5.3 [19].

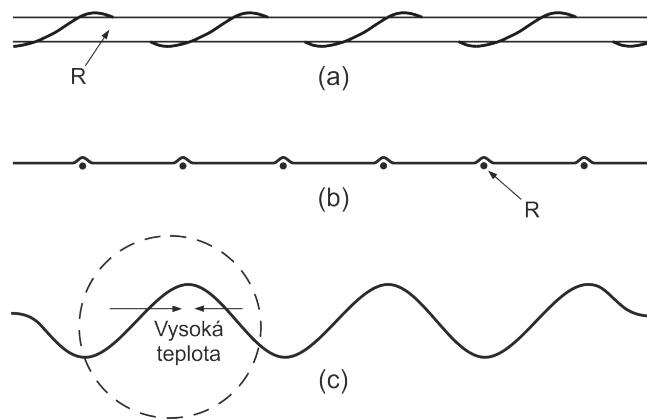


Obr. 5.3: Schematický diagram tradičního ponorného fluorometru.

## 5.2.3 Senzory mikroohybu

Mikroohyb může být použit pro sledování teploty dvěma různými způsoby. Senzor může pracovat se změnou v rozdílu indexu lomu nebo se změnou poloměru ohybu při teplotách. Ztráta mikroohybu je funkcí rozdílu mezi indexem lomu jádra a indexem lomu pláště. Pro daný stupeň ohybu, jak se tento rozdíl zmenšuje, vlákno se stává ztrátovějším a při ohýbání vlákna uniká více světla. Vliv teploty je zřetelný na polymerem obalených skleněných vláknech, kde teplotní závislost indexu lomu pro polymerový obal je výrazně větší než pro skleněné jádro.

Změna v poloměru ohybu při teplotách může být snadno měřitelná pomocí ohýbacího mechanismu s vysokou tepelnou roztažností. [6].



Obr. 5.4: Několik konfigurací pro monitor teploty ohybu. (a) Kontinuální monitor, (b) bodový monitor, (c) monitor s proměnným poloměrem.

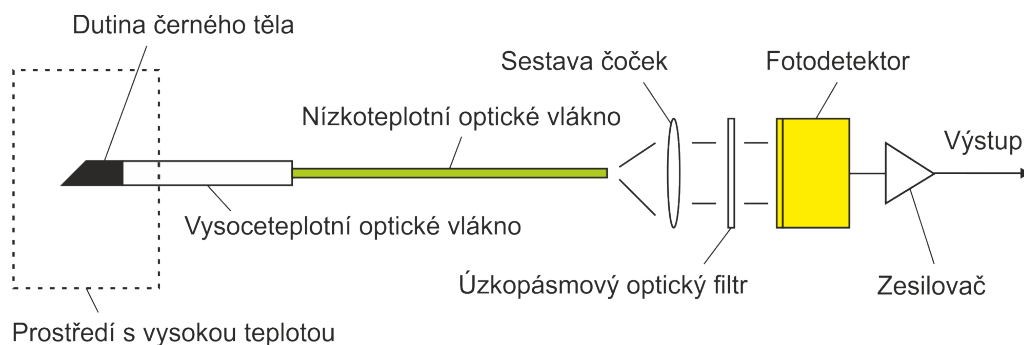
#### 5.2.4 Dotovaná vlákna

Intrinsický senzor je definován jako takový, ve kterém probíhá snímací funkce přímo v samotném vláknu (jádro, plášť nebo vrchní vrstva), a intenzita světla přenášeného ve vláknu je úměrná rušivému prostředí. Intrinsický snímač teploty obsahuje jev pohlcování. Bylo zjištěno, že když jsou do běžného skla přidány vzácné prvky, jako je neodym (Nd), erbium (Er) a europium (Eu), vede to ke vzniku pohlcovacího spektra s citlivostí na teplotu.

Další výzkum vláken dotovaných vzácnými prvky ukázal, že v doba fluorescence je citlivá na teplotu, a tudíž mají potenciál být teplotním senzorem s širokým pracovním rozsahem. Fluorescenčního spektra je dosaženo ozařováním vlákna se vzácnými prvky laserovou diodou. Doba fluorescence je dostatečně krátká (10 ms nebo méně), takže lze použít pro měření teploty v reálném čase [6].

#### 5.2.5 Černé těleso

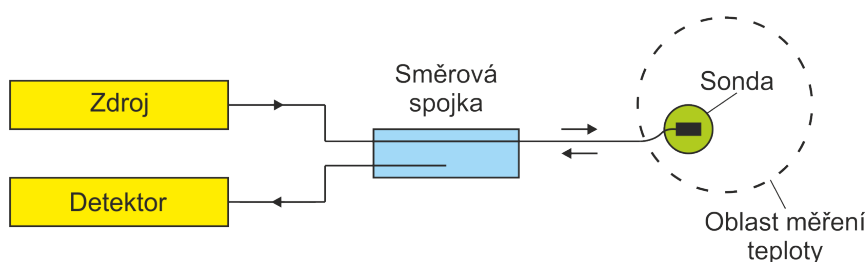
Teplotní senzory na základě černého tělesa fungují na skutečnosti, že zahříváný materiál emituje infračervené záření. Intenzita a vlnová délka záření je funkcí teploty a běžně se označuje jako záření černého tělesa. Vlnová délka záření je také funkcí teploty [6].



Obr. 5.5: Konfigurace senzoru teploty na základě černého tělesa [18].

### 5.2.6 Interferometrické senzory

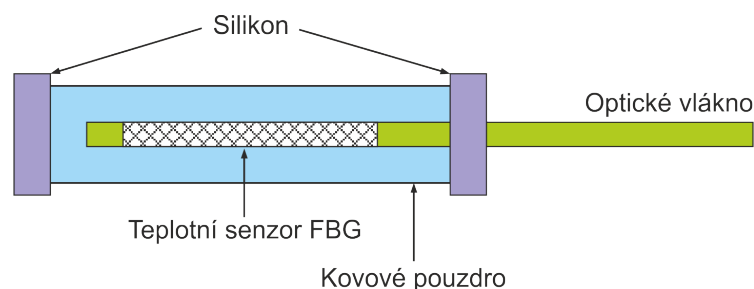
Interferometrické senzory jsou citlivé na změny délky i indexu lomu. Jejich provoz závisí na změně ve fázi vstupního světelného signálu jakožto funkce teploty. Samotný fázový posun teploty závisí jak na změnách indexu lomu vlákna, tak na změně jeho délky v důsledku tepelné roztažnosti. Oba účinky probíhají současně a dohromady způsobují čistou změnu délky optické dráhy světla putujícího vláknem. Na obrázku 5.6. je znázorněna funkce jednovláknového interferometrického senzoru [6].



Obr. 5.6: Snímač teploty s jedním vláknem. Fabry-Pérotův dutinový interferometr.

### 5.2.7 Senzory s Braggovou mřížkou (FBG)

Optická vlákna s FBG se také využívají jako účinné teploměry a zařízení snímající teplotu. Základním principem je, že Braggův vrchol vlnové délky se posouvá k delším vlnovým délkám při zvyšující se teplotě, a ke kratším vlnovým délkám při klesající teplotě. Koncepce senzoru s Braggovou mřížkou se vyznačuje rychlou odezvou na změny teplot [6].



Obr. 5.7: Schéma teplotního senzoru FBG.

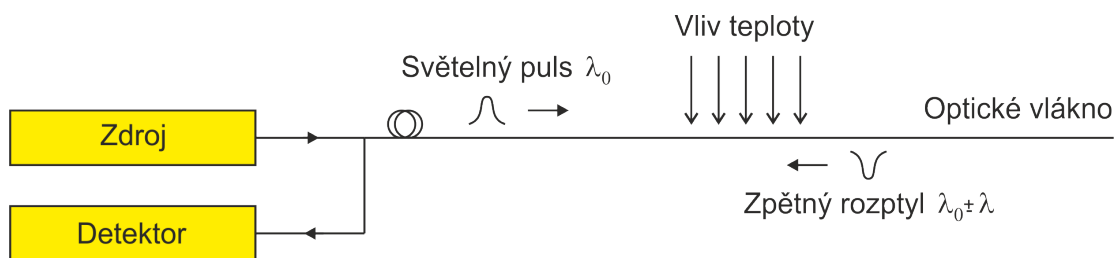
## 5.2.8 Distribuované snímání teploty (DTS)

DTS jsou distribuované optovláknové systémy, které s pomocí optického vlákna dokáží měřit teplotu nebo mechanické napětí. Optické vlákno, které využívá DTS systém si lze představit jako několik tisíc senzorů poskytujících po zpracování, informaci o teplotním (tlakovém) profilu podél vlákna. DTS systém využívá veškerých předností, které nám optické vlákno nabízí.

Na začátku 80. let byl Ramanův rozptyl poprvé navržen pro použití při snímání teploty, když se ukázalo, že magnituda anti-Stokesovy komponenty Ramanova rozptylu je vysoce citlivá na teplotu, zatímco Stokesova komponenta není. Metoda DTS Ramanovým rozptylem je založena na měření poměru zpětného vlnového odrazu anti-Stokes ku Stokes komponentám jakožto funkce času (vzdálenosti). To poskytuje distribuovaný teplotní profil podél vlákna, jak je znázorněno na obrázku 5.8.

Základní uspořádání Ramanova DTS obsahuje pulzní laserový zdroj, který ozařuje vlákno intenzivním světelným pulzem, což působí jako snímací prvek. Ramanovo zpětně odražené světlo putuje zpět do vstupu vlákna, kde je vyvedeno přes rozbočovač do dvojice fotodetektorů vybavených tenkými optickými filtry, které vytrídí konkrétní vlnové vrcholy Stokesových a anti-Stokesových spektrálních komponent. Fotodetektory převádějí optickou intenzitu na elektrické signály a tím se získá poměr intenzity anti-Stokes ku Stokes. Poměr intenzity anti-Stokes ku Stokes je převeden na jednotky teploty za použití kalibračního faktoru, který bere v úvahu vlastnosti vlákna a konkrétní nastavení [6].

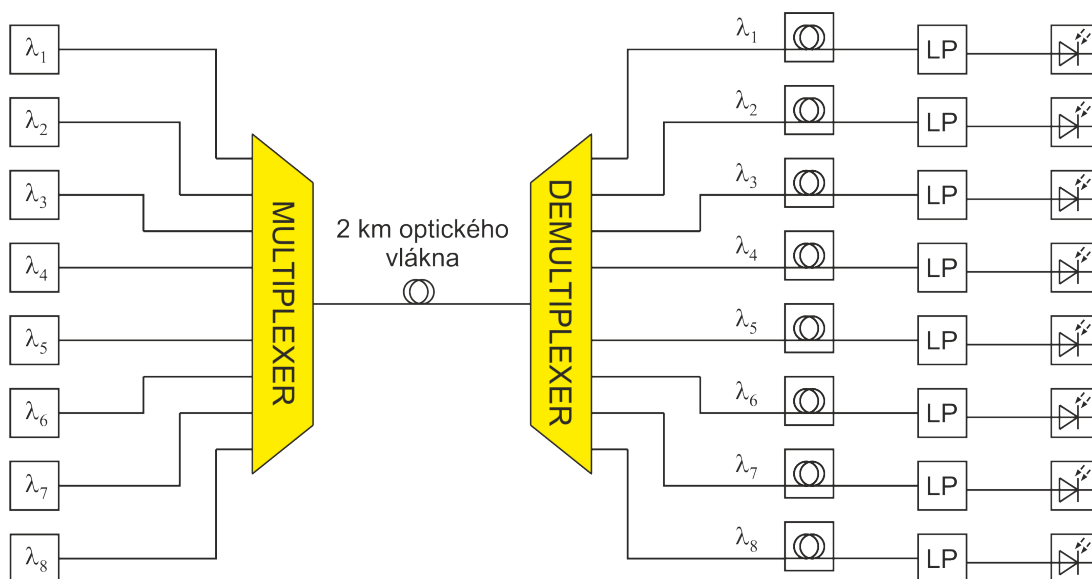
Tento systém umožňuje délku trasy optického vlákna až do 10 km v případě DTS používající Ramanův rozptyl a 30 km pro DTS založených na Brillouinově rozptyle. Může také sloužit k monitorování přenosových tras z hlediska teplotní stabilizace (snížení bitové chybovosti) [15].



Obr. 5.8: Princip fungování distribuovaného snímání teploty Ramanovým rozptylem.

## 6 Návrh vlastního řešení

Cílem práce je návrh přenosové soustavy pro sběr dat zaměřenou na odezvu opto-vláknového sensorického systému 6.1. Jak je uvedeno v kapitole 3.2, je při použití technologie DWDM nutné počítat s možnými odlišnými vlastnostmi, popř. chováním, zvolených kanálů. Přenosové kanály budeme volit z Doporučení ITU-T G.694.1 [16], konkrétně z tabulky nominálních centrálních frekvencí sítě DWDM. Zjednodušená tabulka, upravená pro 100 GHz rastr je uvedena na obrázku 6.2. V tabulce jsou zeleně zvýrazněny vlnové délky, které bude přenosová soustava používat.



Obr. 6.1: Schéma zapojení navrhovaného pracoviště.

### 6.1 Měření optického výkonu

Měření optického výkonu představuje jedno ze základních měření, která jsou prováděna na optických vláknech. Ve většině případech je cílem měřit přímo optický výkon. Snímačem pro měření je obvykle fotodioda pracující na elektrickém principu, proto je potřeba instalace převodníku, který přemění optický signál na elektrický. Následně se měří elektrické napětí, proud generovaný fotodetektořem a nakonec je dokončen převod na veličinu výkonu. Optické měřicí přístroje používají převážně polovodičové detektory, protože jsou velmi citlivé na světlo v různých vlnových délkách. Citlivost detektorů závisí na materiálu, který byl použit pro jejich výrobu.

Rozestupy pro 100 GHz DWDM rastr dle doporučení ITU								
ITU Grid: C-Band, 100 GHz Spacing								
Kanál	Frekvence	Vlnová délka	Kanál	Frekvence	Vlnová délka	Kanál	Frekvence	Vlnová délka
(-)	(GHz)	(nm)	(-)	(GHz)	(nm)	(-)	(GHz)	(nm)
1	190100	1577.03	25	192500	1557.36	49	194900	1538.19
2	190200	1576.20	26	192600	1556.56	50	195000	1537.40
3	190300	1575.37	27	192700	1555.75	51	195100	1536.61
4	190400	1574.54	28	192800	1554.94	52	195200	1535.82
5	190500	1573.71	29	192900	1554.13	53	195300	1535.04
6	190600	1572.89	30	193000	1553.33	54	195400	1534.25
7	190700	1572.06	31	193100	1552.52	55	195500	1533.47
8	190800	1571.24	32	193200	1551.71	56	195600	1532.68
9	190900	1570.42	33	193300	1550.92	57	195700	1531.90
10	191000	1569.59	34	193400	1550.12	58	195800	1531.12
11	191100	1568.11	35	193500	1549.32	59	195900	1530.33
12	191200	1567.95	36	193600	1548.52	60	196000	1529.55
13	191300	1567.13	37	193700	1547.72	61	196100	1528.77
14	191400	1566.31	38	193800	1546.92	62	196200	1527.99
15	191500	1565.50	39	193900	1546.12	63	196300	1527.22
16	191600	1564.68	40	194000	1545.32	64	196400	1526.44
17	191700	1563.86	41	194100	1544.53	65	196500	1525.66
18	191800	1563.05	42	194200	1543.73	66	196600	1524.89
19	191900	1562.23	43	194300	1542.94	67	196700	1524.11
20	192000	1561.42	44	194400	1542.14	68	196800	1523.34
21	192100	1560.61	45	194500	1541.35	69	196900	1522.56
22	192200	1559.79	46	194600	1540.56	70	197000	1521.79
23	192300	1558.98	47	194700	1539.77	71	197100	1521.02
24	192400	1558.17	48	194800	1538.98	72	197200	1520.25
<b>Pozn.</b>	Pro rozestup 200 GHz použijte kanály DWDM s lichým nebo sudým číslem.							

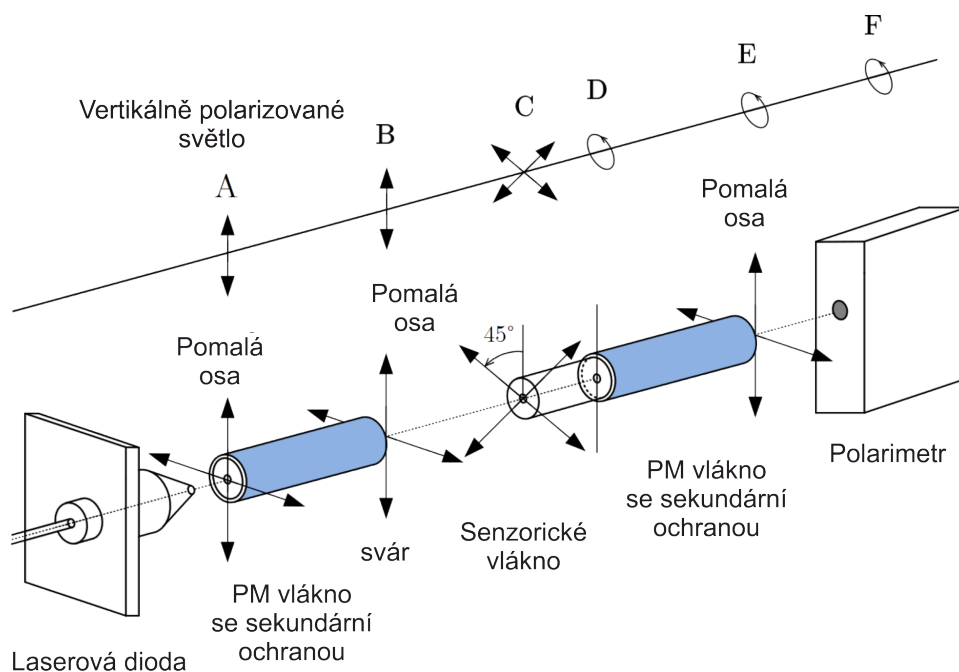
Obr. 6.2: Rozestupy pro 100 GHz DWDM rastr dle ITU [17].

## 6.2 Měření pomocí polarimetru

Schéma zapojení měření je uvedeno na obrázku 6.3. Na začátku použitého zapojení pro měření s polarimetrem je laserová dioda od firmy Thorlabs LPS-PM635, jejíž vlnová délka je 635 nm a vyzařuje vysoce polarizované světlo. Dioda je napojená na 1 m PM vlákna se sekundární ochranou. Světelný signál je zde vertikálně polarizován v rovině pomalé osy a na výstupu před svárem má stále totožný stav (bod A). Vlákno dále navazuje svárem (bod B) na velmi citlivé sensorické PM vlákno bez sekundární ochrany o délce 2 m. V místě sváru se nachází důležitá vlastnost zapojení, kdy jsou vlákna v tomto bodě vzájemně pootočena o 45° a poté svařena. Pootočení způsobuje



vybuzení pomalé i rychlé osy optického signálu (bod C). Pokud by k tomuto pootočení nedošlo, byl by na výstupu měřen pouze jeden vektor, který by byl ideálně polarizován (vertikálně nebo horizontálně) a výsledek by se neměnil. Sensorické PM vlákno je umístěno v uzavřené teplotní komoře vyrobené z polystyrenu a plastové fólie. Toto izolované prostředí umožňuje udržet v okolí vlákna stabilní pokojovou teplotu, ale teplota se může začít měnit při přiložení kádinky se studenou nebo teplou vodou nad sensorické vlákno. Takovým vlivem změny teploty dochází k rozdílům v rychlosti šíření jednotlivých os, které během změn zpomalují nebo zrychlují a světlo se poté šíří neurčitým způsobem polarizace (kruhově, elipticky, náhodně - bod D). Za sensorickým vláknem přímo navazuje vlákno se sekundární ochranou. To je vyvedeno mimo teplotní komoru (bod E). Jeho výstup je přiveden na hlavici polarimetru pomocí FC konektoru, a ta posílá údaje na vyhodnocující polarimetr a poté do připojeného PC (bod F). Pomocí PC lze pozorovat pohyb sledovaného bodu v Poincarého kouli, zjistit stav polarizace, hodnoty Stokesových vektorů a také stupeň polarizovaného světla [24].



Obr. 6.3: Měření pomocí polarimetru [24].

# 7 Komponenty a zapojení měřicího pracoviště

## 7.1 Zdroj signálu

### 7.1.1 Switch MikroTik

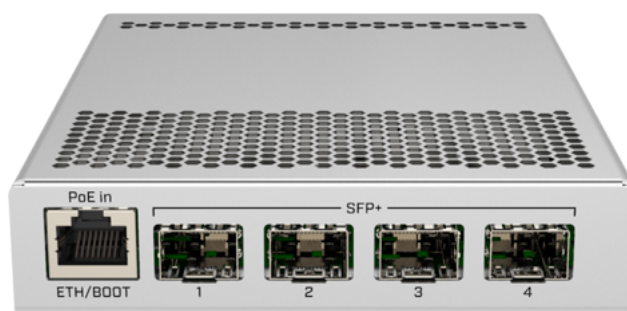
Cloud Router Switch 305-1G-4S+IN je operačním systémem SwOS či RouterOS poháněný 5-portový switch se čtyřmi SFP+ šachtami a jedním gigabitovým ethernet portem v desktop provedení. Je tak ideálním modulárním řešením pro rozvod optické trasy v rámci dané lokality.

Switch je vybaven dvěma redundantními napájecími vstupy zdroji (12 - 57V DC jack) a pasivním chladičem umožňující tichý provoz.

“Dual boot” funkce skýtá možnost volby preferovaného operačního systému - RouterOS či SwOS.

Jedná se o aktivní prvek se základními funkcemi říditelného switchu s dalšími přidanými funkcemi.

Osazené SFP+ šachty podporují 1.25 GB SFP i 10 GB SFP+ moduly. [27]



Obr. 7.1: Přehled portů switchu MikroTik 05-1G-4S+IN [27].

### 7.1.2 SFP+ moduly

Moduly je osazeny duplexním LC-UPC konektorem. V našem případě se jedná o moduly DWDM pro hustý vlnový multiplex za pomoci multiplexerů a demultiplexerů, jsou zase laděny na speciální vlnovou délku odpovídající DWDM kanálům. K vlastnímu měření jsme použili SFP moduly, které podporují délku trasy 80-120 km a přenosovou rychlost 1,25 Gbps. Další parametry a čísla kanálů jsou uvedeny ve výčtu modulů níže.

SFP+ šachty switchu MikroTik 5-1G-4S+IN jsme osadili následujícími moduly:

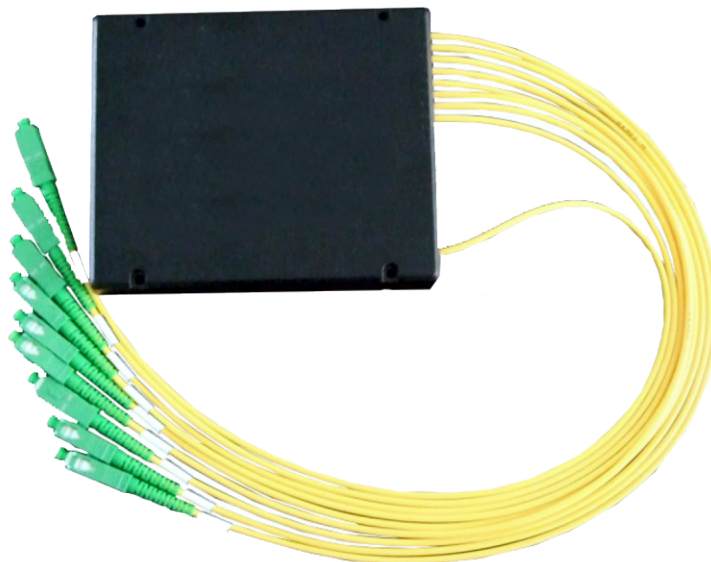
- Port 1: SFP-DWDM-120-1Gbps-CIS-34  
(120 km; 34. kanál DWDM multiplexu; vlnová délka: 1550,12 nm),
- Port 2: SFP-DWDM-120-1Gbps-CIS-33  
(120 km; 33. kanál DWDM multiplexu; vlnová délka: 1550,92 nm),
- Port 3: SFP-DWDM-120-1Gbps-CIS-28  
(80 km; 28. kanál DWDM multiplexu; vlnová délka: 1554,94 nm),
- Port 4: SFP-DWDM-120-1Gbps-CIS-27  
(80 km; 27. kanál DWDM multiplexu; vlnová délka: 1555,75 nm).

## 7.2 Optická vlákna a spoje

### 7.3 DWDM multiplexor/demultiplexor

K realizaci DWDM přenosu na optické trase jsme použili osmikanálové moduly (multiplex a demultiplex) od firmy Bank Photonics, Inc.:

- DMCES-18M-C34-310-SC/APC (multiplexor),
- DMCES-18D-C34-310-SC/APC (demultiplexor).



Obr. 7.2: Ilustrační fotografie DWDM multiplexoru/demultiplexoru.

které kombinují výstupy z více DWDM zdrojů (multiplexor) pro přenosovou cestu a rozdělí je zpět na jednotlivé signály (demultiplexor).

## 7.4 Dvouvláknový optický interferometrický senzor

Jedná se o variantu s možností vzdáleného optického buzení při libovolném stavu polarizace, vzdálené detekce a zpracování. Vlastní senzor je označen P8 (BP 7722) a je sestaven ze dvou senzorických vláken o délce 2 m svinutých do osmi smyček. Senzorická vlákna jsou vzájemně pootočena o úhel  $\pi/4$ . Senzorická vlákna jsou uzavřena v polystyrenové krabičce s otvorem  $10 \times 10$  cm pro možnost přímého přiložení teplotního zdroje.

Senzor je založen na principu PM vláken s vysokým dvojlomem (birefringence). V případě, že je signál pootočen o  $\pi/4$ , dochází k vybuzení a fázovým změnám obou jeho os. Pokud je lineárně polarizované světlo shodné s jednou os, tak lze díky vlastnostem těchto vláken dosáhnout velmi dobrého zachování jeho polarizačního stavu. Senzorická PM vlákna jsou vyráběna s citlivostí na vnější podmínky jako napětí, teplota, tlak nebo ohýbání.

## 7.5 Dělič polarizačního paprsku

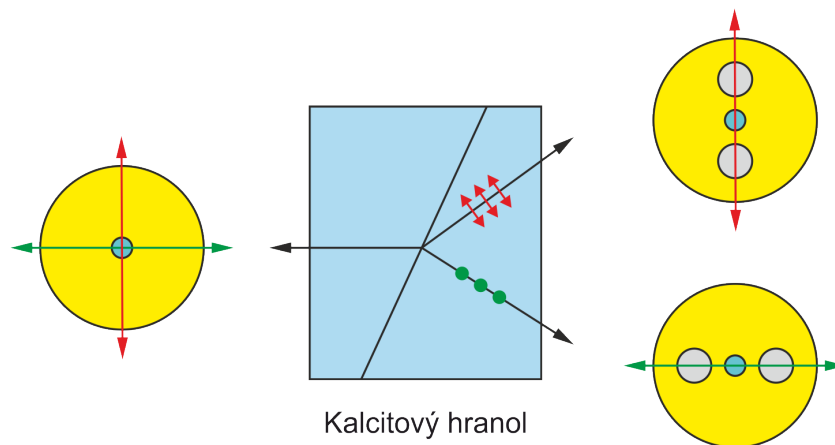
Použitý polarizační dělič/slučovač Thorlabs PBC1550SM-FC. Jednomódové slučovače nebo děliče polarizačních paprsků (PBC) Thorlabs jsou navrženy tak, aby buď kombinovaly dvě ortogonální polarizace do jediného vlákna, nebo rozdělily jeden vstup na jeho ortogonální lineární polarizace prostřednictvím dvou výstupních vláken. Na jedné straně kalcitového hranolu (islandský vápenec) jsou vlákna zachováající polarizaci (PM) a na druhé straně jednovidové vlákno (SM). Na straně se dvěma PM vlákny dělič odděluje paprsky na lineární polarizace ve směru pomalé a rychlé osy 7.5. V našem případě, u zařízení P8 (BP 7722), je vstup č. 1 polarizovaný v rovině pomalé osy a vstup č. 2 v rovině rychlé osy. Tento systém může být zapojen též v reverzní funkci. [26].

Tyto slučovače polarizačního paprsku se často používají ke spojení světla ze dvou laserů do jediného vlákna, ke zvýšení vstupu do erbiem dopovaného vláknového zesilovače nebo Ramanova zesilovače. Obsažený hranol bývá obvykle vytvořen pomocí dvou slepených trojbokých jehlanů, přičemž pro osy polarizace platí, že jsou navzájem pootočeny o  $90^\circ$  [4].

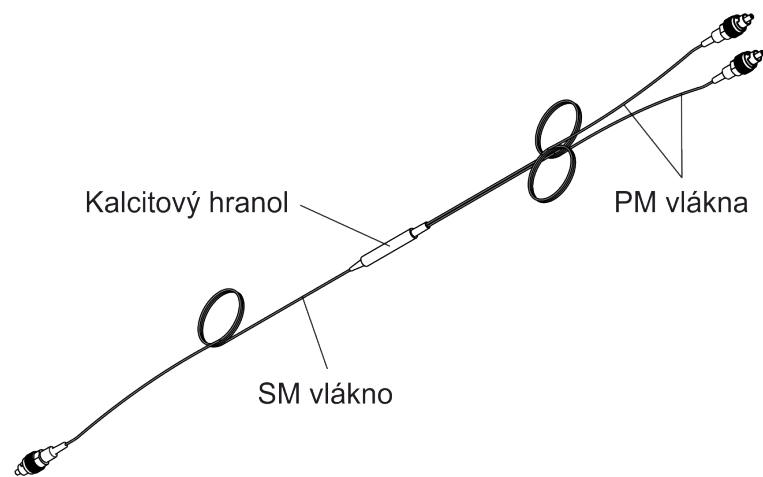
Polarizační dělič lze popsat pomocí kartézské souřadné soustavy. Pro koeficienty polarizovaného paprsku šířícího se podél osy  $x$  platí:

$$R_x + T_x = R_y + T_y = 1, \quad (7.1)$$

kde  $R_x, T_x, R_y, T_y$  označují koeficienty odrazu a přenosu [4].



Obr. 7.3: Princip oddělení paprsků na lineární polarizace [26].



Obr. 7.4: Rozdělovač / slučovač optického paprsku Thorlabs BC1550SM-FC [26].

## 7.6 Zapojení senzoru s děličem polarizace

Pro schéma zapojení děličů/slučovačů polarizačního paprsku platí:

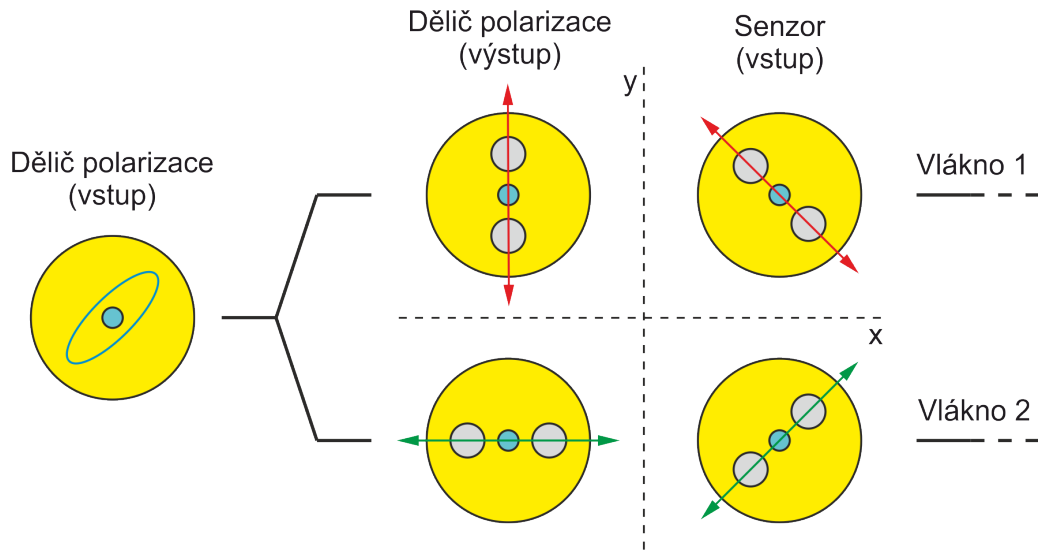
Vlákno natočené o  $\pi/4$  k osám souřadné soustavy má tvar Jonesovy matice

$$L = \begin{bmatrix} \cos(\delta/2) & i \cdot \sin(\delta/2) \\ i \cdot \sin(\delta/2) & \cos(\delta/2) \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

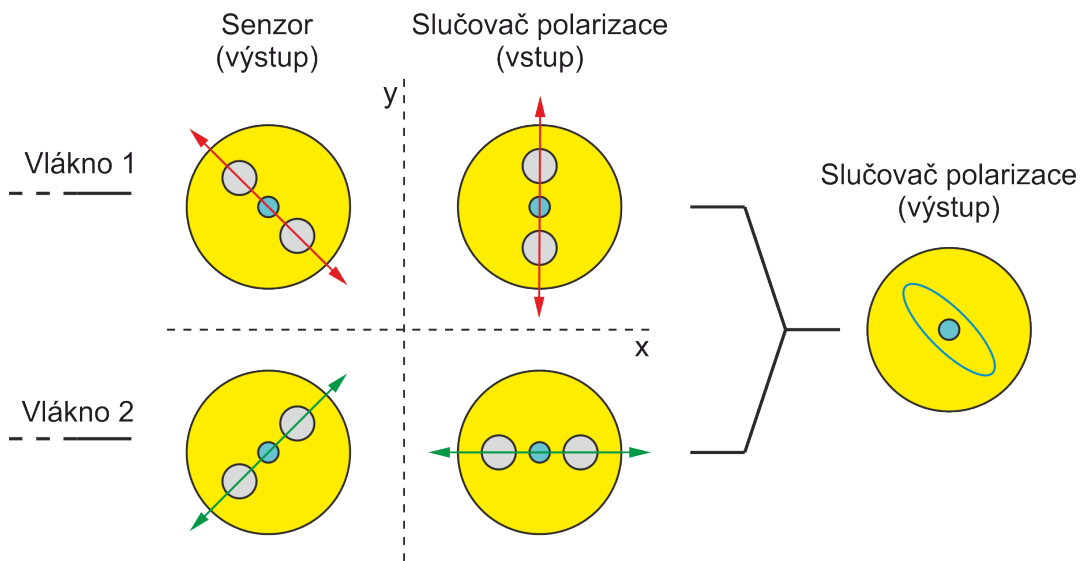
Jonesovy vektory na vstupu

$$k_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; k_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7.3)$$

kde konstanty  $k_1$  a  $k_2$  odpovídají rozdělení intenzit elektrického pole na výstupu polarizačního děliče.



Obr. 7.5: Polarizační stavy na vstupu polarizačního děliče a senzoru.



Obr. 7.6: Polarizační stavy na výstupu polarizačního děliče a senzoru.

## 7.7 Optická vlákna a spoje

Komponenty měřicí soustavy byly vzájemně propojeny několika typy optických kabelů. Zdroje světla byly propojeny s multiplexorem a demultiplexorem optickými vlákny Optokon SC-APC osazenými konektory LC-UPC. Vnější trasa byla připojena konektory E2000. Ostatní spoje využívaly konektorů FC-UPC. V rámci laboratorního měření jsme používali vlákna zachovávající polarizaci na vlnové délce 1550 nm. Vnější trasou bylo optické vlákno instalované v reálném venkovním provozu v prostředí města Brna. Měření tak probíhala na veřejné přenosové cestě s běžnými rušivými vlivy a namáháním.

## 7.8 Měřič optického výkonu

Pro měření výkonu z optických tras jsme zvolili přístroj VEGA P/N 7Z01560. Jedná se o měřič optického výkonu, který umožňuje přímé měření optického výkonu pomocí snímací hlavice PD300-IR. Měření a nastavení parametrů bylo řízeno propojením přístroje (pomocí USB rozhraní) s počítačem, na kterém byl nainstalován obslužný program OPHIR Starlab [28].



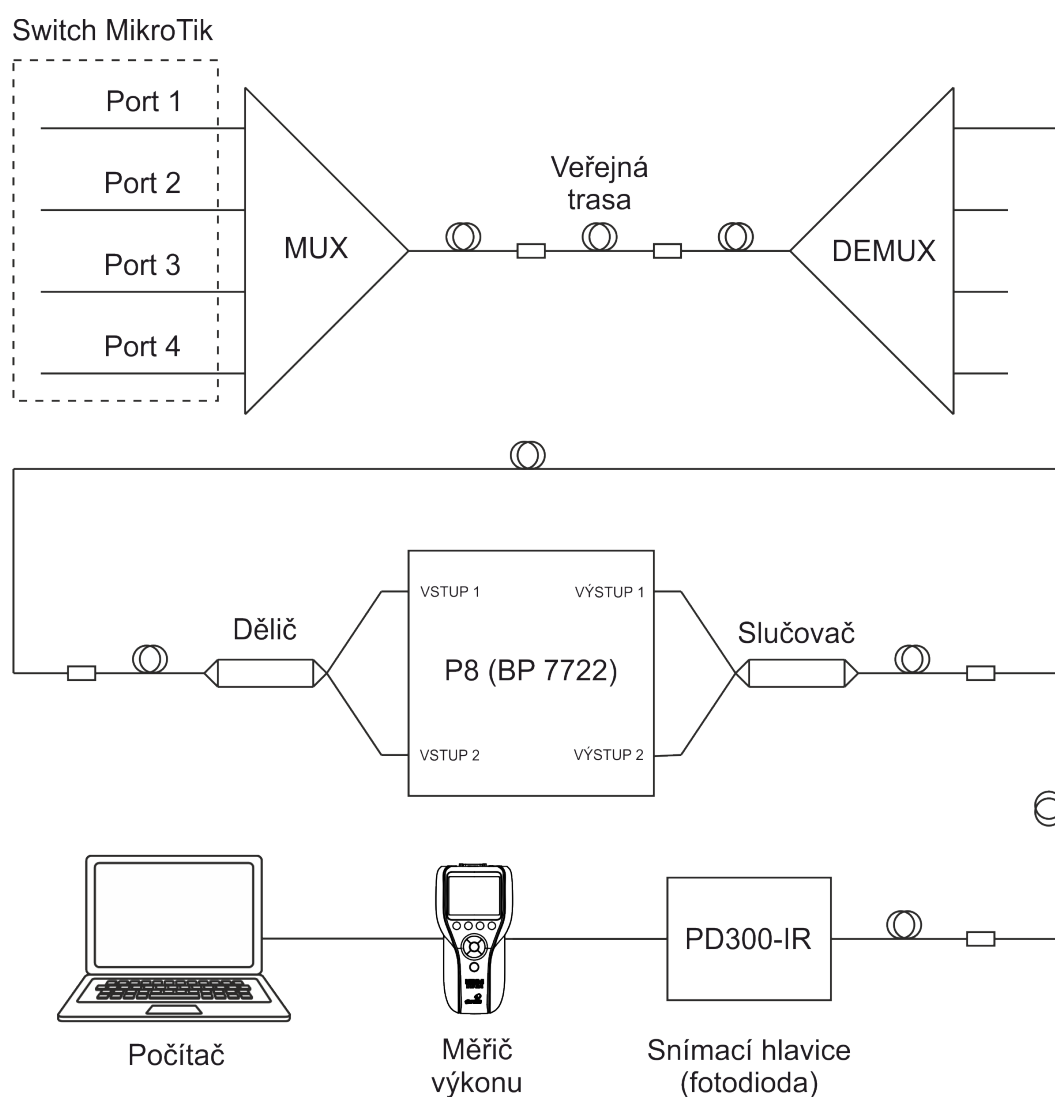
Obr. 7.7: Přední pohled na měřič optického výkonu Vega [28].

## 8 Výsledky měření

V této kapitole se budeme věnovat realizaci zapojení pracoviště, podmínkami v laboratoři, průběhem měření a zpracování naměřených hodnot do grafických závislostí. Všechna měření měla společné vstupní parametry:

- Teplota v místnosti (laboratoři): 24°C,
- čas přiložení teplotního zdroje (voda s ledem o teplotě 0°C): v čase 140 s,
- celkový čas měření cca 920 s.

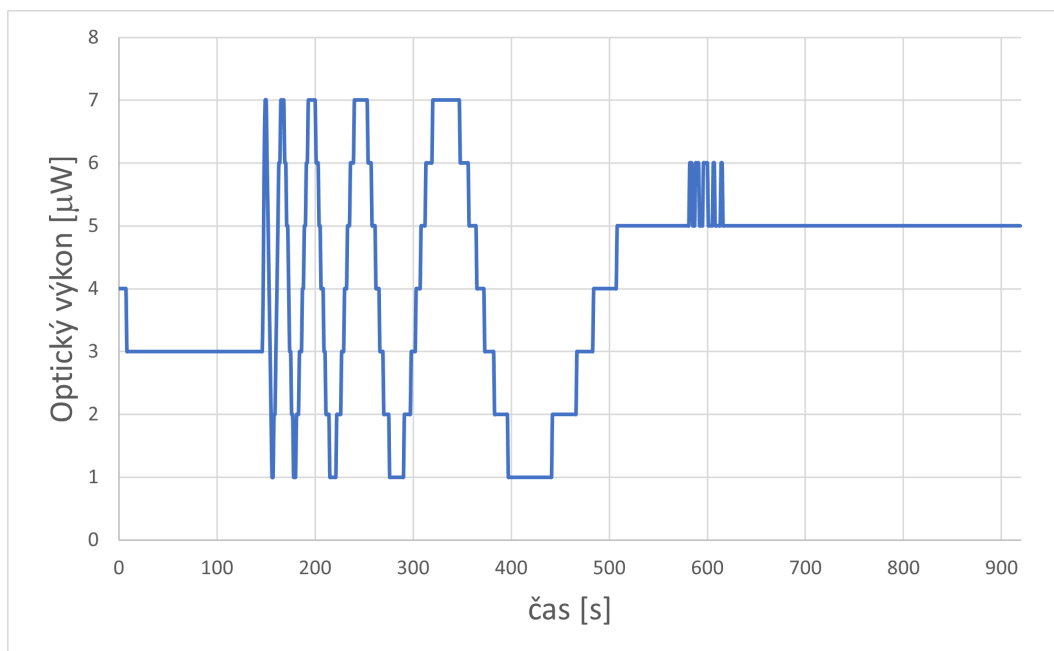
### 8.1 Schéma zapojení pracoviště



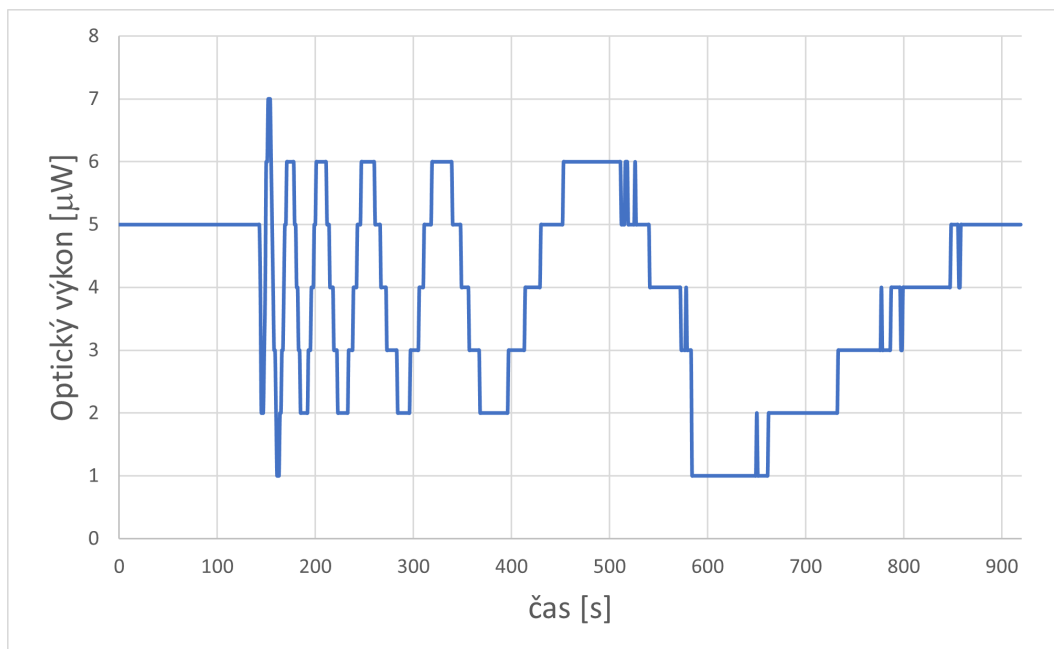
Obr. 8.1: Schéma zapojení měřícího pracoviště.



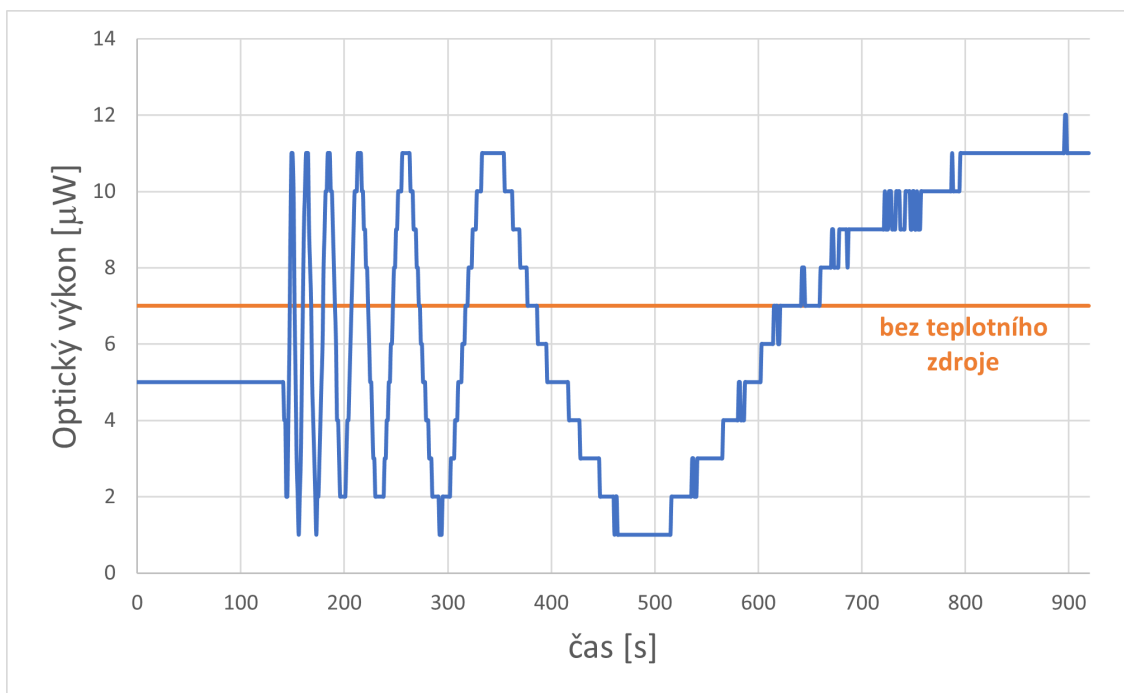
## 8.2 Grafické znázornění výsledků měření



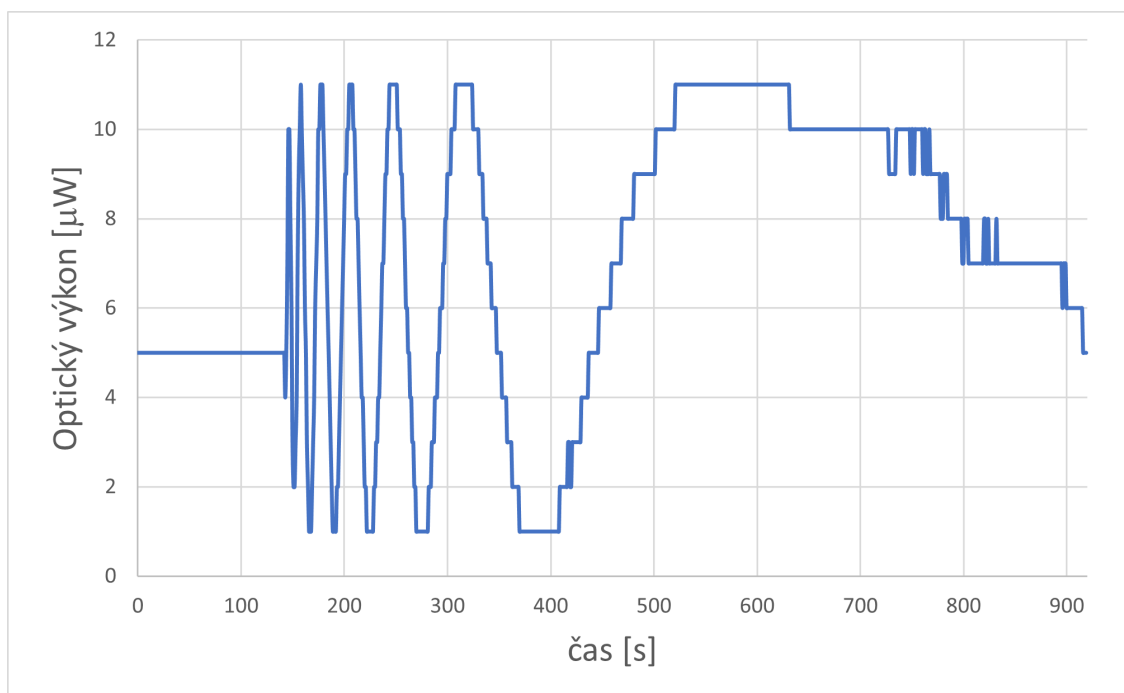
Obr. 8.2: Optický výkon na trase 12 km (vlnová délka 1555,75 nm).



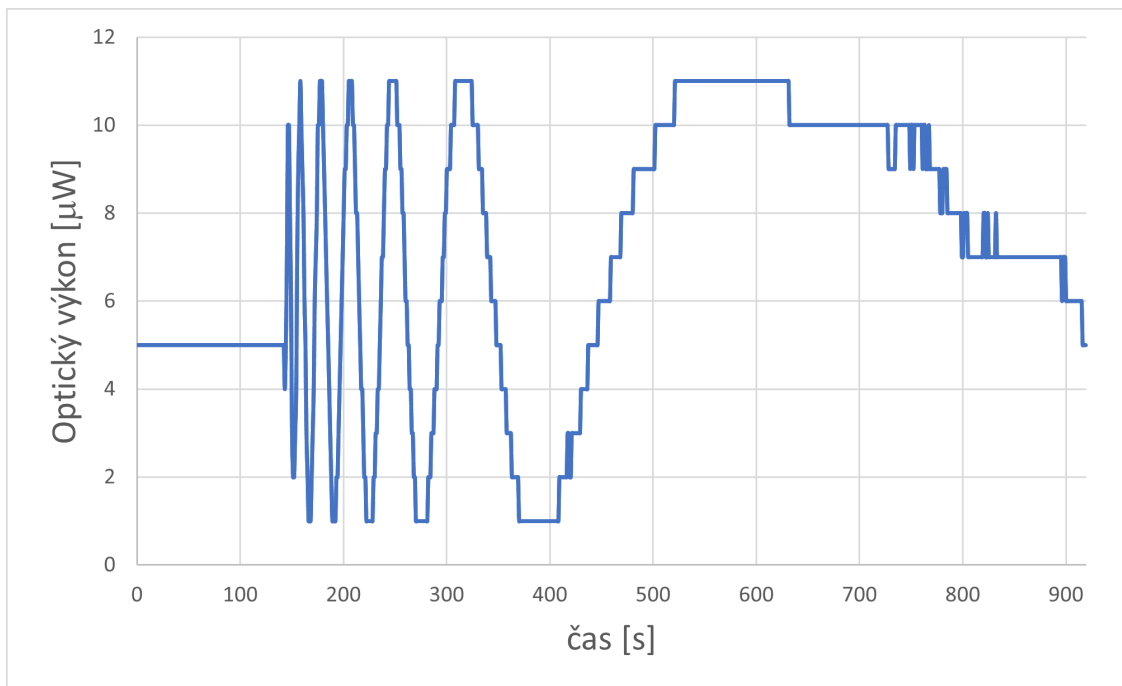
Obr. 8.3: Optický výkon na trase 12 km (vlnová délka 1554,94 nm).



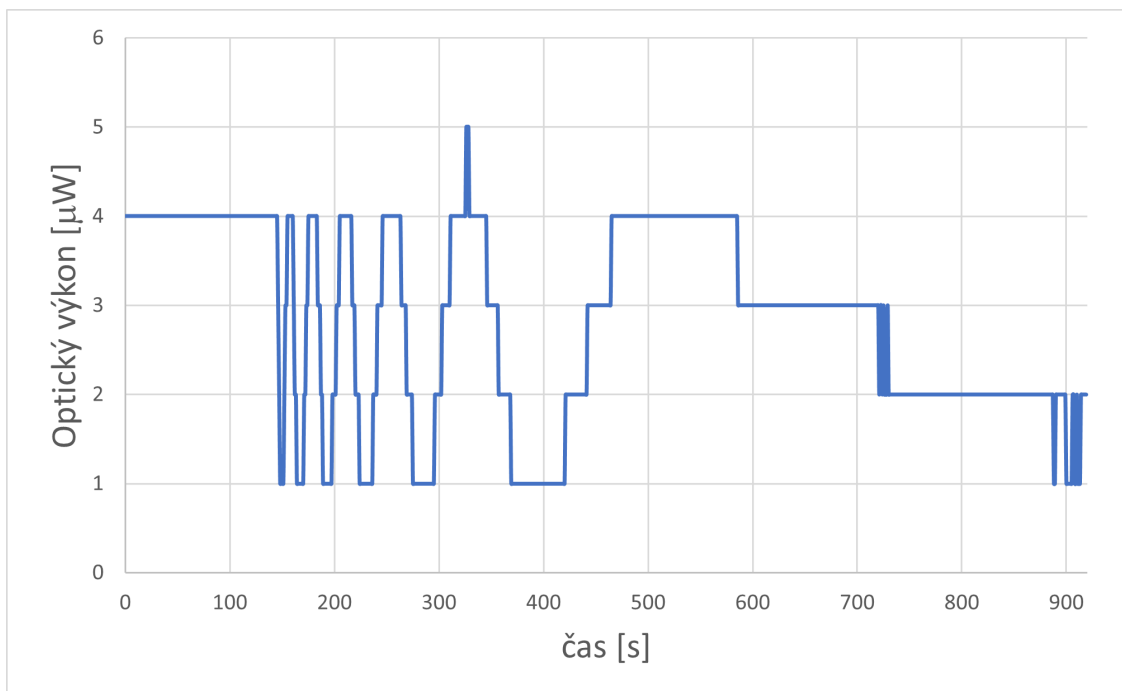
Obr. 8.4: Optický výkon na trase 4,5 km (vlnová délka 1555,75 nm).



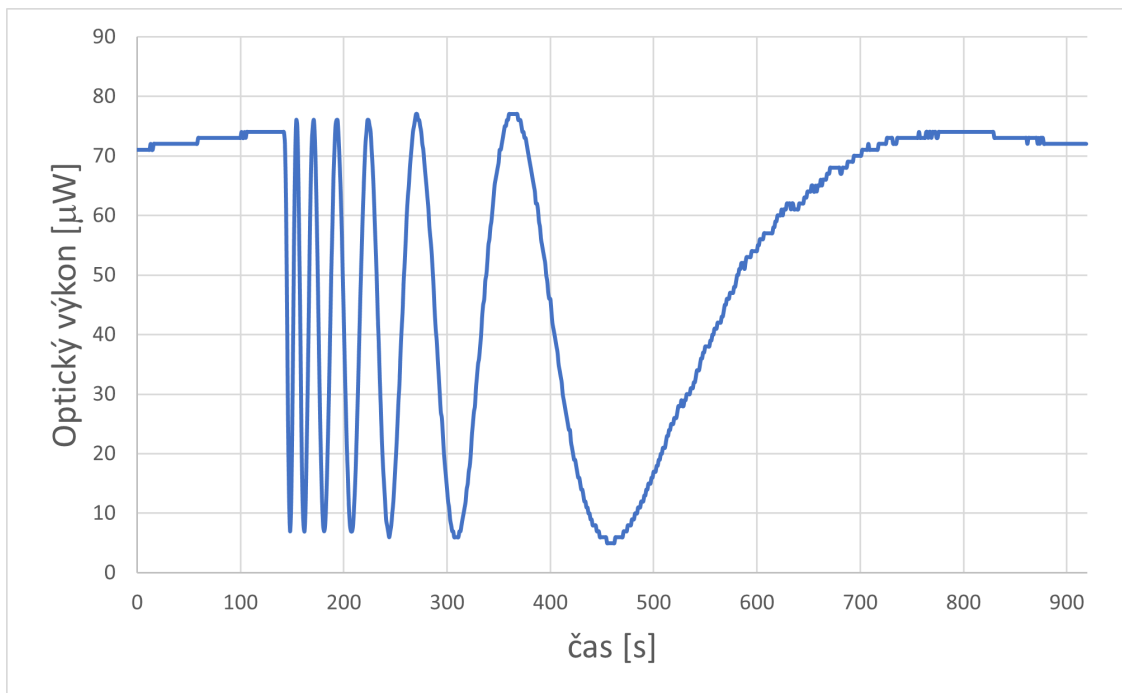
Obr. 8.5: Optický výkon na trase 4,5 km (vlnová délka 1554,94 nm).



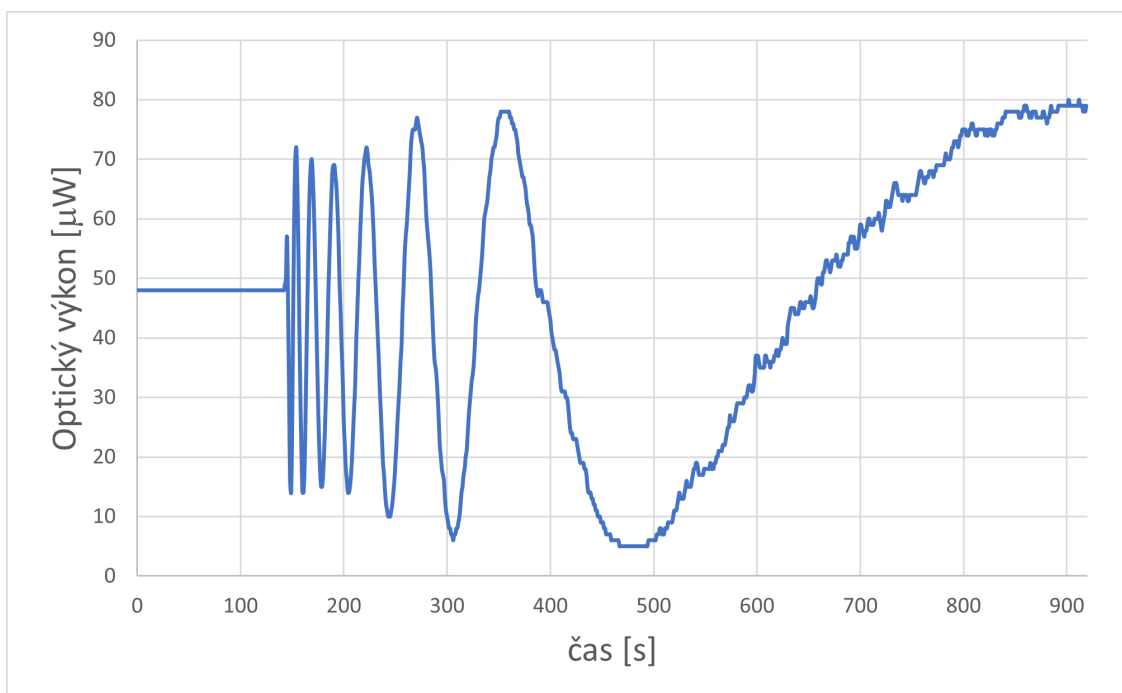
Obr. 8.6: Optický výkon na trase 4,5 km (vlnová délka 1550,92 nm).



Obr. 8.7: Optický výkon na trase 4,5 km (vlnová délka 1550,12 nm).



Obr. 8.8: Optický výkon na trase 1 km (vlnová délka 1555,75 nm).



Obr. 8.9: Optický výkon na trase 1 km (vlnová délka 1554,94 nm).

## 8.3 Shrnutí

V praktické části této práce jsme provedli sérii měření, která se od sebe lišila dvěma parametry:

- délkou trasy (12 km, 4,5 km a 1 km),
- zdrojem signálu.

Laboratoř byla zapojena dle schématu zapojení 8.1. Na počátku soustavy je zdroj s vybranými DWDM kanály, které jsou multiplexovány na hlavní přenosový kanál a na jeho konci zpětně demultiplexovány. V dalším kroku byla měření prováděna na jednotlivých kanálech odděleně. Signál se přivedl na polarizační dělič a signály byly přivedeny na vstupy senzoru P8 (BP 7722). V části konstrukce senzoru probíhala i stresová část průběhu měření spočívající v přiložení teplotního zdroje do otvoru v obalu senzoru (polystyrenu). Zde je důležité zmínit, že obě sensorická vlákna byla exponována současně. Signály ze senzoru byly nakonec sloučeny (zpětným zapojením děliče) a přivedeny na měřící soustavu.

Pro první měření jsme zvolili trasu dlouhou 12 km. Jak je zřejmé z naměřených závislostí, tak je tato vzdálenost moc velká a lze sledovat velmi nízké výkyvy hodnot optického výkonu. V dalším kroku jsme vzdálenost zkrátili na 4,5 km, kde jsme pozorovali průběh podobných hodnot optického výkonu. Můžeme zde pozorovat vliv trasy na měřený průběh. Ten spočívá v rychlostech odezvy, které se vyznačují členitostí schodkovosti grafu. Nakonec jsme měřili trasu délky 1 km. Zde můžeme pozorovat velký nárůst výkonu a hladší průběh závislosti optického výkonu na čase.

## Závěr

V práci jsou postupně probrány polarizace a rozptyly světla v optickém vlákně. Zmíněny a popsány jsou zde jednotlivé typy optoelektronických multiplexů, dále Rayleighův, Ramanův a Brillouinův rozptyl. V kapitolách týkajících se optických senzorů jsou popsány základní vlastnosti, rozdělení a jejich kategorizace. Závěr teoretické části je konkrétněji zaměřen na problematiku teplotních optických vláknových senzorů. Na analýzu změn teploty se diplomová práce blíže zaměřuje.

Téma diplomové práce se dále zaměřuje na návrh a realizaci měřicího systému, který s využitím techniky DWDM bude schopen získávat data ze sensorického systému. Podobná řešení již existují, ve své podstatě je ale navrhované zapojení unikátní. Kaskádovité zapojení systému, napájené jediným optickým kabelem, není v praxi běžné.

Velkou výhodou je absence napájecího zdroje v místě umístění senzorů a velká vzdálenost mezi pozorovacím a snímaným prostorem. Ta spočívá v bezpečnosti jak s ohledem na obsluhu, tak i na prostředí, kde se senzory budou nacházet. Nabízí se tak možnosti uplatnění v nebezpečných prostorech jako jsou např. muniční sklady, sklady s řezivem, apod. (prostory náchylné na nežádoucí elektrický výboj). DWDM přenos nám zajišťuje použitelnost na běžných veřejných optických spojích, a tím snímání celých sensorických systémů (široký počet kanálů). Ve výsledném schématu zapojení jsme, oproti navrhovanému, udělali ještě jednu změnu. Nahradili jsme lineární polarizátor polarizačním děličem. Vznikla tak levnější varianta systému, jehož funkce jako senzoru narušení teplotního pole se nám potvrdila.

# Literatura

- [1] COLLETT, Edward. *Field Guide to Polarization*. 2nd edition. Bellingham, Washington USA: SPIE Press, 2005. ISBN 0-8194-5868-6.
- [2] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-29-5.
- [3] COLLETT, Edward. *Polarized Light in Fiber Optics*. Lincoln, New Jersey USA: The PolaWave Group, 2003. ISBN 0-9677167-1-3.
- [4] KYSELÁK, Martin. *Využití polarizačních vlastností světla v senzorových a telekomunikačních systémech*. Brno, 2018. Habilitační práce. Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, Katedra elektrotechniky.
- [5] KERSEY, Alan a Anthony DANDRIDGE. Applications of Fiber-Optic Sensors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology (Proceedings., 39th Electronic Components Conference)*. [online]. IEEE Press, 1989, , 472-478 [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: doi:10.1109/ECC.1989.77791
- [6] KROHN, David, Trevor MACDOUGALL a Alexis MENDEZ. *Fiber Optic Sensors: Fundamentals and Applications*. 4th edition. Bellingham, Washington USA: SPIE Press, 2014. ISBN 578-1-6284-1180-5.
- [7] BORN, Max a Emil WOLF. *Principles of Optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. ISBN 0-521-64221.
- [8] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Karolinum, 2013. ISBN 978-80-246-2246-0.
- [9] LIETAERT, Gregory. *Testing Polarization Mode Dispersion (PMD) in the Field* [online]. JDS Uniphase Corporation, 2006 [cit. 2021-12-12]. 30137416 000 0106. Dostupné z: [www.jdsu.com/fiberopticstest](http://www.jdsu.com/fiberopticstest)
- [10] VLČEK, Čestmír. *Vláknová optika* [online]. 2000 [cit. 2021-10-14]. S - 462. Vojenská akademie v Brně, Fakulta letectva a protivzdušné obrany.
- [11] AGRAWAL, Govind P. *Fiber-Optic Communications Systems*. 3rd edition. Rochester: NY, University of Rochester, The Institute of Optics: John Wiley Sons, 2002. ISBN 0-471-22114-7.
- [12] GERRARD, Anthony a James M. BURCH. *Introduction to matrix methods in optics*. New York: Dover, 1994. ISBN 04-866-8044-4.

- [13] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky, svazek 1: Fundamentals of photonics*. Praha: Matfyzpress, 1994. ISBN 80-85863-01-4.
- [14] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky, svazek 2: Fundamentals of photonics*. Praha: Matfyzpress, 1994. ISBN 80-85863-02-2.
- [15] LÁTAL, Jan, Petr KOUDELKA, František HANÁČEK a Petr ŠÍŠKA. Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty. *Access server: Výsledky výzkumu a další informace nejen z oblasti přístupových telekomunikačních sítí*. [online]. VŠB-TU Ostrava, FEI, [2010], 04.03.2010 [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2010030001>
- [16] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Recommendation ITU-T G.694.1: Spectral grids for WDM applications (DWDM frequency grid)*. Geneva, Switzerland, 2020. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-202010-I/en>
- [17] FIBERDYNE LABS, INC. *Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM): ITU Grid: C-Band, 100 GHz Spacing*. [online]. S3039, Rev A. Frankfurt, New York, © 2021, 8.11.2016 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.fiberdyne.com/products/itu-grid.html>
- [18] SPILLMAN, William B. a Eric UDD. *Field Guide to Fiber Optic Sensors - Civil Structure Applications*. 2014 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). Dostupné z: doi:10.1117/3.1002803.ch87
- [19] CUNNINGHAM, Alex. Fluorescence sensors. *Coastal Wiki* [online]. 2019 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: [http://www.coastalwiki.org/wiki/Fluorescence\\_sensors](http://www.coastalwiki.org/wiki/Fluorescence_sensors)
- [20] Types of fiber optic sensors | Fiber Optic Sensor working principle. *RF Wireless World* [online]. 2012 [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Articles/Fiber-Optic-Sensor-basics-and-Fiber-Optic-Sensor-types.html>
- [21] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika. 2., přeprac. vyd.* Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, © 2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [22] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Rozptyl světla v optickém vlákně. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2021 [cit. 2021-12-12]. Dostupné



z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1671-rozptyl-svetla-v-optickem-vlaknu>

- [23] FANG, Zujie, Chin KEN K., Haiwen CAI a Ronghui QU. *Fundamentals of Optical Fiber Sensors*. Hoboken, New Jersey: John Wiley Sons, 2012. ISBN 9781118381717.
- [24] DRÁBEK, Jakub. *Měření parametrů polarizovaného světla na výstupu opto-  
vláknového senzoru*. Brno, 2018, 66 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické  
v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomu-  
nikací. Vedoucí práce Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [25] Polarizer. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wiki-  
media Foundation, 2021, aktualizace 7.12.2021 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Polarizer>
- [26] THORLABS INC. *Fiber-Based Polarization Beam Combiners/Split-  
ters, 1 SM and 2 PM Ports: PBC1550SM-FC* [online]. Newton,  
New Jersey: Thorlabs, © 1999-2022 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z:  
[https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=6673](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6673)
- [27] SIA MIKROTĪKLS. *MikroTik: CRS305-1G-4S+IN*. Riga,  
Latvia: SIA Mikrotīkls, © 1997-2022. Dostupné také z:  
[https://mikrotik.com/product/crs305\\_1g\\_4s\\_in](https://mikrotik.com/product/crs305_1g_4s_in)
- [28] Vega. *Ophir Photonics* [online]. Darmstadt, Germany: Ophir Photonics,  
© 2022 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.ophiropt.com/laser-measurement/laser-power-energy-meters/products/smart-displays/vega>

## Seznam symbolů a zkratek

<b>CT</b>	počítačová tomografie – Computer Tomograph
<b>CWDM</b>	řídký vlnový multiplex – Coarse Wavelength Division Multiplexing
<b>DART</b>	distribuovaná anti-Stokesova Ramanova termometrie
<b>DEMUX</b>	Demultiplexer
<b>DGD</b>	skupinové zpoždění – Differential Group Delay
<b>DTS</b>	lineární detekce teploty – Distributed Temperature System
<b>DWDM</b>	hustý vlnový multiplex – Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>FBG</b>	optické vláknové mřížky – Fiber Bragg Grating
<b>ITU</b>	Mezinárodní telekomunikační unie – International Telecommunication Union
<b>L+45P</b>	+45° lineárně polarizované světlo – Linearly +45° Polarized Light
<b>L-45P</b>	-45° lineárně polarizované světlo – Linearly -45° Polarized Light
<b>LCP</b>	levé kruhově polarizované světlo – Left Circularly Polarized light
<b>LHP</b>	horizontální lineárně polarizované světlo – Linearly Horizontal Polarized light
<b>LVP</b>	vertikální lineárně polarizované světlo – Linearly Vertical Polarized light
<b>MRI</b>	magnetická rezonance – Magnetic Resonance Imaging
<b>MUX</b>	Multiplexer
<b>PDM</b>	polarizační multiplex – Polarization Division Multiplexing
<b>PM</b>	jednovidové vlákno zachovávající polarizaci – Polarization maintaining
<b>PSP</b>	hlavních stavy polarizace – Principal State of Polarization
<b>RCP</b>	pravé kruhově polarizované světlo – Right Circularly Polarized light
<b>RDTS</b>	Ramanův distribuovaný teplotní senzor

<b>RTD</b>	odporový teplotní detektor rezonance – Resistance Temperature Detector
<b>SFP</b>	Small Form-factor Pluggable
<b>T</b>	teplota
<b>UV</b>	ultrafialové záření (světlo) – Ultraviolet
<b>WDM</b>	vlnový multiplex – Wavelength Division Multiplexing
<b>WGP</b>	frátově mřížkový polarizátor – Wire-Grid Polarizer
<b>WWDM</b>	široký vlnový multiplex – Wide Wavelength Division Multiplexing
$2\alpha$	koordinace v pozorovatelné polarizační kouli – coordinate on the observable polarization sphere
$2\chi$	koordinační úhel v Poincarého kouli – coordinate angle on the Poincare sphere
$2\psi$	koordinační úhel v Poincarého kouli – coordinate angle on the Poincare sphere
$\alpha$	pomocný úhel
$\chi$	úhel elipticity – angle of ellipticity
$\delta$	fázový rozdíl – phase difference
$\delta_x$	fáze vlny (x) – phase of the wave (x)
$\delta_y$	fáze vlny (y) – phase of the wave (y)
$\lambda$	vlnová délka
$\psi$	sférický úhel orientace – spherical angle of orientation