



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

LABORATORNÍ ÚLOHA PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH MŘÍŽEK

LABORATORY TASK FOR MEASURING PARAMETERS OF OPTICAL FIBRE GRATINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adrián Dúbravka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ružička

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Adrián Dúbravka

ID: 220886

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní úloha pro měření parametrů optických vláknových mřížek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je rozbor možností výroby optických vláknových mřížek, jejich parametrů jako například OSNR, spektrální šířka a jejich vliv na výsledné parametry senzoru. Dále bude studován rozdíl mezi mřížkami termální a atermální. V rámci semestrální práce budou provedena měření vybraných typů vláknových mřížek. V rámci bakalářské práce bude provedena charakteristika mřížky pro různé typy namáhání. Tyto znalosti následně student využije k vytvoření laboratorní úlohy pro pochopení problematiky optických vláknových mřížek.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ALI ALIAN, Taha, Nazmi AZZAM and Moustafa HUSSEIN. 2014. Performance Evaluation of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor: Apodized Fiber Bragg Grating, Design and Simulation. ISBN: 978-3-6595-8590-6
- [2] CUSANO, Andrea, 2018. Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation. ISBN 978-1-6080-5343-8.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Michal Ružička

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá optickými vláknami, konkrétne vláknovými mriežkami, ako je napríklad Braggova mriežka. V teoretickej časti sú popísané rôzne typy vláknových mriežok a ich hlavné rozdiely. Ďalej sú v teoretickej časti spracované rôzne spôsoby výroby Braggových mriežok, kompenzácia teploty v mriežkach a ich využitie ako senzorov. Praktická časť sa venuje vplyvu tlaku a teploty na mriežky a posuvnému FBG senzoru, tiež sú zmerané OSNR a spektrálne šírky mriežok. Ďalej je študovaný vplyv rôzneho typu namáhania na optické vláknové Braggove mriežky.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

athermalný balíček, Braggove mriežky, FBG senzory, mriežka s dlhou periódou, parametre mriežok, typy mriežok, výroba Braggových mriežok

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with optical fibers, especially fiber gratings such as Bragg's grating. The theoretical part describes different types of fiber grids and their main differences. Later on the theoretical part deals with different methods of manufacturing Bragg's gratings, temperature compensation in gratings and their use as a sensor. The practical part deals with the influence of pressure and temperature on gratings and sliding FBG sensor. OSNR and spectral lattice widths are also measured. Furthermore, the influence of various types of strain on optical fibers in Bragg's gratings is also studied.

KEYWORDS

athermal package, Bragg grids, FBG sensors, grid parameters, long period fiber grids, production of Bragg grids, types of grids

DÚBRAVKA, Adrián. *Laboratorní úloha pro měření parametrů optických vláknových mřížek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 69 s. Bakalářská práce. Vedúci práce: Ing. Michal Ružička

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Adrián Dúbravka
VUT ID autora: 220886
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2021/22
Téma záverečnej práce: Laboratorní úloha pro měření parametrů optických vláknových mřížek

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej 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 trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Michalovi Ružičkovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Optické vláknové mriežky	12
1.1 Vedený a vyžarujúci vid	12
1.2 Braggova vláknová mriežka FBG	13
1.3 Mriežky s dlhou periódou LPFGs	15
1.4 Naklonená mriežka	17
2 Typy vláknových mriežok	18
2.1 Rovnomerné FBG	18
2.2 Apodizované FBG	19
2.3 Chirpované mriežky	20
2.3.1 Kvadratická perióda	21
2.3.2 Skoková perióda	22
2.4 Vzorkované mriežky	22
2.5 Fázová pauza	23
3 Výroby optických Braggových vláknových mriežok	24
3.1 Interne popísané FBG	24
3.2 Interferometer s deliacou amplitúdou	25
3.3 Interferometer s rozdeľovaním čela vlny	26
3.3.1 Lloydov interferometer	26
3.3.2 Hranolový interferometer	27
3.4 Metóda fázovej masky	28
3.5 Metóda bod po bode	30
4 Teplota v FBG	31
4.1 Citlivosť vlákna na deformáciu a teplotu	31
4.2 Atermálny balíček FBG	32
4.3 FBG ako senzor	34
4.3.1 Teplotné senzory	34
4.3.2 Ťahové senzory	35
4.3.3 FBG interrogátory	36
5 Meranie rovnomerných FBG mriežok	38
5.1 Meranie tlaku pôsobiaceho na FBG mriežky	38
5.2 Meranie teploty pôsobiacej na FBG mriežky	40
5.3 Meranie senzora posunu FBG	41

5.4	Meranie parametrov FBG mriežok	42
6	Návrh laboratórnej pomôcky	46
6.1	Prípravok na ohyb vlákna	46
6.2	Prípravok na rotáciu vlákna	47
7	Namáhanie FBG za pomoci navrhnutých laboratórnych pomôcok	48
7.1	FBG použité pri meraní	48
7.2	Vplyv ohybu na FBG	49
7.3	Zaťaženie FBG z rôznych smerov	52
8	Laboratórna úloha	55
	Záver	56
	Literatúra	57
	Zoznam symbolov a skratiek	60

Zoznam obrázkov

1.1	Rozloženie konštánt vedených vidov v optickom vlákne.	13
1.2	Schematický nákras Braggovej vláknovej mriežky.	14
1.3	Znázornenie geometrickej optiky v Braggovej mriežke.	14
1.4	Štruktúra Braggovej mriežky.	15
1.5	Znázornenie geometrickej optiky v LPFG.	16
1.6	Štruktúra mriežky s dlhou periódou.	16
1.7	Schematický nákras LPFG.	17
1.8	Znázornenie geometrickej optiky v naklonenej mriežke.	17
2.1	Štruktúra rovnomernej mriežky.	18
2.2	Modulácia indexu lomu a spektrum odrazu rovnomernej mriežky. . .	19
2.3	Modulácia indexu lomu a spektrum odrazu apodizovanej mriežky. . .	19
2.4	Štruktúra Chirpovanej mriežky.	20
2.5	Modulácia indexu lomu a spektrum odrazu chirpovanej mriežky. . . .	21
2.6	Štruktúra lineárnej chirpovanej mriežky.	21
2.7	Štruktúra chirpovanej skokovej mriežky.	22
2.8	Modulácia indexu lomu a spektrum odrazu vzorkovanej mriežky. . . .	22
2.9	Modulácia indexu lomu a spektrum odrazu fázovej pauzy v mriežke. .	23
3.1	Typický prístroj používaný na generovanie samoindukovaných Braggovych mriežok pomocou argónového iónového lasera.	24
3.2	Interferometer s deliacou amplitúdou.	25
3.3	Schéma Lloydovho interferometra s rozdeľovaním čela vlny.	27
3.4	Schéma hranolového interferometra s rozdeľovaním čela vlny.	27
3.5	Geometria fázovej masky na vpisovanie Braggových mriežok do optických vlákien.	28
3.6	Jednoduchá schéma geometrie fázovej masky na vpísanie Braggových mriežok v optickom vlákne.	29
3.7	Schéma nastavenia výroby Braggových mriežok pomocou techniky bod po bode.	30
4.1	Vplyv teploty a namáhania na FBG.	32
4.2	Atermálny balíček FBG.	32
4.3	Prvé zariadenie na tepelnú kompenzáciu.	33
4.4	Druhé zariadenie na tepelnú kompenzáciu.	33
4.5	Braggova vlnová dĺžka s teplotnými zmenami v teplotnom kompenzačnom balíku.	34
4.6	Teplotný FBG senzor v nerezových puzdrách.	35
4.7	Gradientný teplotný senzor.	35
4.8	Ťahový FBG senzor.	35

4.9	FBG interrogátor s CCD snímačem.	36
4.10	FBG interrogátor s laditelným laserom a fotodetektorom.	37
5.1	Graf 1. mriežky s vlnovou dĺžkou 1539,54 nm.	39
5.2	Graf 2. mriežky s vlnovou dĺžkou 1545,73 nm.	39
5.3	Graf 3. mriežky s vlnovou dĺžkou 1549,98 nm.	40
5.4	Graf teplotnej závislosti v 4. mriežke.	41
5.5	Závislosť zmeny vlnovej dĺžky posuvným senzorem.	42
5.6	OSNR parametre jednotlivých rovnomerných FBG mriežok.	43
5.7	OSNR parametre jednotlivých rovnomerných FBG mriežok v senzore posunu.	43
5.8	Spektrálna šírka jednotlivých rovnomerných FBG mriežok.	44
5.9	Spektrálna šírka jednotlivých rovnomerných FBG mriežok v senzore posunu.	44
6.1	Prípravok na ohyb vlákna.	46
6.2	Prípravok na rotáciu vlákna.	47
7.1	Prvá Braggova mriežka s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm.	48
7.2	Druhá Braggova mriežka s vlnovou dĺžkou 1550,38 nm.	48
7.3	Zapojenie prípravku na ohyb vlákna.	49
7.4	Závislosť vlnovej dĺžky na ohyb vľavo pre mriežku s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm	50
7.5	Závislosť vlnovej dĺžky na ohyb vpravo pre mriežku s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm	50
7.6	Závislosť vlnovej dĺžky na ohyb vľavo pre mriežku s vlnovou dĺžkou 1550,38 nm.	51
7.7	Závislosť vlnovej dĺžky na ohyb vpravo pre mriežku s vlnovou dĺžkou 1550,38 nm.	51
7.8	Zapojenie prípravku na rotáciu vlákna.	52
7.9	Závislosti vlnovej dĺžky na zaťažení FBG z rôznych smerov pre mriežku s hodnotou 1545,53 nm.	53
7.10	Závislosti vlnovej dĺžky na zaťažení FBG z rôznych smerov pre mriežku s hodnotou 1550,38 nm.	53
7.11	Závislosť útlmu na zaťaženie FBG z rôznych smerov pre mriežku s hodnotou 1545,53 nm.	54
7.12	Závislosť útlmu na zaťaženie FBG z rôznych smerov pre mriežku s hodnotou 1550,38 nm.	54

Úvod

Dnešná doba kladie široké nároky na množstvo prenášaných dát a hlavne na rýchlosť a kvalitu prenosu. Od objavenia optických vlákien sa stále viac a viac presviedčame o ich nenahraditeľnosti nielen v oblasti telekomunikácií ale aj v oblasti senzorov, lekárstve...

Fotosenzitivita optického vlákna bola objavená v Canadian Communications Research Center v roku 1978 Kenom Hillom počas experimentov s použitím germaniovo dopovaným kremičitanovým vláknom a viditeľného argón-iónového laserového žiarenia a taktiež predviedol možnosť zápisu stálej mriežky v jadre optického vlákna pomocou dvoch interferujúcich svetelných lúčov. Od objavenia fotosenzitivity v optických vláknach existuje veľký záujem o výrobu Braggových mriežok v jadre vlákna. Možnosť vpísať vnútro-jadrové Braggove mriežky do fotosenzitívneho vlákna spôsobila revolúciu v oblasti telekomunikácie a technológie senzorov na báze optických vlákien.

Prvá kapitola sa venuje podrobnejším popisom vedeného a vyžarujúceho vidu v optickom vlákne, ktorý prenáša energiu. Ďalej sa venuje popisu a hlavným rozdielom medzi Braggovou vláknovou mriežkou (FBG), mriežkou s dlhou periódou (LPFG) a naklonenou mriežkou.

V druhej kapitole sa uvádzajú typy mriežok, ako sú rovnomerné mriežky, chirpované mriežky a vzorkované mriežky. Popísaný je aj vplyv rôznych apodizačných profilov a taktiež aj fázová pauza.

Tretia kapitola popisuje rôzne techniky používané pri výrobe FBG, ktoré môžu byť interné alebo externé. Najviac popísané sú externé metódy, ako sú napríklad metóda s použitím interferometra, metóda fázovej masky a metóda bod po bode.

Štvrtá kapitola sa zaoberá citlivosťou FBG na teplotu a deformáciu. Následne je popísaný spôsob na kompenzáciu teplotných odchýlok vo vláknovej Braggovej mriežke pomocou atermálneho balíčka a nakoniec použitie FBG senzorov.

Piata kapitola sa zaoberá rozborom štyroch rovnomerných FBG mriežok, kde tri boli zatažované tlakom a na jednej bola meraná teplotná závislosť. Ďalej bola kapitola zameraná na meranie FBG posuvného senzora. Nakoniec bola odmeraná spektrálna šírka a OSNR použitých mriežok.

Šiesta kapitola popisuje návrh dvoch laboratórnych pomôcok, ktoré boli následne využité v ďalších kapitolách na merania a zostavenie laboratórnej úlohy.

V siedmej kapitole sú popísané výsledky meraní namáhaných mriežok pomocou prípravkov navrhnutých v šiestej kapitole.

Posledná ôsma kapitola obsahuje stručný popis navrhnutej laboratórnej úlohy nachádzajúcej sa v prílohe.

1 Optické vláknové mriežky

Táto kapitola popisuje difrakčné štruktúry v optických vláknach. Tieto štruktúry sú charakterizované periodickými alebo kvázi periodickými zmenami indexu lomu produkovanými pozdĺž osi optického vlákna.

Hlavným znakom týchto štruktúr je rozptyl svetla, ktorý je závislý na rozložení zmien indexu lomu. Tým vznikajú difrakčné minimá a maximá priechodu alebo odrazu svetla vo vlákne. Frekvencia alebo vlnová dĺžka týchto minimálnych a maximálnych hodnôt je riadená parametrami zmeny mikroštruktúry indexu lomu.

Vo vláknach sú z difrakčných štruktúr najviac využívané Braggove mriežky, mriežky s dlhou periódou a taktiež aj naklonené mriežky [1].

1.1 Vedený a vyžarujúci vid

V optických vlnovodoch je „vid“ termín pre šírenie elektromagnetických vln, ktorý prenáša energiu. Táto energia je prenášaná v neprerušenom a bezstratovom systéme cez optické vlákno s určitou uhlovou frekvenciou s konečným počtom vidov. Tieto vidy sa vedú v jadre s určitou konštantou šírenia β , kde je funkciou vlnovej dĺžky svetelného zdroja a vlastností vlákna. Veľmi dôležitá rovnica z Maxwellových rovníc je vlnová rovnica pre elektromagnetické vlny šíriace sa pozdĺž valcových optických vlákien. Pre rovinu (z) a pre zložky E_z a H_z vieme rovnicu napísať ako:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + (k^2 - \beta^2 - \frac{1}{r^2}) \Psi = 0, \quad (1.1)$$

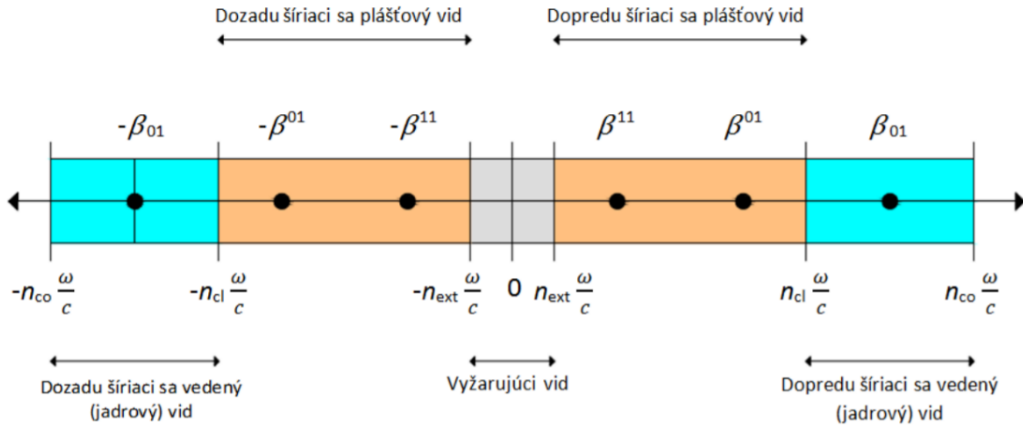
kde r sú radiálne súradnice, $\Psi = E_z, H_z$, $k = \frac{2\pi n^2}{c}$, $\omega = 2\pi f$ je uhlová frekvencia [2]. Konštantu šírenia vyjadruje amplitúdové kolísanie a fázu vidov, preto túto konštantu vieme napísať ako:

$$\beta = \frac{\omega n_{eff}}{c} = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}, \quad (1.2)$$

n_{eff} je efektívny index lomu šíriaceho sa vidu. Diskrétne hodnoty sú obmedzené na:

$$n_{cl} k < |\beta| < n_{co} k, \quad (1.3)$$

n_{cl} a n_{co} sú indexy lomu v plášti a jadre optického vlákna. k je konštantu šírenia vo voľnom priestore. Vzad (<0) a vpred (>0) šíriace konštanty a ich pozície vo vedenom vide sú na obr. 1.1 [3, 4].



Obr. 1.1: Rozloženie konštánt vedených vidov v optickom vlákne. Konštanta šírenia pre jadrový vid $-\beta_{01}$. Pre najnižší rád plášťových vidov sú konštanty šírenia $-\beta^{11}$ a $-\beta^{01}$ [3, 4].

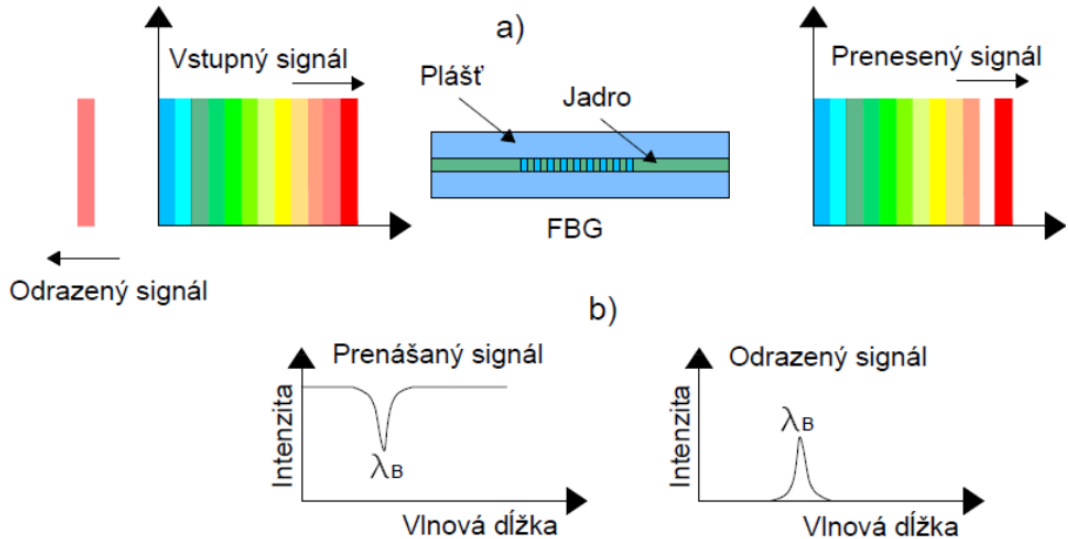
Existuje aj nekonečne veľký počet nešíriacich sa vidov, ktoré majú za príčinu úbytok energie z vedených vidov. Do vnútra vlákna sú niektoré tieto vidy naviazané. Nazývajú sa plášťové vidy. Následkom naviazovania vedených vidov môže byť smerovanie plášťových a vedených vidov rovnakým smerom alebo smerovanie plášťových vidov opačným smerom ako vedené. Smerovanie môžeme považovať za zásadný rozdiel medzi FBGs a LPFGs.

1.2 Braggova vláknová mriežka FBG

Braggove optické vláknové mriežky sú tvorené periodickou alebo kvázi periodickou zmenou indexu lomu jadra v pozdĺžnom smere k osi. Mriežky fungujú ako frekvenčný filter tak, že sa časť svetla vstupujúceho do vlákna a následne do mriežkovej štruktúry odrazí späť od každej mriežkovej roviny avšak iba v tom prípade, že spĺňajú navrhnuté parametre. Ostatná časť spektra je prepustená. Odrazené časti svetla sa spoja a vytvoria jeden odrazený lúč svetla, v prípade, že je splnená Braggova podmienka, ktorá je daná ako [5, 6] :

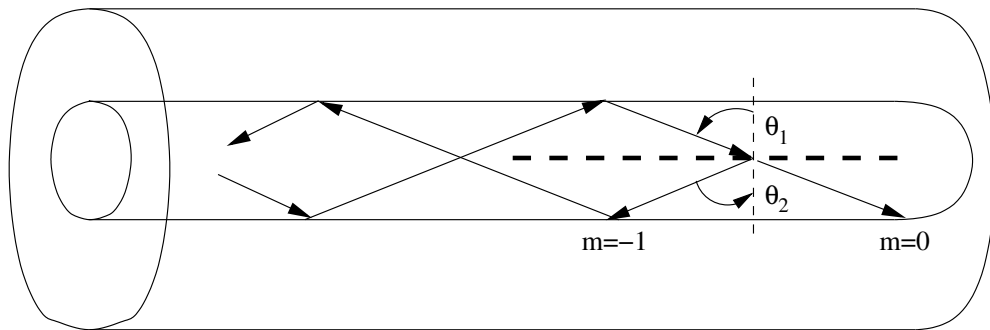
$$\lambda_b = 2\Lambda n_{eff}, \quad (1.4)$$

kde Λ je mriežková perióda vzdialenosti medzi dvoma susednými mriežkovými rovinami, n_{eff} je efektívny index lomu jadra a λ_b je Braggova vlnová dĺžka. Braggovu podmienku sleduje mriežková štruktúra ktorá funguje ako zrkadlo ktoré zvolenú vlnovú dĺžku odráža a zostávajúce prepúšťa [5, 7, 8].



Obr. 1.2: (a) Schematický náčrt Braggovej vláknovej mriežky, (b) popisuje typický odrazený a prenesený signál [4].

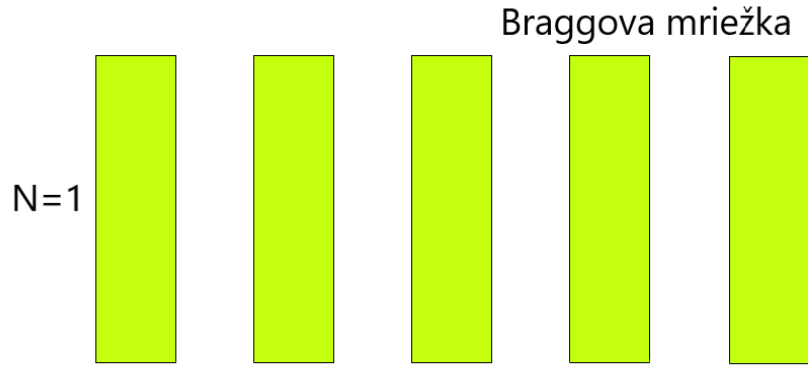
Základným rysom Braggovej mriežky je schopnosť predvoliť a udržať vlnovú dĺžku. Na obrázku 1.3 vidíme naväzovanie medzi vedenými vidmi a šíriacimi sa v opačnom smere.



Obr. 1.3: Znázornenie geometrickej optiky v Braggovej mriežke [5].

Vlnová dĺžka odrazeného signálu je závislá aj na teplote, aj na deformácií. Keďže je táto závislosť známa, tak je možné stanovenie teploty alebo mechanického napätia. Na obrázku 1.4 je znázornená štruktúra FBG s periódou Λ ($N=1$) [9].

Nesplnením Braggovej podmienky sa všetky odrazy vyrušia, a preto nie je možné pozorovať žiadny odraz. Erdogonovou teóriou viazaného módu sa odhaduje odrazivosť v FBG na každej mriežke vo vnútri vlákna. Odrazivosť $R_i(\lambda)$ na každej i -tej



Obr. 1.4: Štruktúra Braggovej mriežky.

mriežke je daná ako:

$$Ri(\lambda) = \frac{\sinh^2(L_g \sqrt{k^2 - \sigma_i^2})}{\cosh^2(L_g \sqrt{k^2 - \sigma_i^2}) - \frac{\sigma_i^2}{k^2}}, \quad (1.5)$$

kde L_g je dĺžka mriežok, k je ac väzbový koeficient medzi dvoma modmi a σ_i je jednosmerný samo väzbový koeficient [3][6], ktorý udáva závislosť vlnovej dĺžky pre každú mriežku a je daný ako:

$$\sigma_i = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}, \quad (1.6)$$

kde σ je jednosmerný väzbový koeficient, $\frac{d\phi}{dz}$ je zmena v chirpovanej mriežke a δ je daná ako:

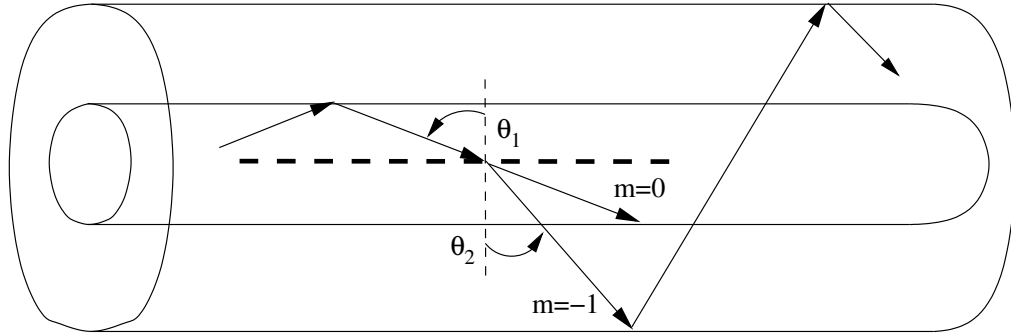
$$\delta = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right), \quad (1.7)$$

kde λ_D je navrhovaná vlnová dĺžka pre veľmi slabé mriežky.

1.3 Mriežky s dlhou periódou LPFGs

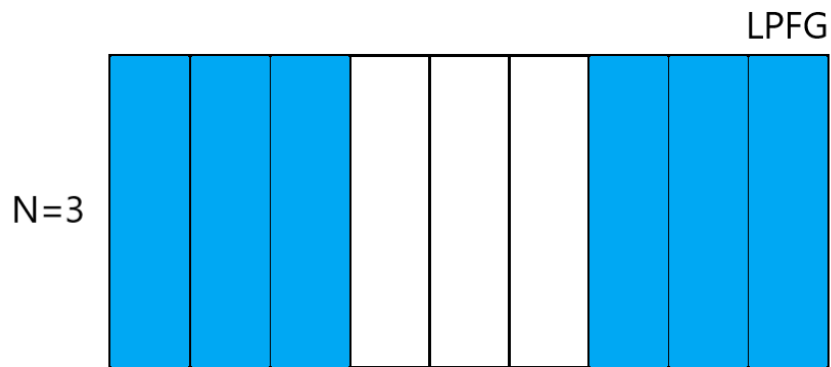
Ďalším typom optickej vláknovej mriežky sú mriežky s dlhou periódou. Tieto mriežky podporujú naväzovanie medzi šíriacim sa jadrovým vidom a spolu šíriacim sa plášťovým vidom [10].

Toto spojenie sa vyskytuje v jednovidovom vlákne, pretože energia šíriaca sa vo vide jadra nemôže byť prenesená do iného režimu v jadre [3, 11]. Z tohto dôvodu môže byť energia viazaná iba do plášťového vidu, viď obr.1.5

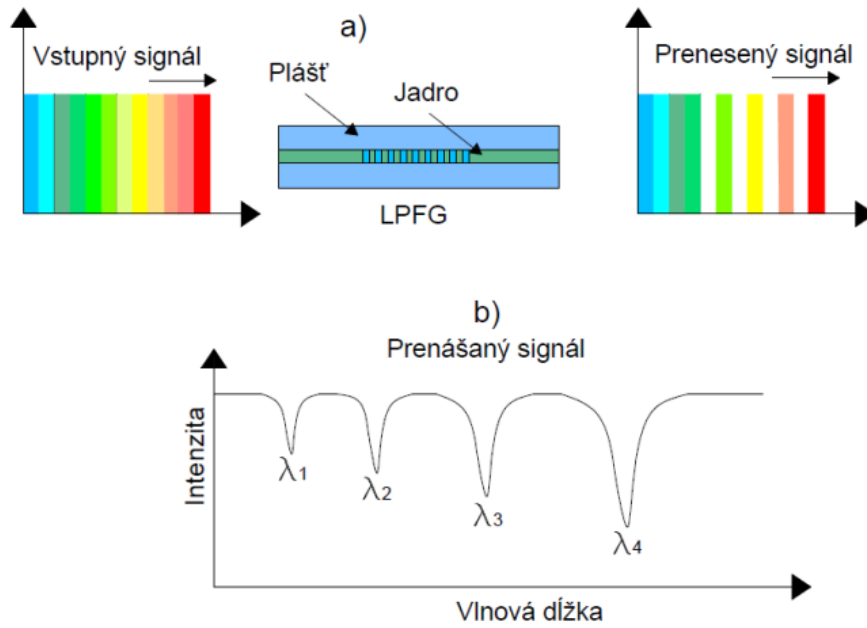


Obr. 1.5: Znáozornenie geometrickej optiky v LPFG [5].

LPFG musia dodržať takú podmienku, že v jednej perióde indexu lomu budú obsahovať násobok polovici dĺžky vlny svetla vo vlákne. Štruktúra s $N=3$ a $\Lambda(N=3)$ je vidieť na obrázku 1.6. Mriežka s dlhou periódou je schematicky znázornená na obrázku 1.7.



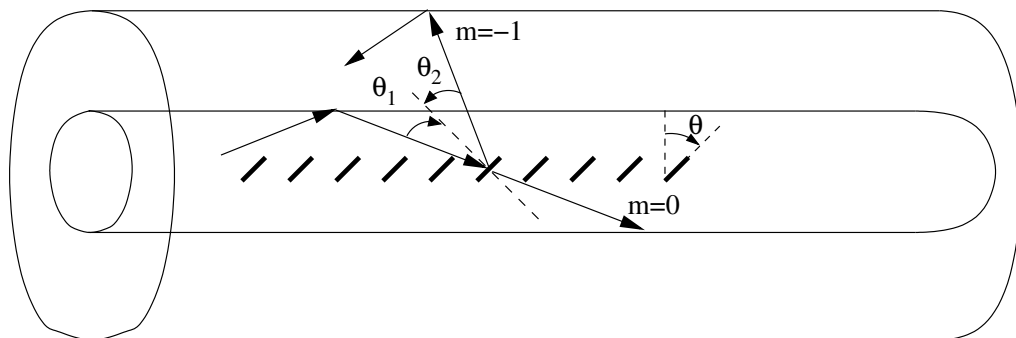
Obr. 1.6: Štruktúra mriežky s dlhou periódou.



Obr. 1.7: (a) Schematický náčrt LPFG, (b) popisuje útlmové pásmo v prenosovom spektre vlnových dĺžok λ_1 - λ_4 ktoré spĺňajú podmienky fázového prispôsobenia [4].

1.4 Naklonená mriežka

Princíp tejto mriežky spočíva v naklonení odrazových rovín vo vlákne o malý uhol Θ k ose optického vlákna. Časť energie, ktorá prichádza na naklonenú mriežku, sa odrazí do jadrového vidu a časť do plášťového. Tieto plášťové vidy následne odvedú dopadajúce žiarenie späť smerom k zdroju. Takto sa v spektre prechádzajúceho žiarenia vytvorí úbytok energie. Znázornenie geometrickej optiky v naklonenej mriežke je na obrázku 1.8.



Obr. 1.8: Znázornenie geometrickej optiky v naklonenej mriežke [5].

2 Typy vláknových mriežok

Táto kapitola sa zaoberá rôznymi typmi Braggových mriežok. Vláknové Braggove mriežky môžeme rozdeliť do viacerých kategórií, ktoré sú odlišné v modulácii indexu lomu a v mriežkovej perióde ako:

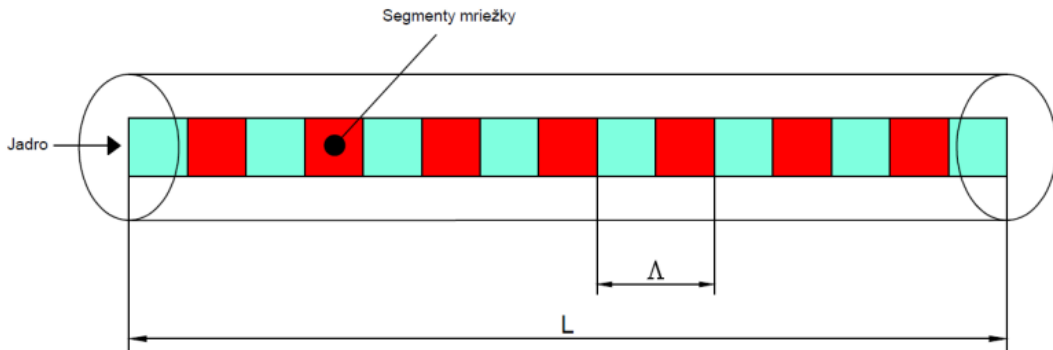
- Rovnomerné FBG
- Apodizované FBG
- Chirpované FBG
- atď.

2.1 Rovnomerné FBG

Rovnomerná vláknová mriežka je mriežka s konštantnou periódou Λ_0 . Vlákná sú posunuté o vzdialenosť Λ_0 a proces sa opakuje pokiaľ nie je vygenerovaný požadovaný počet periód vláknovej mriežky:

$$\Lambda_1 = \Lambda_2 = \dots \Lambda_N = \Lambda_0, \quad (2.1)$$

$$L = \sum_{i=1}^N \Lambda_i \quad (2.2)$$

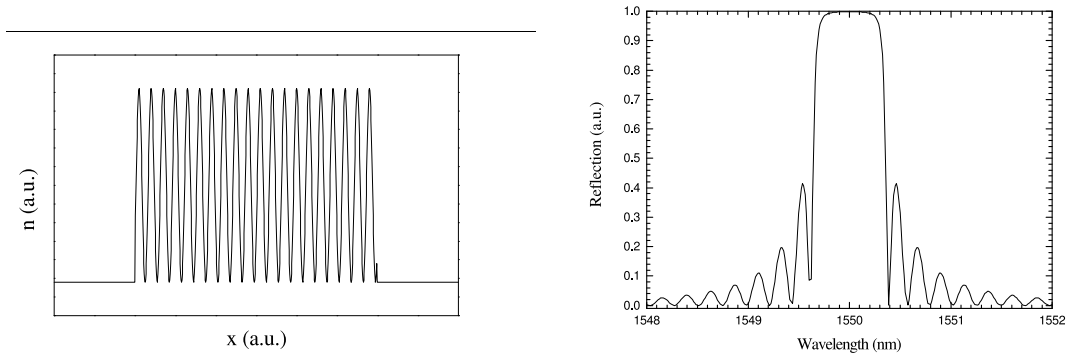


Obr. 2.1: Štruktúra rovnomernej mriežky [5].

Rovnomerná vláknová mriežka má konštantnú amplitúdu a periódu indexu lomu pozdĺž osi vlákna a možno ju opísať pomocou:

$$n(x) = n_0 + \Delta n = n_0 + \delta n \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right) \right], \quad (2.3)$$

kde δn je amplitúda indukovanej poruchy indexu lomu, x je poloha pozdĺž osi vlákna a n_0 je index lomu jadra v optickom vlákne [5, 12].



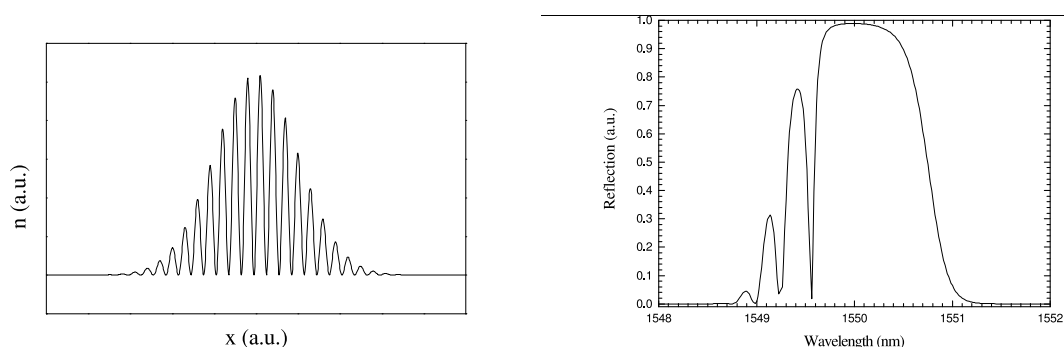
Obr. 2.2: Modulácia indexu lomu a spektrum odrazu rovnomernej mriežky [5].

2.2 Apodizované FBG

Spektrálna charakteristika FBG obsahuje aj nežiadúce postranné zložky, ktoré sa pokúšame potlačiť na čo najmenšiu hodnotu, aby sme zlepšili odstup signál šumu OSNR. Potlačenie postranných zložiek, ktoré sa vyskytujú na oboch stranách FBG, dosiahneme pomocou apodizácie [13]. Potlačenie postranných zložiek postupne zvyšuje koeficient naviazania v smere „do“, a znižuje v smere „z“. Apodizáciu si môžeme teda predstaviť ako zmenu hĺbky modulácie pozdĺž mriežky. Postranné zložky sa objavujú v dôsledku zmeny efektívneho indexu lomu v dôsledku poruchy vyvolanej UV žiarením. Index lomu pozdĺž optického vlákna môže byť popísaný ako [4, 6]:

$$n(x) = n_0 + \delta n F_{apo}(x) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right) \right], \quad (2.4)$$

kde F_{apo} je apodizačná obálka, δn je zmena indexu lomu a x je súradnica súhlasná s osou vlákna [5].



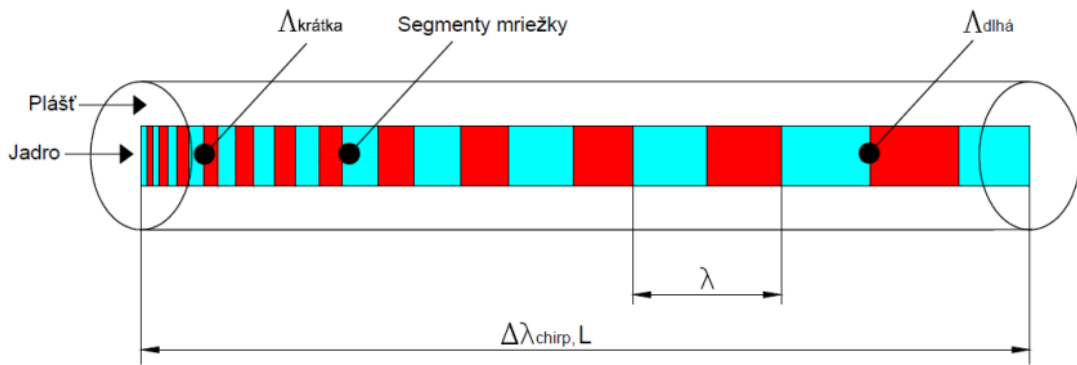
Obr. 2.3: Modulácia indexu lomu a spektrum odrazu apodizovanej mriežky [5].

Použitím vhodného apodizačného profilu vieme teda ovplyvniť tvar spektrálnej charakteristiky mriežky. Profily apodizácie sú:

- Apodizácia Gaussovým profilom
- Apodizácia profilom Tanh
- Apodizácia profilom Sinc
- atď.

2.3 Chirpované mriežky

Znakom chirpovaných mriežok je meniaci sa mriežková perióda. Perióda mriežok môže mať narastajúcu alebo klesajúcu tendenciu. Taktiež môže mať skokovú periódu alebo kvadratickú [6].



Obr. 2.4: Štruktúra Chirpovanej mriežky [5].

Funkcia polohy pre mriežkovú periódu Λ , v chirpovaných mriežkach môže byť vyjadrená ako:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + kz, \quad (2.5)$$

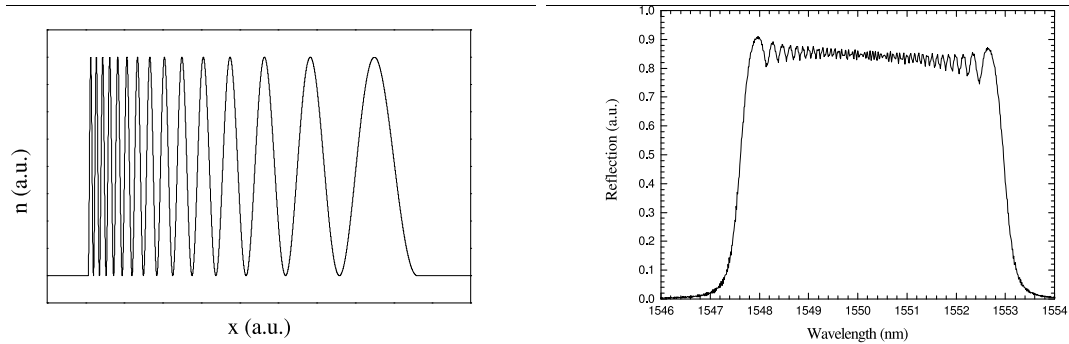
kde Λ_0 je začiatková perióda a k je krok chirpu [4, 5].

Na obr. 2.3 vidieť, že chirp v určitej perióde môže byť premenlivý a pre chirpovanú mriežku ho môžeme definovať ako:

$$\Delta\lambda_{chirp} = 2n_{eff}(\Lambda_{dlhá} - \Lambda_{krátka}), \quad (2.6)$$

kde $\Lambda_{dlhá}$ je pre dlhé chirpované mriežky a $\Lambda_{krátka}$ je pre krátke chirpované mriežky[4].

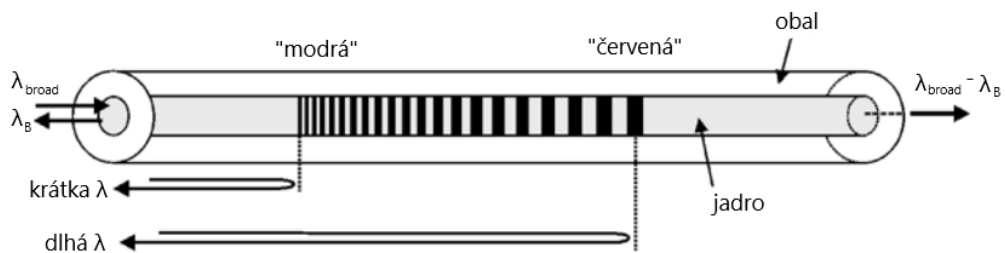
Prechodom signálu cez chirpovanú mriežku dochádza k rôznym oneskoreniam spektrálnych zložiek signálu, pretože spektrálne zložky sú odrazené v rôznych miestach mriežky a prejdú inú vzdialenosť. Dané oneskorenie sa nazýva skupinové oneskorenie [14].



Obr. 2.5: Modulácia indexu lomu a spektrum odrazu chirpovanej mriežky [5].

2.3.1 Kvadratická perióda

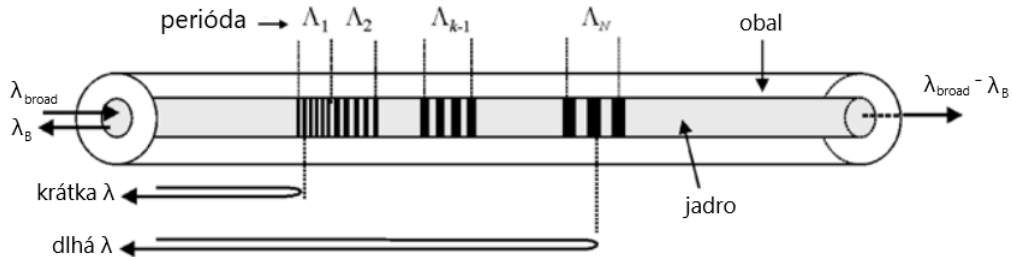
Ak je zmena mriežkovej periódy od jedného konca mriežky do druhý kvadratická, hovoríme o lineárnych chirpovaných mriežkach. V lineárnej mriežke dochádza k približne lineárnemu oneskoreniu priebehu, čo značí veľkú výhodu v oblasti kompenzácie disperzie [14]. Na obr. 2.6 vidieť lineárnu zmenu periódy mriežky.



Obr. 2.6: Štruktúra lineárnej chirpovanej mriežky [14].

2.3.2 Skoková perióda

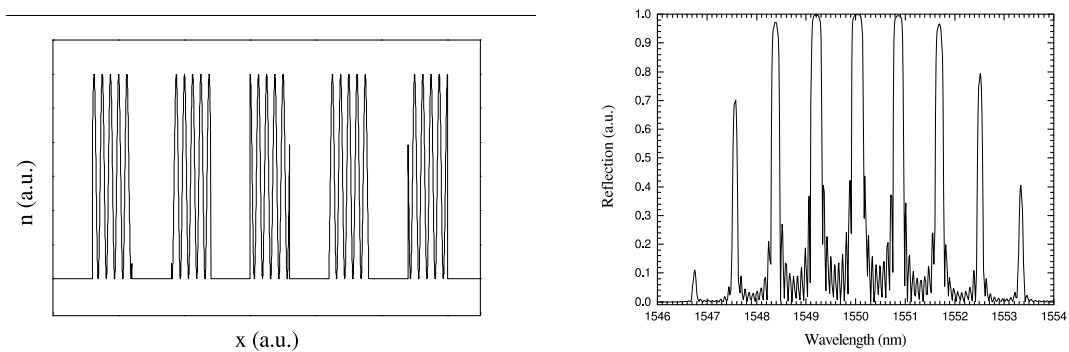
Chirpovaná mriežka so skokovou zmenou sa skladá z väčšieho počtu úsekov a každý jeden úsek má rovnakú periódu a veľkosť zmeny periódy, viz. obr.2.5 [14].



Obr. 2.7: Štruktúra chirpovanej skokovej mriežky [14].

2.4 Vzorkované mriežky

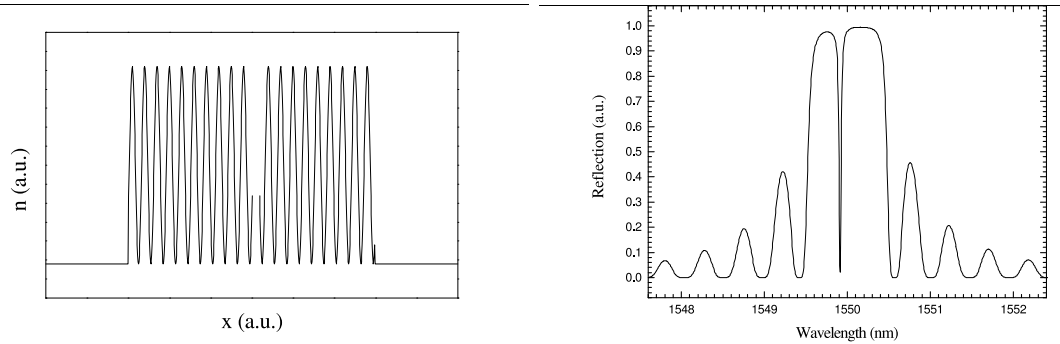
Vzorkovaná vláknová mriežka je v podstate rovnomerná mriežka s indexovou amplitúdou alebo fázou modulovanou štruktúrou s dlhou periódou. Vzniká periodicou moduláciou amplitúdy efektívneho indexu lomu, ktorá je spôsobená násobením dvoch signálov s rôznou frekvenciou [5].



Obr. 2.8: Modulácia indexu lomu a spektrum odrazu vzorkovanej mriežky [5].

2.5 Fázová pauza

Fázová pauza rozdelí mriežku na dve, čím sa vytvoria dve Braggove mriežky, ktoré fungujú ako rezonančná dutina. Fázový posun vytvára úzku prenosovú rezonanciu na vlnovej dĺžke vo vnútri šírky pásma mriežky, ktorá je definovaná polohou fázového posunu a amplitúdou [5].



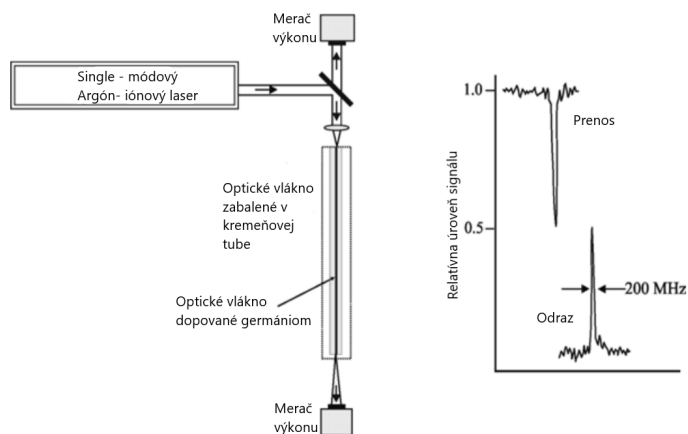
Obr. 2.9: Modulácia indexu lomu a spektrum odrazu fázovej pauzy v mriežke [5].

3 Výroby optických Braggových vlákových mriežok

Táto kapitola popisuje techniky používané pri výrobe Braggových mriežok v optických vláknach. V závislosti od techniky výroby sa delia na interné a externé. Medzi externe vpísané metódy patrí napríklad interferometrická metóda, fázová maska a technika bod po bode [15].

3.1 Interne popísané FBG

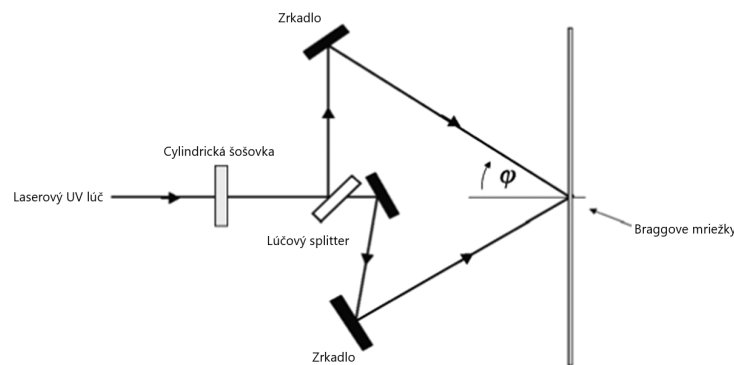
Ako zdroj je použitý argónový iónový laser, ktorý osciloval v jednom pozdĺžnom režime pri 514,5 alebo 488 nm, čím sa exponovalo foto-senzitívne vlákno spojením svetla s jeho jadrom. Izolácia argónového iónového lasera od spätne odrazeného lúča bola nevyhnutná, aby sa predišlo nestabilite. Okrem toho sa pumpový laser a vlákno umiestnili do trubice na tepelnú izoláciu. Dopadajúce svetlo interferovalo so 4 % odrazom, aby spočiatku vytvorilo slabý vzor intenzity stojatej vlny v jadre vlákna. V bodoch vysokej intenzity sa index lomu vo foto-senzitívnom vlákne trvalo zmenil. Takto sa vytvorila porucha indexu lomu, ktorá má rovnakú priestorovú periodicitu ako interferenčný obrazec. Tieto typy mriežok majú zvyčajne veľkú dĺžku (desiatky centimetrov), aby sa dosiahli užitočné hodnoty odrazivosti v dôsledku malých zmien indexu lomu. Metóda je zobrazená na obr. 3.1 [6, 7].



Obr. 3.1: Typický prístroj používaný na generovanie samoindukovaných Braggových mriežok pomocou argónového iónového lasera. V grafe sú zobrazené typické odrazové a priepustné charakteristiky týchto typov mriežok [12].

3.2 Interferometer s deliacou amplitúdou

Táto technika metódy patrí do externého zápisu Braggových mriežok do fotosenzitívnych vlákien. Excimerovo pumpovaný farebný laser pracujúci na vlnovej dĺžke 486-500 nm je znásobený nelineárnym kryštálom a to poskytl zdroj UV žiarenia v pásme 244 nm s primeranou dĺžkou koherencie. UV žiarenie je rozdelené do dvoch lúčov rovnakej intenzity, ktoré boli re-kombinované, aby vytvorili interferenčný obrazec kolmý na os vlákna. Dvojica cylindrických šošoviek zaostrila sveto na vlákno a výsledná ohnisková línia je približne dlhá 4mm a široká $124\mu\text{m}$. Širokopásmový zdroj je tiež použitý v spojení s monochromátorom s vysokým rozlíšením na monitorovanie reflexných a priepustných spektier mriežky [6].



Obr. 3.2: Interferometer s deliacou amplitúdou, kde sa zrkadlo používa na dosiahnutie rovnakého počtu odrazov, čím sa eliminujú rôzne bočné orientácie rušivých lúčov [12].

V bežných interferometroch sa UV laserové svetlo rozdeľuje na dva lúče s rovnakou intenzitou, ktoré sa následne rekombinujú po tom, ako prešli rôznym počtom odrazov v každej optickej dráhe, a preto rušivé lúče nadobúdajú rôzne orientácie. To má za príčinu nízku kvalitu okrajového vzoru pre laserové lúče s nízkou priestorovou koherenciou. Tento problém je možné eliminovať použitím druhého zrkadla do jednej z optických dráh, ako je zobrazené na obr. 3.2. Následne je počet odrazov rovnaký v oboch optických ramenách a oba lúče zasahujúce do vlákna sú identické. Rušivé lúče sú sústredené na tenkú čiaru, ktorá sa zhoduje s jadrom vlákna, pomocou valcovej šošovky nachádzajúcej sa mimo interferometra. Toto vedie k vyššej intenzite v jadre vlákna a následne k lepšiemu zápisu mriežky [3, 6].

Výhodou interferometrickej metódy je schopnosť vložiť optické komponenty do ramien interferometra, čo umožňuje úpravu čiel vln rušivých lúčov. Pri vložení viacerých šošoviek interferometra vznikajú chirpované mriežky. Najväčšou výhodou am-

plitúdovej interferometrickej techniky je schopnosť zapisovať Braggove mriežky pri akejkoľvek požadovanej vlnovej dĺžke. To sa dosiahne pretínajúcim sa uhlom medzi UV lúčmi. Metóda taktiež ponúka flexibilitu pri výrobe mriežok rôznych dĺžok, čo umožňuje výrobu mriežok s rozšírenou alebo zúženou vlnovou dĺžkou [16].

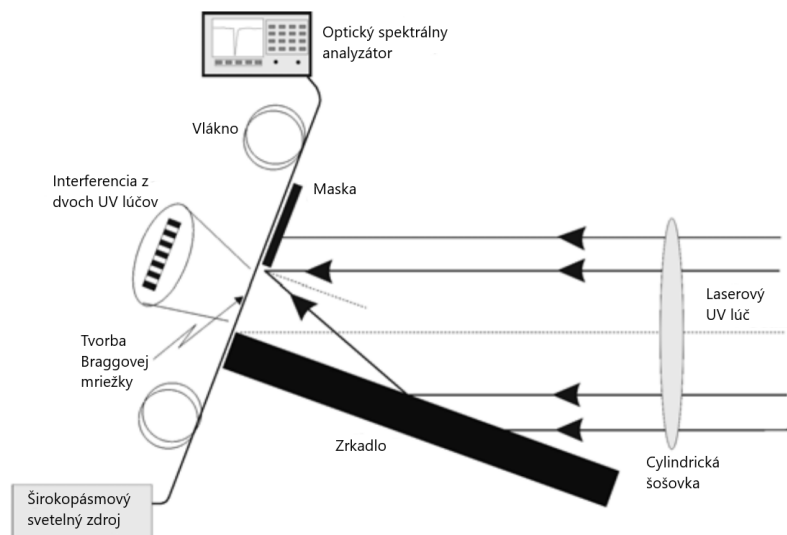
Nevýhodou tejto metódy je náchylnosť na mechanické vibrácie. Submikrónne posuny zrkadiel rozdeľovača lúčov alebo iných optických držiakov v interferometrii počas UV žiarenia spôsobia posun okrajového vzoru, čím sa vymýva mriežka z vlákna. Keďže laserové svetlo prechádza dlhé vzdialenosti, problémom sa môžu stať vzdušné prúdy, ktoré majú za následok ovplyvňovanie indexu lomu, ktorého príčinou môže byť zhoršenie tvorby stabilného okrajového vzoru. Kvalitné mriežky možno vyrobiť len s laserovým zdrojom, ktorý ma dobrú priestorovú a časovú koherenciu, výbornú stabilitu vlnovej dĺžky a stabilitu výstupného výkonu [7].

3.3 Interferometer s rozdeľovaním čela vlny

Tento typ interferometrov nie je tak populárny ako interferometre s deliacou amplitúdou, avšak ponúkajú niektoré užitočné výhody. Na výrobu optických vláknových Braggových mriežok poznáme dva druhy interferometrov s rozdeľovaním čela vlny, a to hranolový a Lloydov interferometer. Výhodou je krátka vzdialenosť, kde sú UV lúče separované, ktorá znižuje skreslenie čela vlny spôsobené prúdmi vzduchu a teplotnými rozdielmi dvoch rušivých lúčov. Nevýhodou tohto systému je obmedzenie dĺžky mriežky, ktorá je obmedzená na polovicu šírky lúča.

3.3.1 Lloydov interferometer

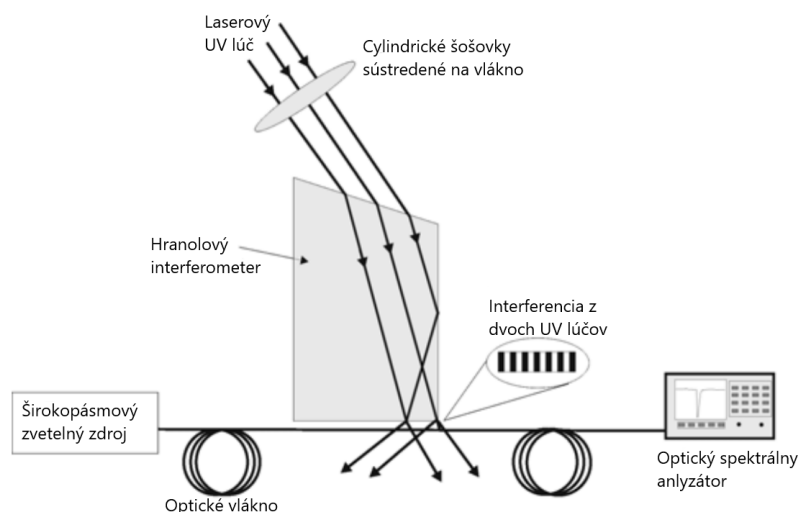
Lloydov interferometer je zložený z dielektrického zrkadla kolmého na vlákno a vedie polovicu UV lúča na toto vlákno. Zapisovací lúč je centrován v priesečníku zrkadlového povrchu a vlákna. Prekrytie odklonených a priamych lúčov vytvára interferenčné prúžky kolmé na os vlákna. Na začiatok sa umiestňuje cylindrická šošovka na zaostrenie okrajového vzoru pozdĺž jadra vlákna. Keďže sa polovica dopadajúceho lúča odráža, interferenčné prúžky sa objavujú v oblasti dĺžky rovnajúcej sa polovici šírky lúča. Preto je vyžadovaný zdroj s koherentnou dĺžkou rovnajúcou sa minimálne rozdielu dráhy zavedenému záhybom lúča inak by okrajový vzor, a tým aj vpísaná mriežka neboli jednotné.



Obr. 3.3: Schéma Lloydovho interferometra s rozdeľovaním čela vlny [12].

3.3.2 Hranolový interferometer

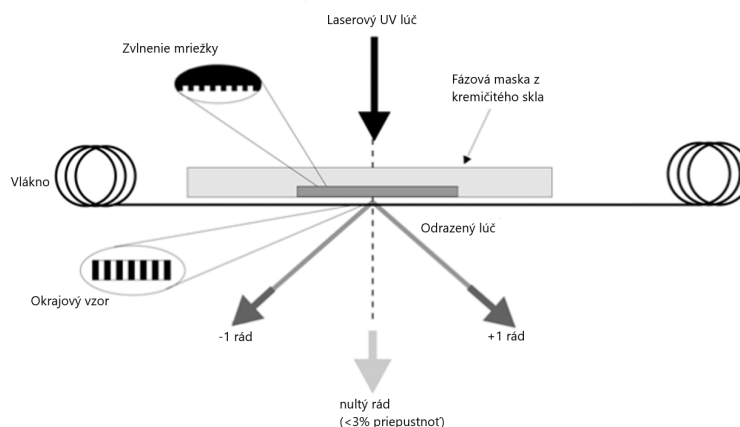
Prenosové vlastnosti hranolu sú dobré, nakoľko je vyrobený z vysoko homogénneho, ultrafialového, taveného oxidu kremičitého. UV lúč je rozpoltený hranou hranola a polovica lúča je priestorovo prevrátená totálnym vnútorným odrazom od tváre hranola. Dve polovice lúča sa opäť skombinujú na výstupnej ploche hranola a vzniká okrajový vzor rovnobežný s jadrom fotosenzitívneho vlákna.



Obr. 3.4: Schéma hranolového interferometra s rozdeľovaním čela vlny [12].

3.4 Metóda fázovej masky

Technika fázovej masky patrí medzi jednu z najúčinnějších metód na zapisovanie Braggových mriežok do fotocitlivého vlákna. Metóda využíva difrakčný optický prvok (fázová maska) na priestorovú moduláciu UV zapisovacieho lúča. Tieto fázové masky môžu byť vytvorené pomocou elektrónovej litografie alebo holograficky. Fázové masky, ktoré sú indukované holograficky nemajú žiadnu chybu stežu, ktoré sú prítomné vo fázových maskách s elektónovým lúčom. Masky vyrobené elektrónovým lúčom možno zapísať komplikované vzory ako napr. kvadratický chirp. Mriežka fázovej masky má jednorozmernú povrchovú reliéfnu štruktúru vyrobenú vo vysoko-kvalitnom plochom materiály z kremíku, ktorý je priehľadný pre UV zapisovací lúč [5, 6].

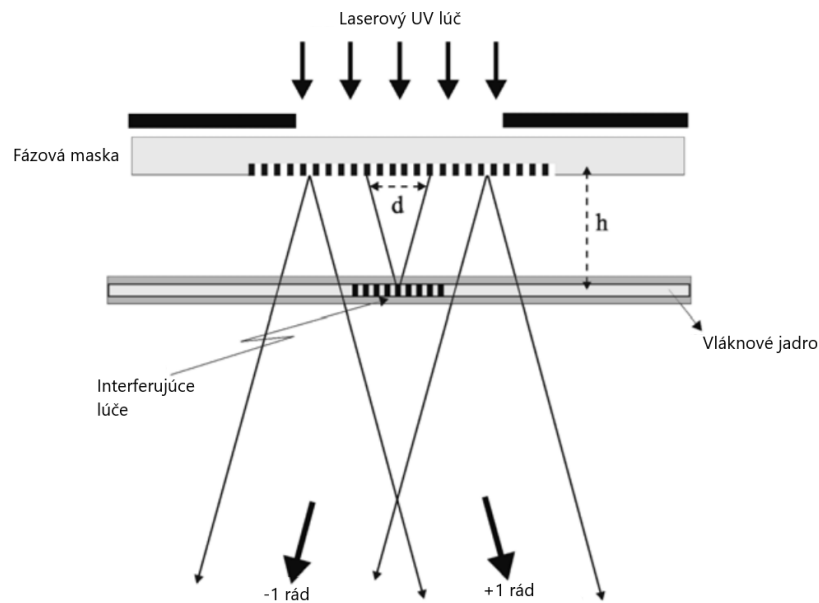


Obr. 3.5: Geometria fázovej masky na vpisovanie Braggových mriežok do optických vlákien [12].

Profil periodických povrchových reliéfnych mriežok je zvolený tak, že UV lúč dopadá na fázovú masku a difraktovaný lúč nultého rádu je potlačený na menej percent prenášaného výkonu (5 %). Navyše difrakčné plus a mínus prvých rádo sú maximalizované a zvyčajne každý obsahuje viac ako 35 % prenášaného výkonu. Interferenciou plusových a mínusových difraktovaných lúčov prvého rádu vzniká obrazec okrajov blízkeho poľa. Perióda okrajov je polovičná ako u masky. Interferenčný obrazec fotoimprintuje moduláciu indexu lomu do jadra fotosenzitívneho optického vlákna umiestneného v tesnej blízkosti za fázovou maskou [6].

Použitím valcovej šošovky možno zaostriť okrajový vzor pozdĺž jadra vlákna. Fázová maska znižuje zložitosť výroby FBG. Umiestnenie vlákna tesne za fázovou maskou v blízkom poli difrakčných UV lúčov minimalizuje problémy so stabilitou

teda citlivosťou na mechanické vibrácie. Zdroje UV lasera majú zvyčajne nízku časovú a priestorovú koherenciu. Nízka časová koherencia neovplyvňuje schopnosť zápisu. Nízka priestorová koherencia vyžaduje umiestnenie vlákna v blízkom kontakte s mriežkou na fázovej maske a to z toho dôvodu, aby bola vyvolaná maximálna modulácia indexu lomu. Čím je vlákno ďalej od fázovej masky, tým je indukovaná modulácia indexu nižšia, čo spôsobuje nižšiu odrazivosť Braggových mriežok [17, 16].



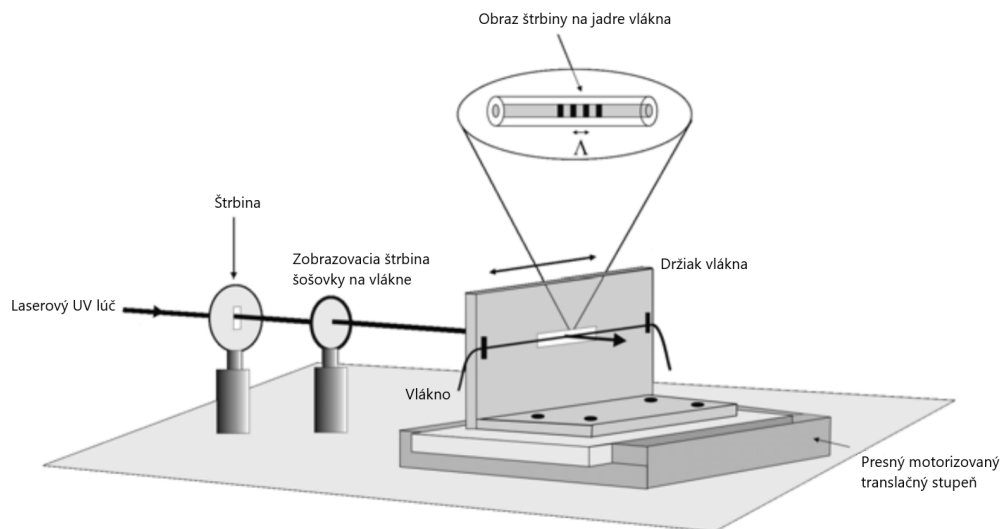
Obr. 3.6: Jednoduchá schéma geometrie fázovej masky na vpísanie Braggových mriežok v optickom vlákne. Difrakčné lúče prvého rádu plus a mínus interferujúce vo vlákne jadra, umiestnené vo vzdialenosti h od masky [12].

Prenášané plus a mínus prvých rádo, ktoré zasahujú do vytvárania okrajového vzoru na vlákne, vychádzajú z rôznych častí masky. Keďže vzdialenosť vlákna od fázovej masky je identická pre dva interferujúce lúče, požiadavka na časovú koherenciu nie je kritická pre vytvorenie vysoko-kontrastného okrajového vzoru. Ak sa vzdialenosť h zväčšuje, zväčšuje sa aj vzdialenosť d medzi dvoma rušivými lúčmi vychádzajúcimi z masky. Tým je požiadavka na dobrú priestorovú koherenciu kritická, preto je nutné dodržiavať vhodnú vzdialenosť. Taktiež ak nie je lúč nultého rádu potlačený, dôjde k interferenciám medzi difraktovanými lúčmi 0 a 1 rádu. V tomto prípade sa interferenčný obrazec zmení ako funkcia oddelenia masky medzi vláknami a výsledkom budú okraje, ktoré sa menia od polovice periódy fázovej masky po jednu periódu masky [7, 9].

3.5 Metóda bod po bode

Výroba Braggových mriežok technikou bod po bode sa dosiahne vyvolaním zmeny indexu lomu krok za krokom pozdĺž jadra vlákna. Jediný sústredný impulz z excimerového lasera vytvára každú mriežkovú rovinu samostatne. Cez masku obsahujúcu štrbinu prechádza jediný impulz UV svetla z excimerového lasera. Na jadre optického vlákna zobrazuje štrbinu zaoštrovací šošovka. Index lomu jadra sa zvyšuje v oblasti ožiareného vlákna. Vlákno sa následne posúva o vzdialenosť zodpovedajúcu rozostupu mriežky v smere rovnobežne s osou vlákna a proces sa následne opakuje pokiaľ sa nevytvorí mriežková štruktúra v jadre optického vlákna [5, 7].

Hlavnou výhodou techniky bod po bode je v jej flexibilita pri zmene parametrov Braggovej mriežky. Keďže je mriežková štruktúra zostavená po bodoch je možné ľahko začleniť odchýlky v dĺžke mriežky, rozstupe mriežky a spektrálnu odozvu. Jednoduchým zvýšením množstva translácie vlákna pri každom ožiarení môžu byť vyrobené chirpované mriežky. Jednou nevýhodou techniky bod po bode je zdĺhavosť procesu. V dôsledku tepelných vplyvov alebo malých zmien v napnutí vlákna môžu nastať chyby v rozstupe mriežok. Toto omeďzuje mriežky na veľmi krátke vzdialenosti [6, 16].



Obr. 3.7: Schéma nastavenia výroby Braggových mriežok pomocou techniky bod po bode [12].

4 Teplota v FBG

Táto kapitola popisuje citlivosť Braggovej vláknovej mriežky na deformáciu a teplotu. Následne si popísaná kompenzácia teplotnej odchýlky v FBG pomocou atermálneho balíčka a využitie FBG ako senzory. Teplotná citlivosť patrí medzi jeden z najdôležitejších parametrov, ktorý vplýva na zmenu indexu lomu.

4.1 Citlivosť vlákna na deformáciu a teplotu

Vlnová dĺžka Braggovej mriežky závisí od periodicity, rozostupu mriežok alebo efektívneho indexu lomu jadra vo vlákne. Pôsobením zmeny teploty alebo mechanickým namáhaním, ktoré pôsobí na FBG štruktúru dochádza k zmene Braggovej vlnovej dĺžky. Zmenu Braggovej vlnovej dĺžky v dôsledku deformácie a teploty možno napísať ako [18]:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right] \Delta l + 2 \left[\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right] \Delta T, \quad (4.1)$$

Prvý člen značí deformačný efekt a druhý člen teplotnú efektivitu. V dôsledku deformačného efektu možno posun vlnovej dĺžky zapísať ako [19]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \varepsilon_{axis}, \quad (4.2)$$

kde p_e značí efektívnu deformačnú optickú konštantu, ktorá je daná vzťahom:

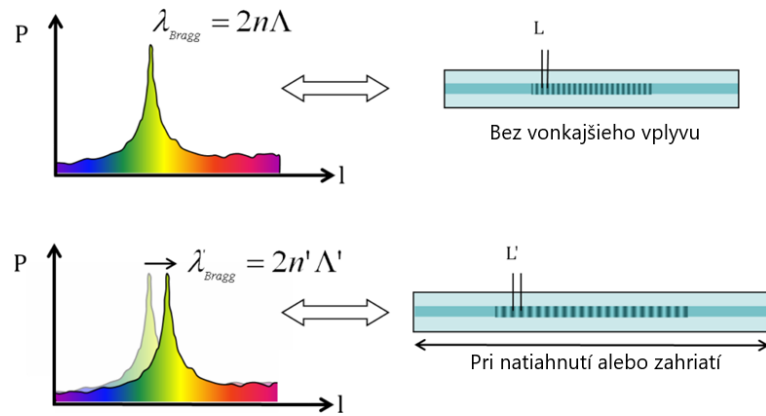
$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{12} - \sigma (p_{11} + p_{12})), \quad (4.3)$$

kde p_{11} a p_{12} značia koeficienty deformácie optického senzora a σ značí Poissonov pomer.

Druhý člen označujúci teplotnú rozťažnosť a jeho posun vlnovej dĺžky možno zapísať ako:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\beta + \zeta) \Delta T, \quad (4.4)$$

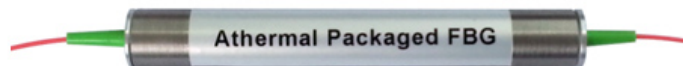
kde β značí koeficient teplotnej rozťažnosti a ζ je koeficient teplotnej optiky [18].



Obr. 4.1: Vplyv teploty a namáhania na FBG [20].

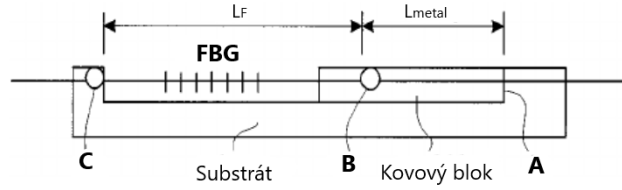
4.2 Atermálny balíček FBG

Na kompenzáciu teplotnej odchýlky vo vlákniatej Braggovej mriežke sa využíva atermálny balíček s kovovým povlakom. Tento kovový povlak je na optickom vlákne bezprúdovo pokovovaný, aby fungoval ako tepelný kompenzátor na udržanie stability vlnovej dĺžky. Atermálny balíček poskytuje takmer nulový posun Braggovej vlnovej dĺžky.



Obr. 4.2: Atermálny balíček FBG [21].

Atermálne balíčky obsahujú prostriedky na stláčanie FBG, pokým optické vlákno zažíva zvýšenie teploty. Poznáme dva typy týchto zariadení. Prvé zariadenie, ktoré je zobrazené na obr.4.3 má v oblasti A kovový blok spolu so substrátom. FBG je následne prilepené k bodom B a C kovového bloku a substrátu. Nakoľko je koeficient teplotnej rozťažnosti substrátu nižší ako koeficient rozťažnosti kovového bloku, možno zanedbať tepelný účinok podkladu. Zmenou okolitej teploty bude kovový blok poskytovať tepelno kompenzačné účinky tým, že vyvolá negatívne napätia na FBG, čo vedie k zmene hodnoty napätia [22].



Obr. 4.3: Prvé zariadenie na tepelnú kompenzáciu [22].

Nakoľko je plocha prierezu kovového bloku a substrátu väčšia ako plocha prierezu optického vlákna, možno aximálne mechanické napätie vyvolávané bimateriálovým zariadením, kde sa teplota mení, vyjadriť ako:

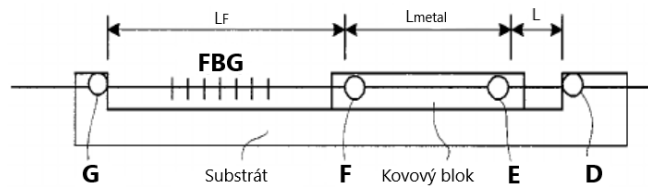
$$\varepsilon_{axis} = \frac{L_{metal}}{L_F} \alpha_{metal} \Delta T, \quad (4.5)$$

kde L_{metal} a L_F sú dĺžky kovového bloku a vlákna a α_{metal} je koeficient teplotnej rozťažnosti kovového bloku.

Druhé zariadenie na kompenzáciu teplotnej odchýlky (obr.4.4) má n rozdiel od prvého zariadenia kovový blok, ktorý nie je pripevnený v substráte. FBG je pripevnené k bodom D, F, E a F substrátu a kovového bloku. Preto aximálne mechanické napätie vyvolávané bimateriálovým zariadením, kde sa teplota mení, sa vyjadri ako [22]:

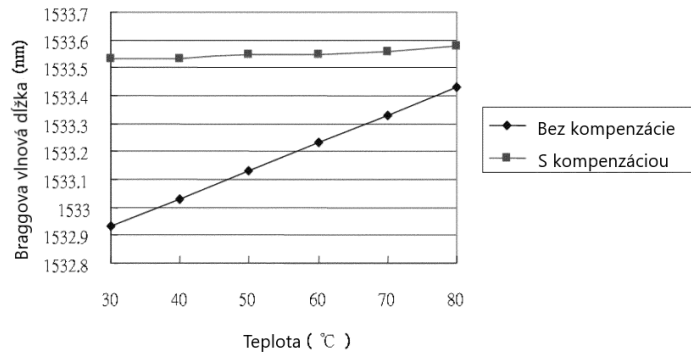
$$\varepsilon_{axis} = \frac{L_{metal}}{L_F + L} \alpha_{metal} \Delta T, \quad (4.6)$$

kde L_{metal} a L_F sú dĺžky kovového bloku a vlákna, L je dĺžka medzi zlepenými bodmi E a D. α_{metal} je koeficient teplotnej rozťažnosti kovového bloku.



Obr. 4.4: Druhé zariadenie na tepelnú kompenzáciu [22].

Na obrázku 4.4 vidieť graf znázorňujúci závislosť Braggovej vlnovej dĺžky na teplote. Bez použitia atermálneho balíčka vidíme, že s narastajúcou teplotou sa vlnová dĺžka zvyšuje. Naopak s použitím atermálneho balíčka vidíme, že vlnová dĺžka sa s narastajúcou teplotou takmer nemení.



Obr. 4.5: Braggova vlnová dĺžka s teplotnými zmenami v teplotnom kompenzačnom balíku [23].

4.3 FBG ako senzor

Senzory sú založené na meraní Braggových vlnových dĺžkach, aby sa určili účinky teploty a napätia, ktoré pôsobia na špeciálne upravenú časť jadra vlákna. Vhodnou úpravou púzdra senzora a nakalibrovaní je následne možné pomocou FBG merať teplotu, tlak, ťah, mechanické deformácie, vibrácie, náklon, zrýchlenie a pod. Tieto senzory môžu byť prevádzkované vo veľmi širokom rozsahu teplôt. Hlavnou výhodou je, že nie sú citlivé na elektromagnetické rušenie a môžu byť použité aj vo výbušných prostrediach. Medzi ďalšie výhody patria napríklad malé rozmery, nízka hmotnosť, vysoká citlivosť a dlhodobá stabilita. Platí, že pokiaľ je FBG použité na akékoľvek iné veličiny ako je teplota, je dôležité zabezpečiť teplotnú kompenzáciu [24, 25].

4.3.1 Teplotné senzory

Teplotné senzory sú vďaka malým rozmerom možné implementovať do injekčných ihl. Závislosť teploty a vlnových dĺžok je takmer lineárna. Pomocou kalibrácie je chyba merania konštantná v celom meracom rozsahu. Pri použití akrylátových vlákien sa rozsahy meraných teplôt pohybujú od -40°C do 100°C a pri použití vlákien s polyimidovou primárnou ochranou -40°C až 250°C . Pri meraní teplôt vyšších ako 500°C treba použiť špeciálne upravené senzory. Presnosťou interrogátora je zabezpečená aj presnosť merania, ktorá sa pohybuje v rádovo desatinách $^{\circ}\text{C}$. V betónových

a železobetónových konštrukciách je významné meranie gradientnej teploty. Na obr.4.6 môžeme vidieť teplotný FBG senzor v nerezovom púzdre. Na obr. 4.7 je ukážka gradientného teplotného senzora, ktorý pozostáva z dvoch meracích, vzájomne tepelne izolovaných bodov, vzdialených pár centimetrov a vďaka tomu je

možné merať gradient teploty [26, 25] .



Obr. 4.6: Teplotný FBG senzor v nerezových puzdrách [26].



Obr. 4.7: Gradientný teplotný senzor [26].

4.3.2 Ťahové senzory

Ťahové senzory sa používajú na meranie zmeny dĺžky betónových, železobetónových alebo kovových konštrukcií. Fyzická dĺžka udáva presnosť týchto senzorov, ktorá sa pohybuje od desiatín až po jednotky mikrometrov. Tým je možné merať veľmi malé zmeny dĺžok [26].



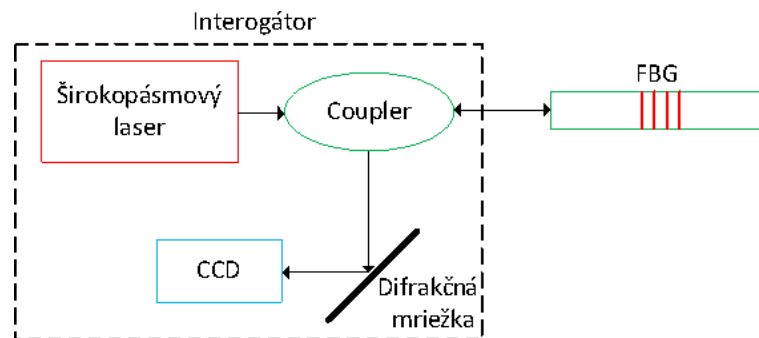
Obr. 4.8: Ťahový FBG senzor [26].

4.3.3 FBG interrogátory

Sú to zariadenia, ktoré slúžia k vyhodnocovaniu signálu zo sensorov, ktoré sú založené na báze FBG. FBG interrogátory majú vlastný zdroj optického žiarenia, ako napr., širokospektrálny zdroj ASE alebo S-LED. Tento zdroj svetla sa prostredníctvom cirkulátora šíri smerom k FBG sensorom. Optický signál sa na tejto vlnovej dĺžke odraža na základe použitej FBG mriežky. Následne sa tento odrazený signál vyhodnocuje v interrogačnej jednotke na fotodetektoroch alebo CCD snímačoch. Na použitie viacerých FBG snímačov za sebou alebo paralelne možno použiť vlnový multiplex. Každá FBG má svoju vlnovú dĺžku a vďaka tomu je možné umiestnenie mriežok za sebou v ľubovoľnom rozstupe a ich maximálny počet je obmedzený spektrálnym rozsahom interrogátora a meracom rozsahu senzora. Aby nedochádzalo k ich vzájomnému prekryvaniu je nutné dodržiavať spektrálny rozstup mriežok [26].

FBG interrogátor s CCD snímačom

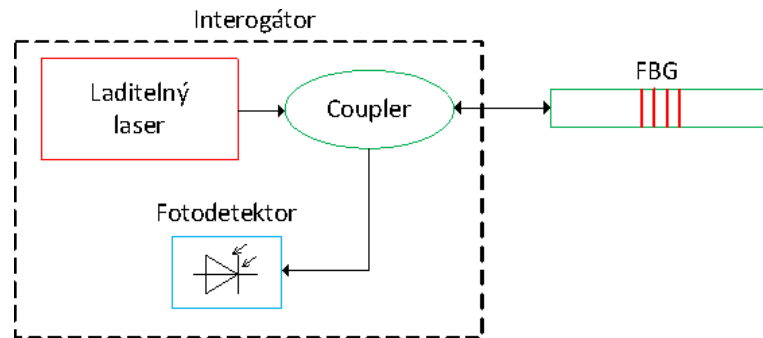
V interrogátore s CCD snímačom je využívaný širokospektrálny optický zdroj svetla, ktorého signál sa šíri prostredníctvom distribučnej infraštruktúry. Signál, ktorý je odrazený od FBG dopadá na disperzný prvok, ktorý odraža zložky dopadajúceho žiarenia na rôzne polohy CCD snímača. Následne táto poloha určuje konkrétnu vlnovú dĺžku FBG mriežky. Táto metóda nedosahuje dobré rozlíšenie, presnosť a odstup signálu od šumu. Naopak dosahuje pomerne rýchle meranie všetkých FBG mriežok (OSNR) [26].



Obr. 4.9: FBG interrogátor s CCD snímačom [26].

FBG interrogátor s laditeľným laserom a fotodetektorom

V FBG interrogátore s laditeľným laserom a fotodetektorom je zlepšené OSNR na základe toho, že laser koncentruje energiu do úzkeho zväzku. Úzkopásmový signál je preladovaný v celom rozsahu vlnových dĺžok a synchronne s tým sú odrazené signály z FBG mriežok detekované fotodetektormi. Optický signál s maximálnou intenzitou dopadá na fotodetektor pokiaľ sa vlnová dĺžka laditeľného lasera zhoduje s Braggovou vlnovou dĺžkou FBG mriežky. Týmto spôsobom je zmeraná celá výkonová odozva, ktorá svojím tvarom korešponduje so spektrálnym profilom FBG mriežky. Výhodou je veľký výkon lasera, vďaka ktorému dosahujú interrogátory veľký dynamický rozsah [26].



Obr. 4.10: FBG interrogátor s laditeľným laserom a fotodetektorom [26].

5 Meranie rovnomerných FBG mriežok

V tejto kapitole sú popísané výsledky meraní štyroch rovnomerných FBG mriežok, z ktorých tri boli zaťažované tlakom a jedna bola vystavená rôznym teplotám. Ďalej boli robené merania na FBG posuvnom senzore. Nakoniec boli odčítané hodnoty OSNR a spektrálna šírka všetkých meraných mriežok.

5.1 Meranie tlaku pôsobiaceho na FBG mriežky

V tomto meraní bolo použité optické vlákno, ktoré obsahovalo štyri rovnomerné FBG mriežky, ktoré boli následne zapojené do prístroja NWG-FBG-INTERROGATOR. Tento princíp fungovania je popísaný v kapitole 4. Každá mriežka mala vlastnú vlnovú dĺžku. Prvé tri mriežky boli využité na meranie závislosti vlnovej dĺžky pri zmenách tlaku vyvíjaného na dané mriežky. Dané mriežky boli umiestnené pod špeciálnou podložkou, ktorá slúžila ako ochrana pred poškodením vlákna pri zmenách tlaku. Tlak bol vyvíjaný pomocou závaží, ktoré mali hmotnosť 2, 4, 6 a 10 kg. Pre správne vyjadrenie závislosti bolo potrebné vypočítať hodnotu tlaku v Pa (Pascal) pre jednotlivé závažia pomocou vzťahu:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S}, \quad (5.1)$$

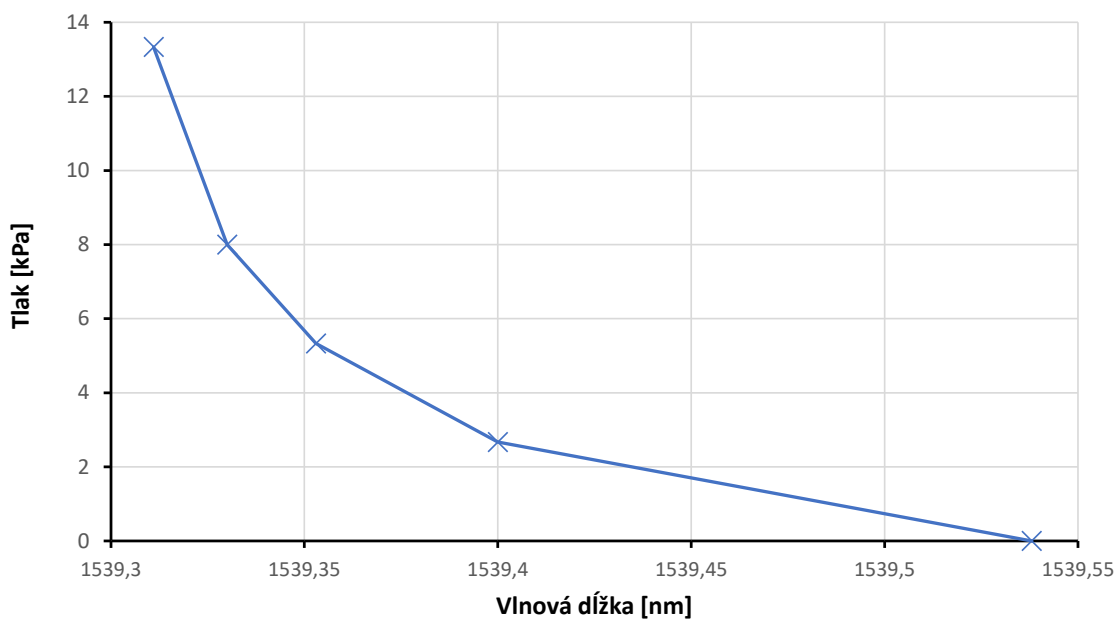
kde m značí hmotnosť použitého závažia, g gravitačné zrýchlenie a S značí plochu závažia.

Vzorový výpočet tlaku

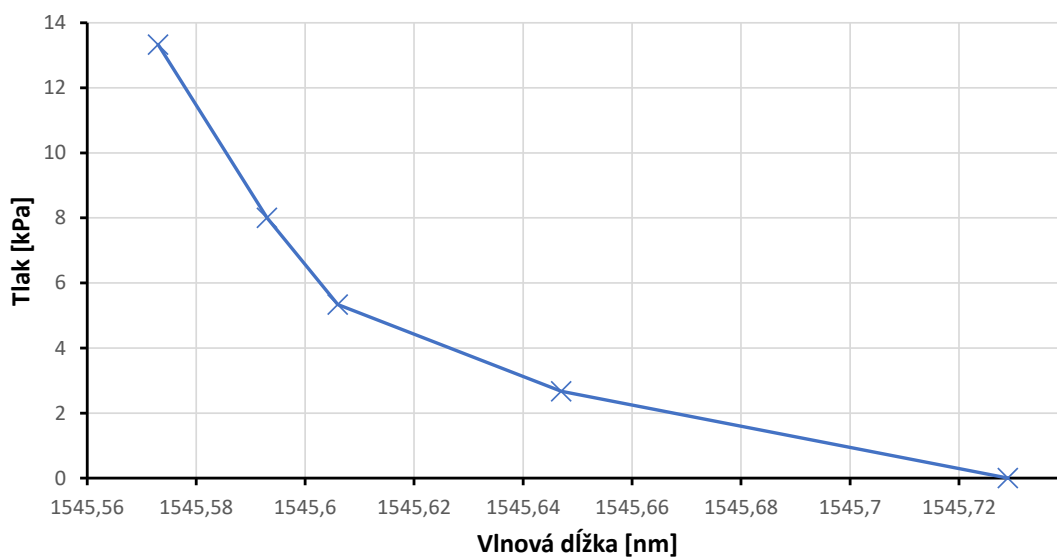
- hmotnosť závažia $m = 2\text{kg}$
- priemer závažia $d = 9,8\text{cm} = 0,098\text{m}$
- gravitačné zrýchlenie $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$

$$P = \frac{m \cdot g}{\pi \cdot r^2} = \frac{2 \cdot 9,80665}{\pi \cdot 0,049^2} = 2,6 \cdot 10^3 \text{ Pa} \quad (5.2)$$

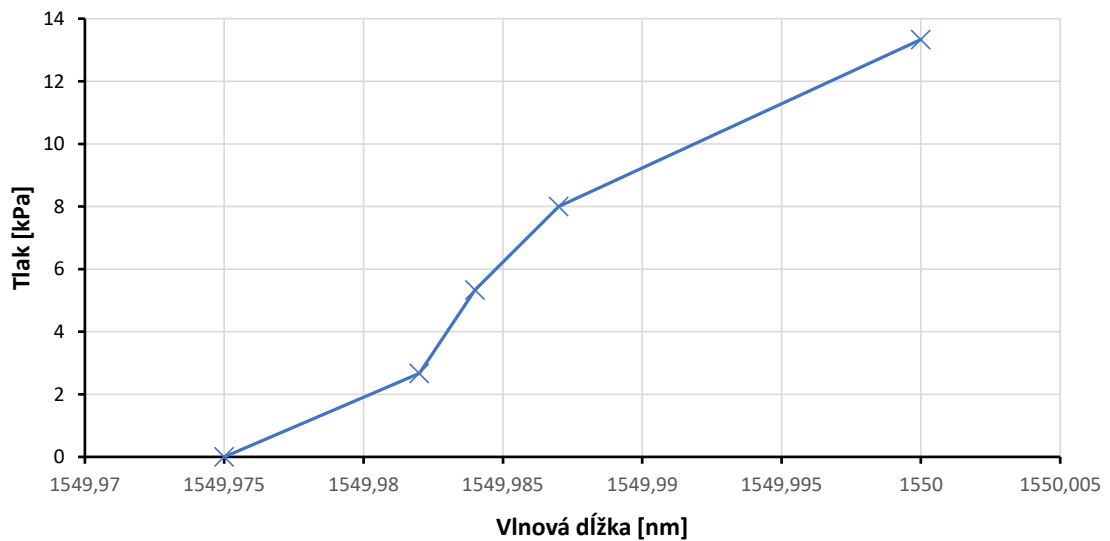
Na grafoch nižšie je zobrazená závislosť vlnovej dĺžky pri meniacom sa tlaku, ktorý bol vyvíjaný na jednotlivé mriežky. Vlnová dĺžka 1. a 2. mriežky klesala zväčšujúcim sa tlakom a priebeh mal exponenciálny tvar. Vlnová dĺžka 3. mriežky narastala zväčšujúcim sa tlakom.



Obr. 5.1: Graf 1. mriežky s vlnovou dĺžkou 1539,54 nm.



Obr. 5.2: Graf 2. mriežky s vlnovou dĺžkou 1545,73 nm.

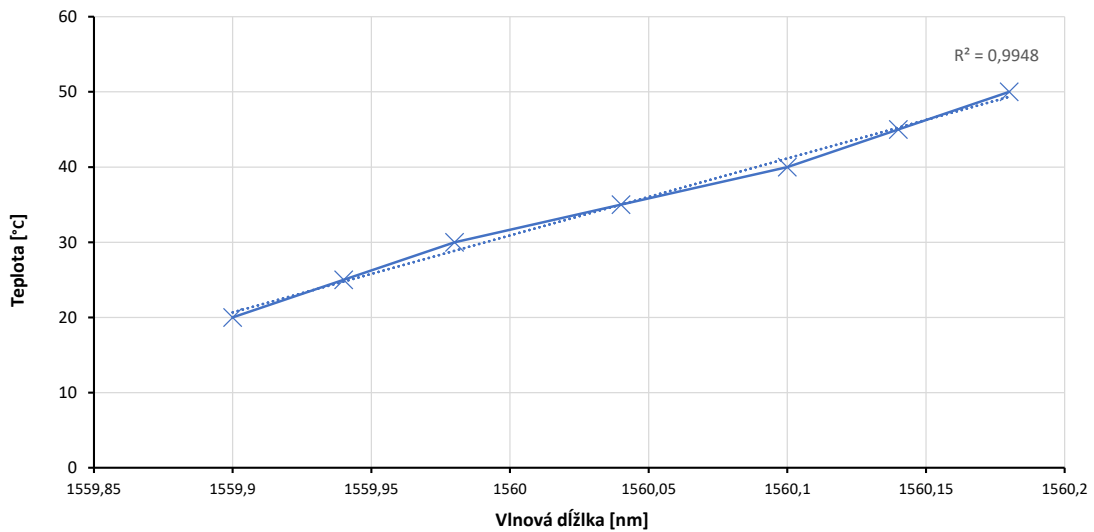


Obr. 5.3: Graf 3. mriežky s vlnovou dĺžkou 1549,98 nm.

5.2 Meranie teploty pôsobiacej na FBG mriežky

V meraní bola použitá 4. mriežka s vlnovou dĺžkou 1559,9 nm a podobne ako v predchádzajúcom meraní bol použitý prístroj NWG-FBG-INTERROGATOR. Optické vlákno s danou mriežkou bolo ponorené do kvapaliny s určitou teplotou. Prvá hodnota vlnovej dĺžky bola zistená pri teplote 50°C. Ďalšie hodnoty vlnových dĺžok boli zaznamenané pri každom poklese teploty kvapaliny o 5°C. Meranie bolo ukončené pri 20°C (izbová teplota), pri ktorej bola nameraná hodnota vlnovej dĺžky 1559,9 nm. Táto hodnota sa zhodovala s vlnovou dĺžkou mimo kvapaliny.

V grafe na obr. 5.4 je zobrazená výsledná závislosť vlnovej dĺžky na teplote. Pribeh tejto závislosti je takmer lineárny.

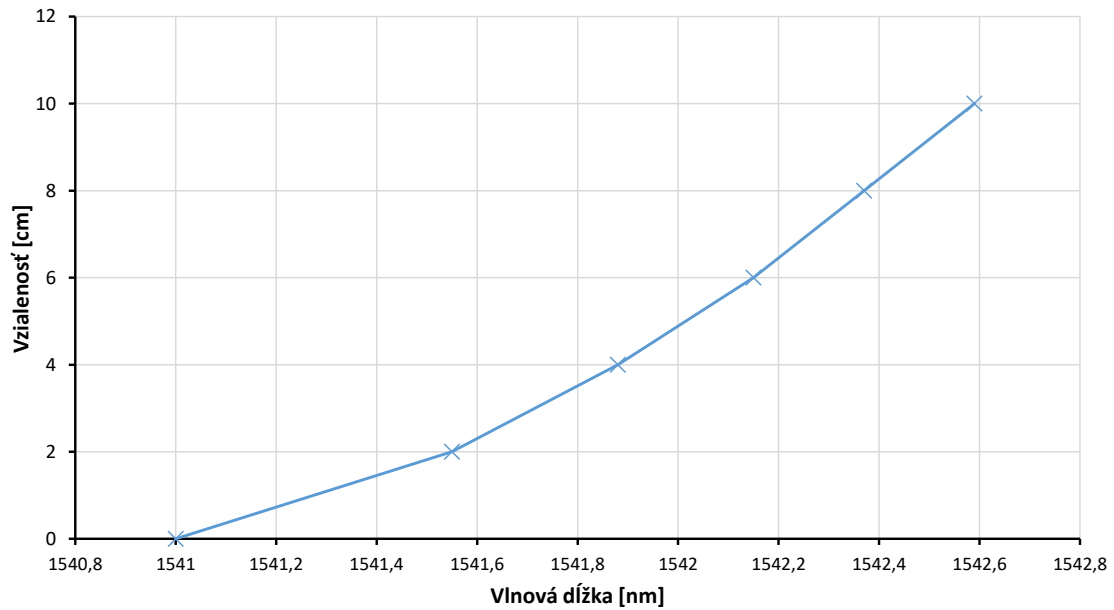


Obr. 5.4: Graf teplotnej závislosti v 4. mriežke.

5.3 Meranie senzora posunu FBG

V tomto meraní bol použitý Displacement Sensor DS-01, ktorý obsahoval dve rovnomerné FBG mriežky s vlnovými dĺžkami 1541 a 1548 nm s možnosťou posunu 0 - 10 cm. Tento senzor slúži na meranie vzdialenosti na základe posunu vlnovej dĺžky, ktorého princíp fungovania je popísaný v kapitole 4. Následne bol tento senzor zapojený do prístroja NWG-FBG-INTERROGATOR. Meranie prebiehalo posunom senzora po 2 cm až to maxima (10 cm). Vlnová dĺžka mriežky s hodnotou 1548 nm bola nemenná viz obr. 5.7. Posun vlnovej dĺžky prebiehal v mriežke s hodnotu 1541 nm.

V grafe na obr. 5.5 je zobrazená výsledná závislosť vlnovej dĺžky na posune FBG posunového senzora. Posunom narastala hodnota vlnovej dĺžky.



Obr. 5.5: Závislosť zmeny vlnovej dĺžky posuvným sensorom.

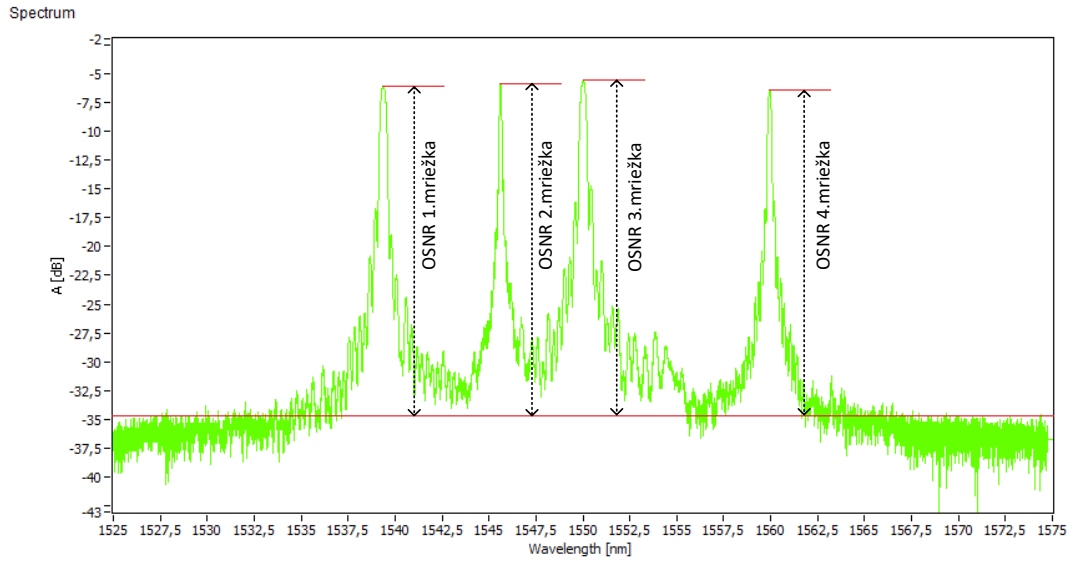
5.4 Meranie parametrov FBG mriežok

V tomto meraní boli zmerané OSNR jednotlivých mriežok a taktiež ich spektrálne šírky. Tieto parametre boli merané pre rovnomerné FBG mriežky z predošlých podkapitol o meraní tlaku, teploty a senzoru posunu.

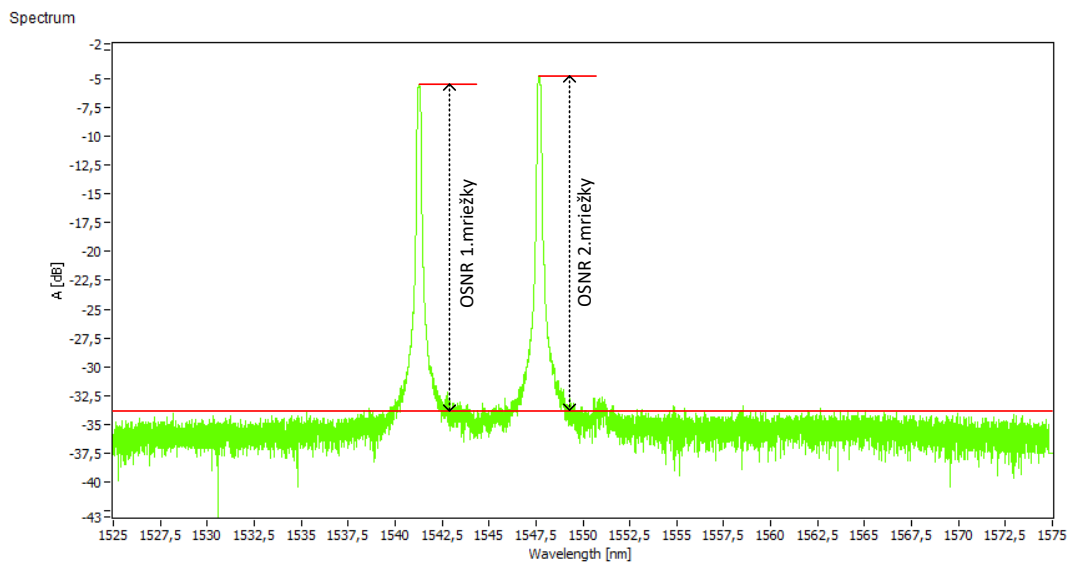
Parameter OSNR (optical signal to noise ratio)

OSNR vyjadruje rozdiel úrovne signálu od šumu a vieme ho vyjadriť ako:

$$OSNR = A_{signal,dB} - A_{noise,dB}, \quad (5.3)$$



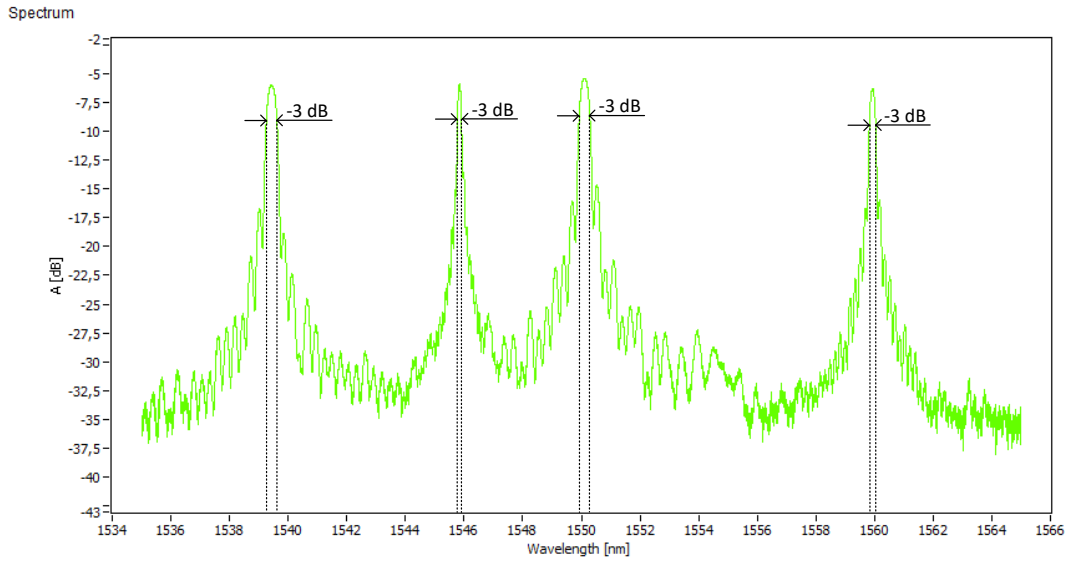
Obr. 5.6: OSNR parametre jednotlivých rovnomerných FBG mriežok.



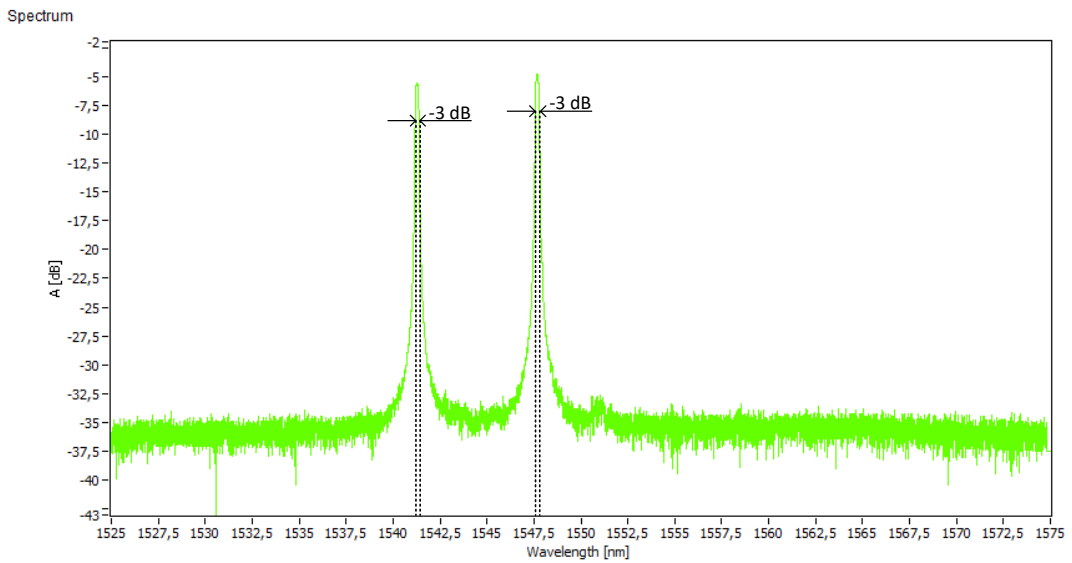
Obr. 5.7: OSNR parametre jednotlivých rovnomerných FBG mriežok v senzore posunu.

Spektrálna šírka

Spektrálna šírka je vlnová dĺžka intervalu v ktorom výkon klesne o menej ako polovicu (maximálne -3 dB).



Obr. 5.8: Spektrálna šírka jednotlivých rovnomerných FBG mriežok.



Obr. 5.9: Spektrálna šírka jednotlivých rovnomerných FBG mriežok v senzore posunu.

Tabuľka parametrov FBG mriežok

Nižšie uvedená tabuľka obsahuje parametre OSNR a spektrálnu šírku všetkých rovnomerných FBG mriežok, ktoré boli použité pri meraniach. Všetky hodnoty sú odčítané z vyššie uvedených grafov.

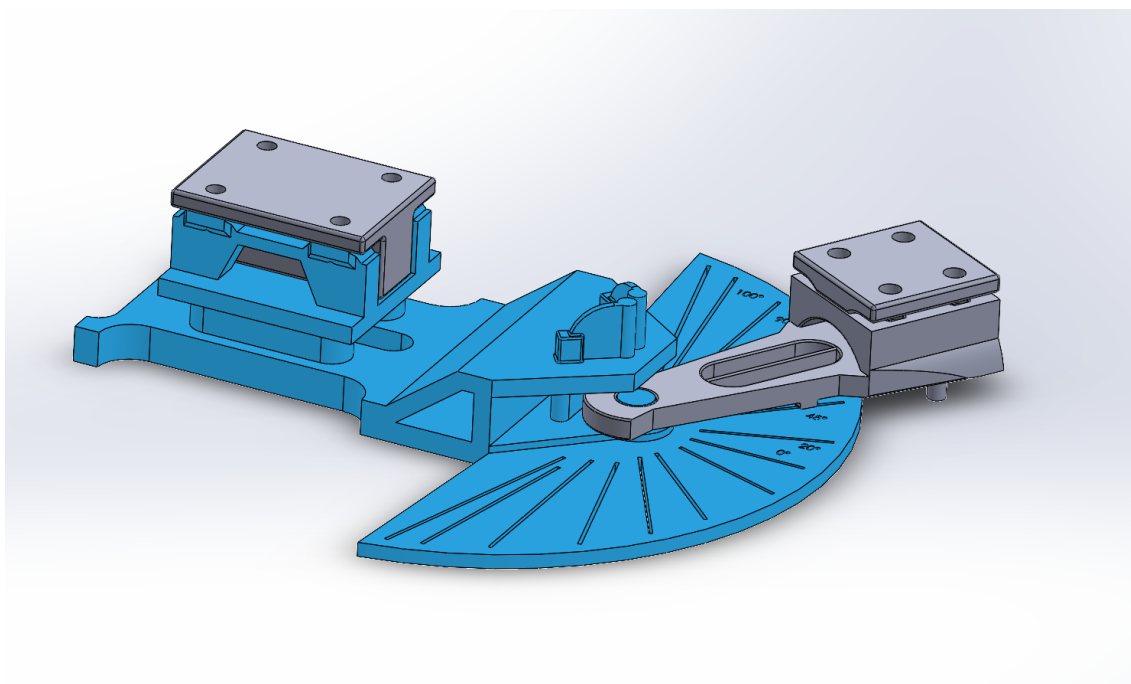
Tab. 5.1: OSNR a spektrálna šírka jednotlivých FBG mriežok.

Typ mriežok na základe ich vlnovej dĺžky	OSNR [dB]	Spektrálna šírka [nm]
1539,54	28,16	0,37
1545,73	28,51	0,34
1549,98	28,89	0,34
1559,9	27,43	0,23
1541	29,16	0,55
1548	29,86	0,58

6 Návrh laboratórnej pomôcky

Táto kapitola sa zaoberá návrhom a následným zostavením dvoch prípravkov pre laboratórnu úlohu. Prvý prípravok slúži na ohyb vlákna a druhý slúži na rotáciu a zaťaženie vlákna. Tieto prípravky sú následne využité v ďalšej kapitole na merania a zostavenie laboratórnej úlohy.

6.1 Prípravok na ohyb vlákna



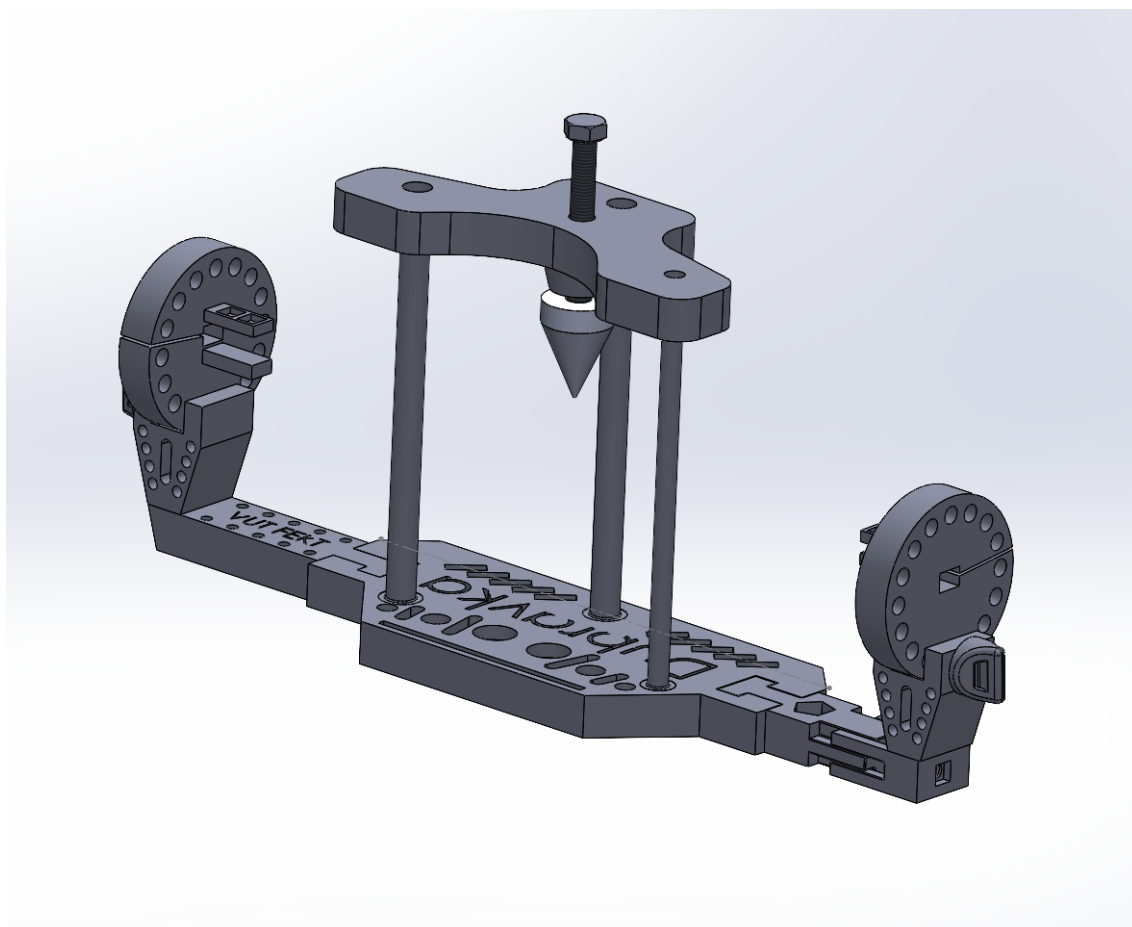
Obr. 6.1: Prípravok na ohyb vlákna.

Ako prvý bol navrhnutý prípravok na ohyb vlákna pomocou programu SOLIDWORKS 2020. Následne bol tento prípravok vytlačený pomocou 3D tlačiarne. Táto laboratórna pomôcka slúži na sledovanie závislosti odrazu vlnovej dĺžky v uhle ohybu v bode optickej vláknovej mriežky. Prípravok sa skladá z dvoch častí.

Prvá spodná časť tvorí pevnú podstavu. Obsahuje pevný úchop, ktorý zabráni počas merania posunu vlákna. Ďalej obsahuje dve vyvýšené časti, medzi ktorými bude umiestená mriežka. V tomto bode sa bude následne mriežka ohýbať do dvoch smerov. Poslednú časť pevnej podstavy tvorí číselník, na ktorom sú hodnoty stupňov od 0° do 105° pre oba smery.

Druhá časť prípravku je konštruovaná na pevný úchop vlákna. Pomocou tejto časti bude vlákno ohýbané do dvoch strán pod danými uhlami.

6.2 Prípravok na rotáciu vlákna



Obr. 6.2: Prípravok na rotáciu vlákna.

Návrh druhého prípravku bol taktiež zostrojený pomocou programu SOLIDWORKS 2020 a následne vytlačený pomocou 3D tlačiarne. Táto laboratórna pomôcka slúži na zistenie odrazu vlnovej dĺžky pri rovnakom zaťažení vlákna z rôznych smerov. Prípravok sa skladá z troch častí.

Prvá, spodná časť, tvorí pevnú podstavu, ktorá zabezpečuje stabilitu prípravku. Podstava je konštruovaná tak, aby bolo možné vlákno po vložení natiahnuť.

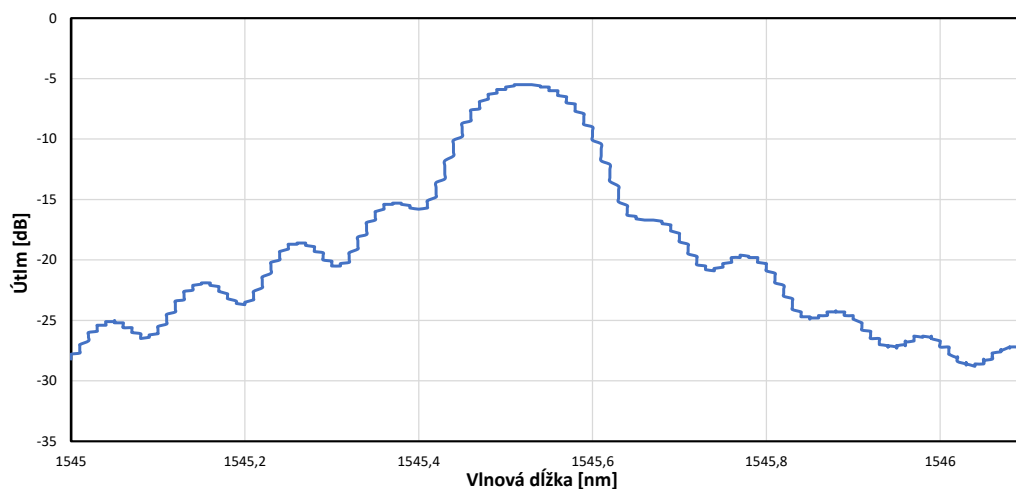
Druhá časť je tvorená postrannými rotovateľnými kolesami s pevným úchopom vlákna. Kolesá obsahujú 16 dier, pričom každá diera znamená posun o $22,5^\circ$. Týmto spôsobom je možné otočiť vlákno o 360° . Úchop vlákna je realizovaný pomocou dvoch doštičiek, ktoré pevne uchopia vlákno a zabránia tak posunu.

Na troch tyčiach je umiestnená tretia časť prípravku. Doska obsahuje skrutku, na ktorej sa nachádza vymodelovaný nadstavec. Pomocou tejto skrutky bude vyvíjaný tlak na vlákno. Návrhy prípravkov v programe SOLIDWORK 2020 sú uvedené v elektronickej prílohe.

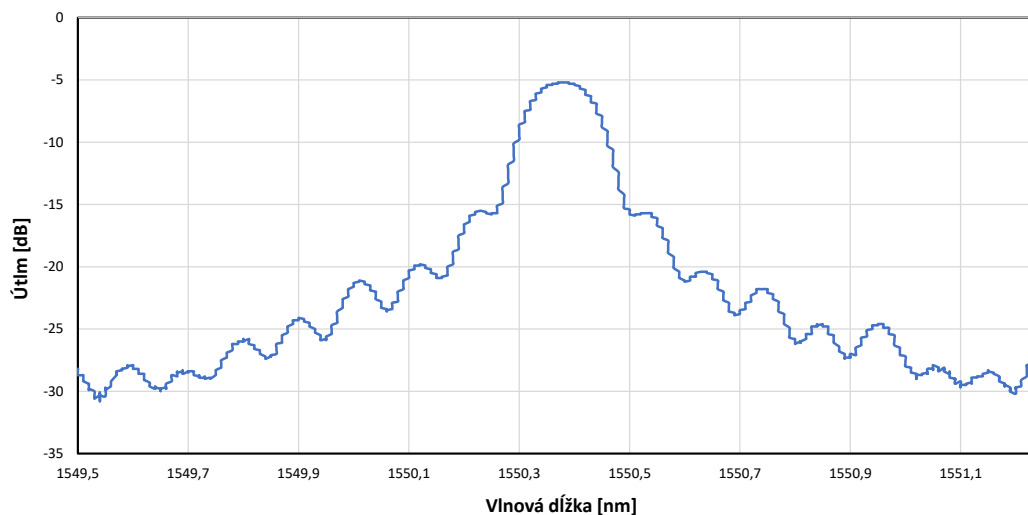
7 Namáhanie FBG za pomoci navrhnutých laboratórnych pomôcok

V tejto kapitole sú popísané výsledky meraní dvoch rovnomerných FBG mriežok. Dané mriežky boli namáhané ohybom a zatažením a následne boli pozorované zmeny vlnovej dĺžky a útlmu.

7.1 FBG použité pri meraní



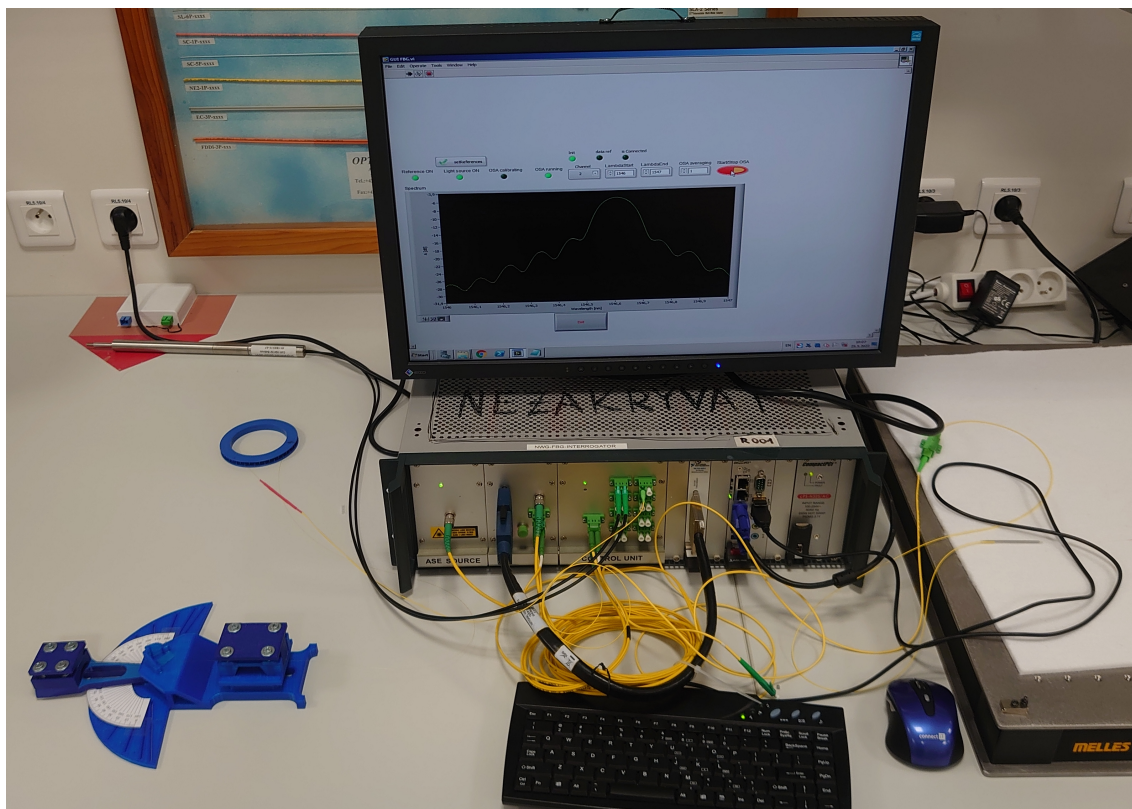
Obr. 7.1: Prvá Braggova mriežka s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm.



Obr. 7.2: Druhá Braggova mriežka s vlnovou dĺžkou 1550,38 nm.

7.2 Vplyv ohybu na FBG

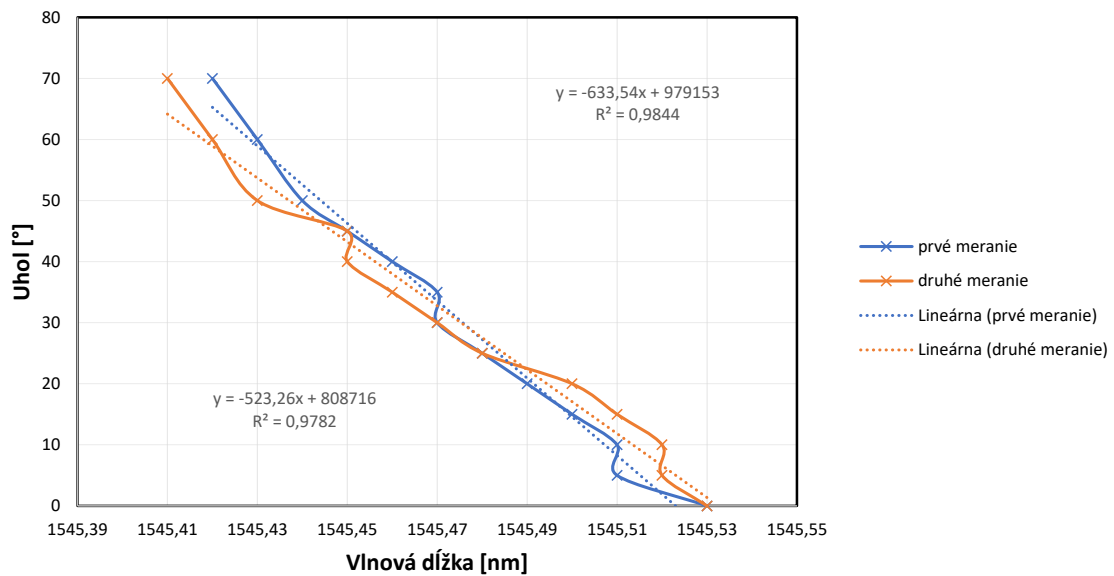
V tomto meraní bol zisťovaný vplyv ohybu optického vlákna v bode Braggovej vláknovej mriežky. Pri meraní bolo použité optické vlákno s dvoma Braggovými mriežkami s vlnovými dĺžkami 1545,53 a 1550,38 nm. Vlákno bolo zapojené do prístroja NWG-FBG-INTERROGATOR a uchytené v navrhnutom prípravku viz. obr. 6.1. Vlákno bolo v prípravku umiestnené tak, aby ohyb vznikol v bode mriežky. Zapojenie vlákna, prípravku a interrogátora vidieť na obr. 7.3.



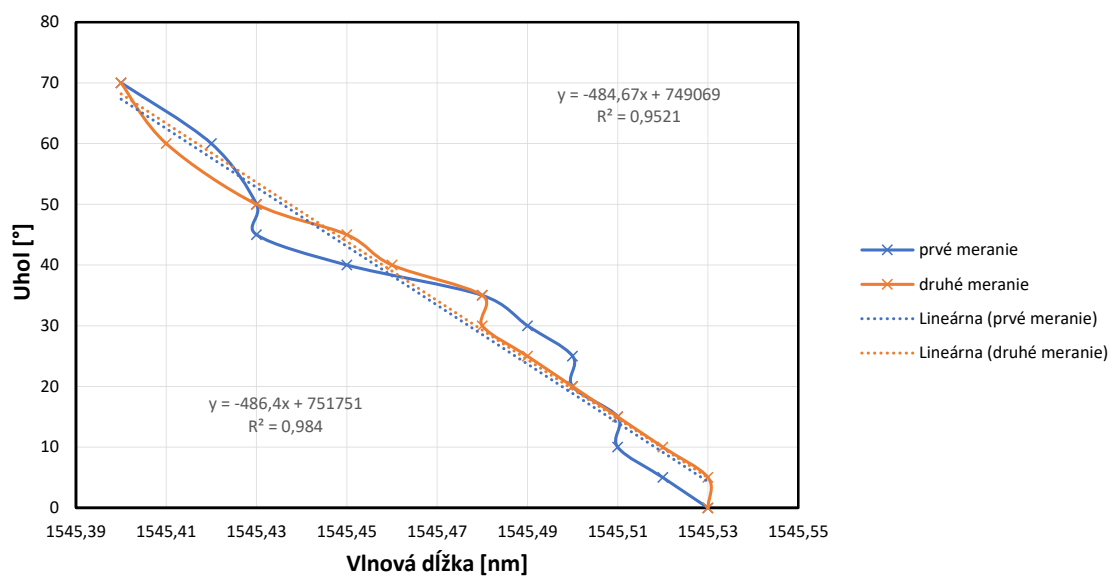
Obr. 7.3: Zapojenie prípravku na ohyb vlákna.

Vlákna boli pomocou navrhnutého prípravku ohýbané do dvoch smerov. Ohyb bol vykonávaný po 5° od 0° do 70° . Pri rozmedzí uhlov 80° do 90° došlo k porušeniu a následnému zlomeniu vlákna. Pre obe mriežky bolo meranie vykonané dvakrát z dôvodu overenia výsledkov.

Na obrázkoch nižšie vidieť výsledné grafické závislosti vlnových dĺžok na ohybe pre mriežky s vlnovými dĺžkami 1545,53 a 1550,38 nm.

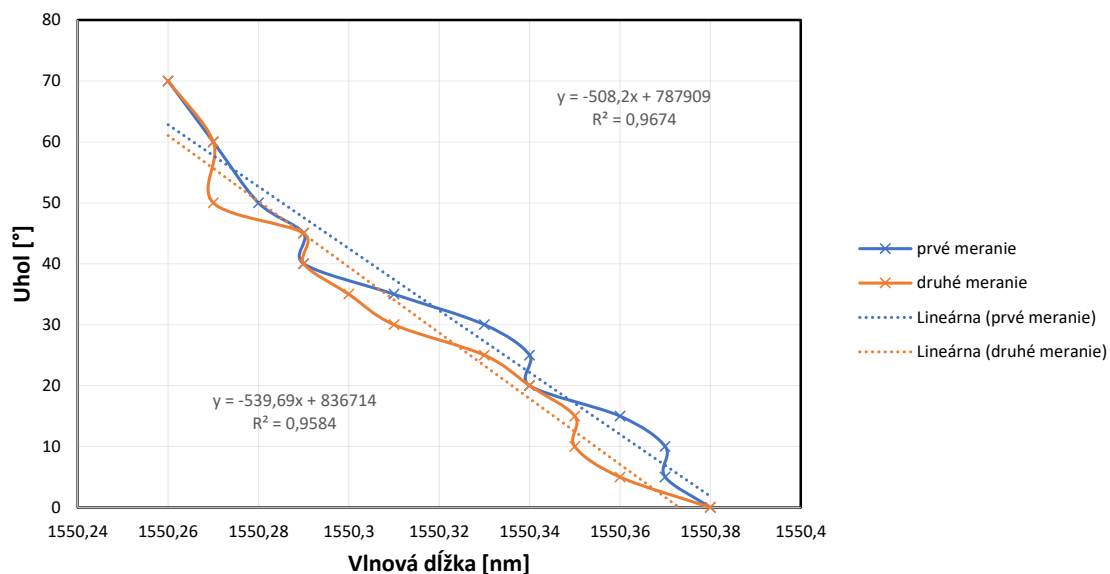


Obr. 7.4: Závislosť vlnovej dĺžky na ohyb vľavo pre mriežku s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm.

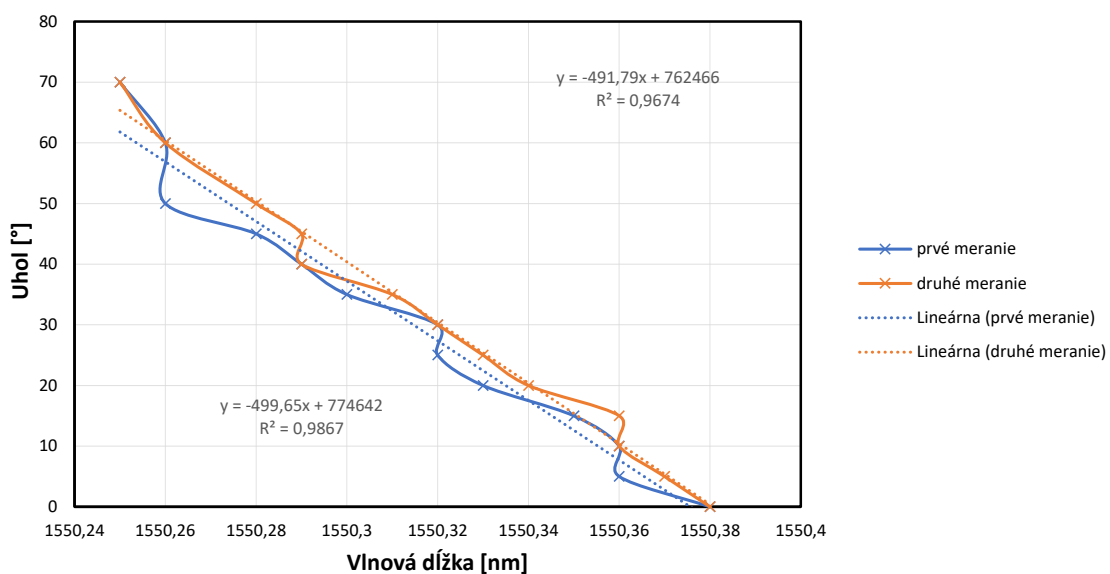


Obr. 7.5: Závislosť vlnovej dĺžky na ohyb vpravo pre mriežku s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm.

Na obr. 7.4 a obr. 7.5 vidieť, že optické vláknové Braggove mriežky sú taktiež citlivé na ohyb. Merané boli mriežky s hodnotou 1545,53 nm. Pre oba smery ohybu boli hodnoty vlnových dĺžok podobné. Líšili sa len v stotinách nm. Hodnoty vlnovej dĺžky sa pre rôzne uhly menili minimálne v stotinách nm a naberali lineárny tvar. V grafoch vyššie sa nachádza aj rovnica spoľahlivosti R^2 s hodnotami blízkymi 1.



Obr. 7.6: Závislosť vlnovej dĺžky na ohyb vľavo pre mriežku s vlnovou dĺžkou 1550,38 nm.

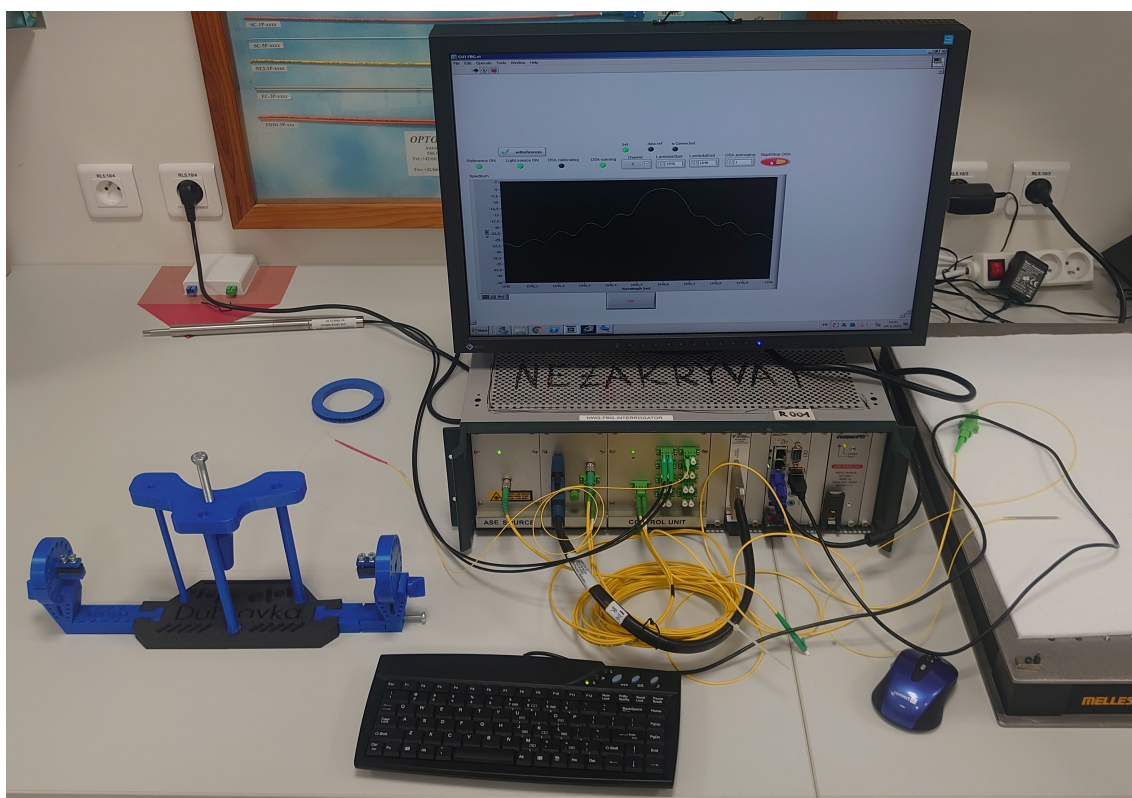


Obr. 7.7: Závislosť vlnovej dĺžky na ohyb vpravo pre mriežku s vlnovou dĺžkou 1550,38 nm.

Na obr. 7.6 a obr. 7.7 vidieť závislosti mriežky s hodnotou 1550,38 nm. V prípade pre oba smery ohybu boli hodnoty vlnových dĺžok podobné. Líšili sa len v stotinách nm. Hodnoty vlnovej dĺžky sa pre rôzne uhly menili minimálne v stotinách nm a naberali lineárny tvar. V grafoch vyššie sa nachádza aj rovnica spoľahlivosti R^2 s hodnotami blízkymi 1.

7.3 Zataženie FBG z rôznych smerov

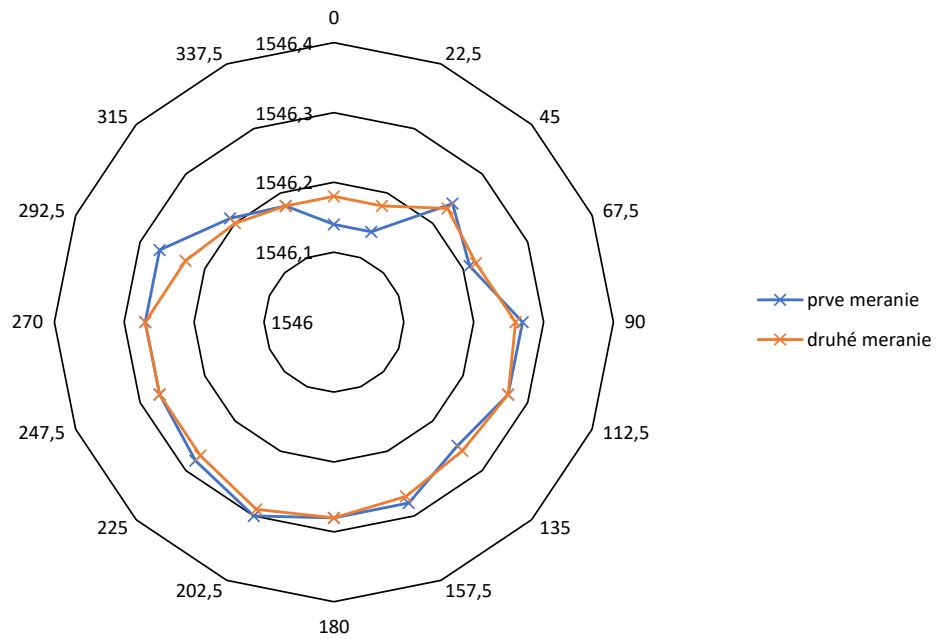
V rámci tohto merania bolo zisťované, aký vplyv má rovnaké zataženie na vlnovú dĺžku pre rôzne strany mriežky. Na meranie bolo použité optické vlákno s dvoma Braggovými mriežkami s vlnovými dĺžkami 1545,53 a 1550,38 nm. Vlákno bolo zapojené do prístroja NWG-FBG-INTERROGATOR a uchytené v navrhnutom prípravku viz. obr. 6.2. Optická vláknová Braggova mriežka bola v prípravku umiestnená na stred, aby mohla byť pomocou skrutky vyvíjaná záťaž. Zapojenie vlákna, prípravku a interrogátora vidieť na obr. 7.8.



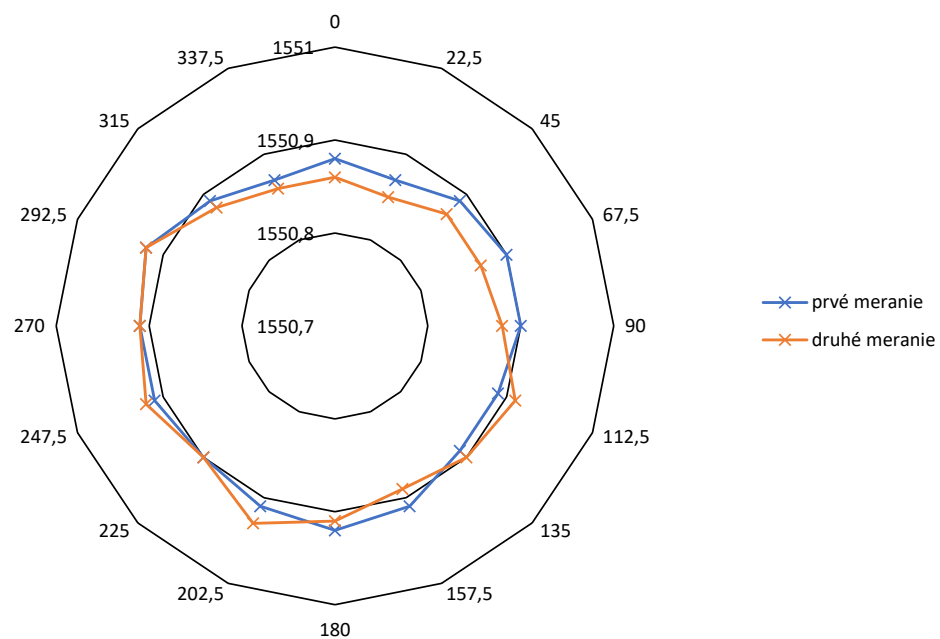
Obr. 7.8: Zapojenie prípravku na rotáciu vlákna.

Vlákna boli pomocou navrhnutého prípravku rovnako zatažované z rôznych smerov pomocou rotovateľného kolesa. Vlákno bolo posúvané po $22,5^\circ$. Pre obe mriežky bolo meranie vykonané dvakrát z dôvodu overenia výsledkov.

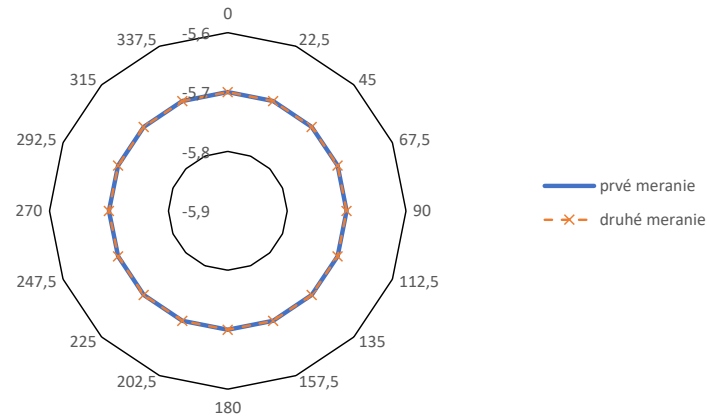
Na obrázkoch nižšie vidieť výsledné grafické závislosti vlnových dĺžok a útlmu na zatažení z rôznych smerov s vlnovými dĺžkami 1545,53 a 1550,38 nm



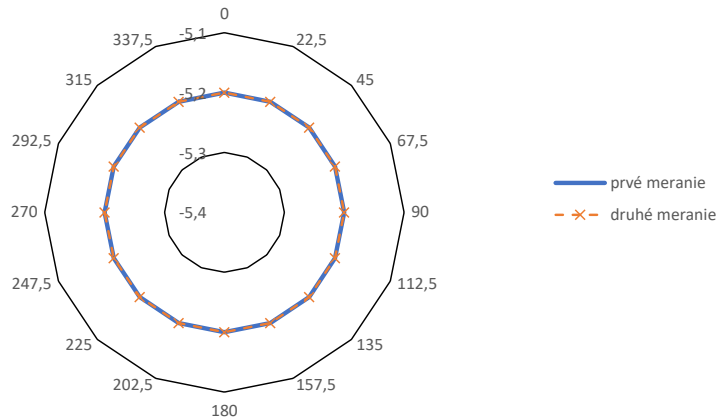
Obr. 7.9: Závislosti vlnovej dĺžky na zaťažení FBG z rôznych smerov pre mriežku s hodnotou 1545,53 nm.



Obr. 7.10: Závislosti vlnovej dĺžky na zaťažení FBG z rôznych smerov pre mriežku s hodnotou 1550,38 nm.



Obr. 7.11: Závislosť útlmu na zatažení FBG z rôznych smerov pre mriežku s hodnotou 1545,53 nm.



Obr. 7.12: Závislosť útlmu na zatažení FBG z rôznych smerov pre mriežku s hodnotou 1550,38 nm.

Z grafov na obrázkoch vyššie vidieť, že útlmy sa pre obe mriežky pri zatažovaní z rôznych strán nemenili. Mriežka s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm mala konštantný útlm 5,7 dB a mriežka s vlnovou dĺžkou 1550,38 nm 5,2 dB. Taktiež pri oboch mriežkach bolo zistené, že pri rovnakej záťaži na ľubovlnú stranu mriežky boli zmeny vlnových dĺžok minimálne. Rozdiely sa pohybovali v stotinách nm.

Vlnovú dĺžku mení každý fyzikálny parameter, ktorý zmení efektívny index lomu alebo periódu FBG vlákna. Mechanické namáhanie a teplota menia periódu mriežky a index lomu sa mení práve vďaka elasticko-optickej povahe vlákna. Taktiež z Braggovej podmienky, viz. kapitola 1, vyplýva, že pri zmene mriežkovej periódy dochádza k posunu vlnovej dĺžky. Keď na toto vlákno pôsobí teplota, teplotná rozťažnosť spôsobí zmenu periódy mriežky a teplotná citlivosť zmení index lomu.

8 Laboratórna úloha

Na vytvorenie laboratórnej úlohy boli využité poznatky z predchádzajúcich kapitol. Laboratórna úloha je navrhnutá tak, aby sa študent oboznámil s optickými vláknovými mriežkami, konkrétne Braggovými. Taktiež sa študent zoznámí s vplyvom rôznych zaťažení vlákna a následným vplyvom na ich vlnovú dĺžku.

Laboratórna úloha je primárne zameraná na Braggove mriežky a v teoretickom úvode bude študent oboznámený s ich funkciou a využitím. V teoretickom úvode sú spomenuté aj rôzne typy Braggových mriežok, ale konkrétne sa zaoberá rovnomernými mriežkami nakoľko je tento typ mriežky využitý na meranie. Ďalej je rozobraný vplyv teploty a namáhania na mriežky a taktiež spôsob kompenzácie teploty. Nakoniec je obsahom teoretického úvodu spôsob využitia optických vláknových mriežok ako senzorov.

V prvej úlohe bude študent pozorovať vplyv narastajúceho zaťaženia na zmenu vlnovej dĺžky rovnomerných Braggových mriežok. Test bude vykonaný pomocou závaží o hmotnosti 2, 4, 6 a 10 kg pre dve mriežky s vlnovými dĺžkami 1539,54 a 1545,73 nm.

Druhá úloha bude zameraná na pozorovanie vplyvu rovnakého zaťaženia z rôznych smerov na rovnomernú Braggovu mriežku s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm. Meranie bude vykonávané na navrhnutom prípravku viz obr. 6.2. Vlnová dĺžka bude zisťovaná pre každý posun o $22,5^\circ$. Študent bude pozorovať, či je dôležité, z ktorej strany bude vlákno zaťažované.

Posledné meranie bude zamerané na vplyv ohybu vlákna na vlnovú dĺžku rovnomernej Braggovej mriežky s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm. Meranie bude vykonané pomocou prípravku na ohyb vlákna viz obr. 6.1.

Súčasťou laboratórnej úlohy je aj presný postup, ako majú byť jednotlivé úlohy vypracované. Taktiež je súčasťou každej úlohy vopred vypracovaná tabuľka, do ktorej bude študent dopĺňať namerané hodnoty. Na konci postupu merania sú študentovi položené tri kontrolné otázky, ktoré študent bude vedieť zodpovedať po prečítaní teoretického úvodu a dôkladnom pozorovaní pri meraní. Súčasťou laboratórnej úlohy je aj zoznam použitých skratiek, prístrojov a odporúčanej literatúry v prípade, ak má študent záujem sa bližšie oboznámiť s problematikou optických vláknových mriežok. Študent v závere vypracuje prehľadnú správu o meraní.

Maximálny čas vypracovania laboratórnej úlohy by nemal presiahnuť 90 minút. Výsledný čas vypracovania bude približne 75 minút. V tomto čase je zahrnuté uvedenie študenta prostredníctvom vyučujúceho a jednotlivé vypracovanie bodov zadania. Celá laboratórna úloha sa nachádza v prílohe.

Záver

Cielom bakalárskej práce bol rozbor možnosti výroby optických vláknových mriežok. Boli študované ich rôzne typy na základe šíriaceho sa vidu a mriežkovej periódy. Ďalej sa teoretická časť zaoberala kompenzáciou teplotnej citlivosti v FBG pomocou atermálneho balíčka. Poslednou témou teoretickej časti boli možnosti využitia FBG ako senzorov a rozbor FBG interrogátora, ktorý slúži na vyhodnocovanie signálu. Práca sa podrobne venovala rovnomerným mriežkam typu FBG (Fiber Bragg Gratings), ich citlivosti na teplotu a napätie, ako je napríklad tlak a deformácia vlákna.

Praktická časť sa zaoberala vplyvom namáhania a teploty na jednotlivé FBG mriežky, posuvným FBG senzorom a následne parametrami OSNR a spektrálnou šírkou.

V prvom meraní bolo z výsledných grafov zistené, že v 1.mriežke (1539,54) a 2.mriežke (1545,73) pri narastajúcom tlaku vlnová dĺžka klesala. V 3.mriežke (1549,98) sa vlnová dĺžka s narastajúcim tlakom zväčšovala. Výsledne grafy by mali mať lineárny priebeh ale vo výsledných grafoch má priebeh skôr exponenciálny tvar. Preto FBG mriežky môžu slúžiť ako tlakový senzor na základe ich vysokej citlivosti pri zmene vyvíjaného tlaku.

V druhom meraní bolo na základe výsledného grafu 4.mriežky(1559,9) zistené, že sú FBG mriežky veľmi citlivé na zmenu teploty. Taktiež vidno, že závislosť vlnovej dĺžky na teplote je lineárna, a preto sú vhodné na použitie ako teplotný senzor.

V tretom meraní bolo zistené, že FBG posuvný senzor je vhodný na presné meranie malých posunov na základe posunu vlnovej dĺžky.

Následne bola vytvorená tabuľka, ktorá obsahuje hodnoty OSNR a spektrálne šírky všetkých FBG mriežok použitých v piatej kapitole.

Ďalšie meranie bolo zamerané na vplyv zataženia na vlnovú dĺžku a útlm. Bolo zistené, že vlnová dĺžka sa pri rovnakej záťaži na ľubovlnú stranu Braggovej mriežky mení len minimálne v stotínach nanometrov. Útlm sa na rozdiel od vlnovej dĺžky nemenil.

Ako posledné meranie bol študovaný vplyv ohybu vlákna. Bolo zistené, že vlákna sú citlivé na ohyb a vlnová dĺžka sa menila len v stotínach nanometrov. Taktiež bolo zistené, že nezáleží na strane ohybu mriežky, nakoľko sa hodnoty grafov približne zhodovali.

V závere bakalárskej práce bola navrhnutá laboratórna úloha, ktorá priblíži študentom problematiku v optických vláknových mriežkach.

Literatúra

- [1] URBAN, B. F.; FILKA, M.: *Braggovy mřížky v optických vláknech*. Dizertační práce, Master's thesis, Vysoké učení technické v Brně, 2014.
- [2] BUGGY, S. J.: Composite material process monitoring using optical fibre grating sensors. 2008.
- [3] BHATIA, V.: *Properties and sensing applications of long-period gratings*. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [4] VALÁŠEK, M.: *Vláknové difrakční struktury Point-by-Point [online]*. Dizertační práce, Master's thesis, Vysoké učení technické v Brně, 2014.
- [5] MUÑIZ, R. M. R.: *Fibre Bragg grating structures: Applications in optical communications and sensor technology*. Universidade do Porto (Portugal), 2004.
- [6] SAHOTA, J. K.; GUPTA, N.; DHAWAN, D.: Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: A comprehensive review. *Optical Engineering*, ročník 59, è. 6, 2020: str. 060901.
- [7] KASHYAP, R.: *Fiber bragg gratings*. Academic press, 2009.
- [8] PANDA, T. K.; kumar Behera, A. M.; Polei, S.: Performance comparison of Fiber Bragg Grating for different Grating length, Apodization function and Chirp function. In *2020 International Conference on Computer Science, Engineering and Applications (ICCSEA)*, IEEE, 2020, s. 1–5.
- [9] MUDRA, P.: ANALÝZA OPTICKÝCH FILTROV NA BÁZE VLÁKNOVEJ BRAGGOVEJ MRÍŽKY.
- [10] JAMES, S. W.; TATAM, R. P.: Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application. *Measurement science and technology*, ročník 14, è. 5, 2003: str. R49.
- [11] VENGSARKAR, A.; LEMAIRE, P.; JUDKINS, J.; aj.: Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *Journal of Lightwave Technology*, ročník 14, è. 1, 1996: s. 58–65, doi:10.1109/50.476137.
- [12] OTHONOS, A.; KALLI, K.; PUREUR, D.; aj.: Fibre bragg gratings. In *Wavelength Filters in Fibre Optics*, Springer, 2006, s. 189–269.
- [13] YUSSUPOVA, G.; MIRZAKULOVA, S.; DANIYAROVA, D.; aj.: Analysis of Gaussian and Sinus Apodization Profiles. In *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, IEEE, 2019, s. 1–4.

- [14] TOSI, D.: Review of chirped fiber Bragg grating (CFBG) fiber-optic sensors and their applications. *Sensors*, roènik 18, è. 7, 2018: str. 2147.
- [15] ZHOU, Z.; GRAVER, T. W.; HSU, L.; aj.: Techniques of Advanced FBG sensors: fabrication, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges. *Pacific Science Review*, roènik 5, è. 1, 2003: s. 116–121.
- [16] TÝNEK, I. J.: MANUFACTURING OF THE FIBER BRAGG GRATINGS. 2005: str. 5.
- [17] TAHIR, B. A.; ALI, J.; RAHMAN, R. A.: Fabrication of fiber grating by phase mask and its sensing application. *Journal of optoelectronics and advanced materials*, roènik 8, è. 4, 2006: str. 1604.
- [18] CHALUVADI, V. N. B.; PATTNAIK, P. K.: Effect of Strain and Temperature on FBG. In *2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, IEEE, 2020, s. 1–4.
- [19] ChEN, Q.; LU, P.: Fiber Bragg gratings and their applications as temperature and humidity sensors. *Atomic, Molecular and Optical Physics*, roènik 6, 2008: str. p235.
- [20] JULIA, M.; NIETO-CALLEJAS, M.; Castro-Caicedo, A.; aj.: Desarrollo y prueba de un inclinómetro basado en fibra óptica. XV Congreso Colombiano de Geotecnia 2016. 10 2016.
- [21] URL <https://www.findlight.net/fiber-optics/fiber-optomechanics/fiber-bragg-grating/athermal-packaged-fiber-bragg-grating>
- [22] LO, Y.-L.; KUO, C.-P.: Packaging a fiber Bragg grating without preloading in a simple athermal bimaterial device. *IEEE transactions on advanced packaging*, roènik 25, è. 1, 2002: s. 50–53.
- [23] LO, Y.-L.; KUO, C.-P.: Packaging a fiber Bragg grating with metal coating for an athermal design. *Journal of Lightwave Technology*, roènik 21, è. 5, 2003: s. 1377–1383, doi:10.1109/JLT.2003.810925.
- [24] HIRAYAMA, N.; SANO, Y.: Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use. *ISA Transactions*, roènik 39, è. 2, 2000: s. 169–173, ISSN 0019-0578, doi:[https://doi.org/10.1016/S0019-0578\(00\)00012-4](https://doi.org/10.1016/S0019-0578(00)00012-4).
URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057800000124>

- [25] PASCHOTTA, D. R.: Optical temperature sensors. Mar 2020.
URL https://www.rp-photonics.com/optical_temperature_sensors.html
- [26] Ing. RADIM ŠIFTA, P.: Praktické využití a princip činnosti optovláknových FBG senzorů. Jan 2021.
URL <https://elektro.tzb-info.cz/elektromaterialy/21770-prakticke-vyuziti-a-princip-cinnosti-optovlaknovych-fbg-senzoru>

Zoznam symbolov a skratiek

Symboly:

n_{co}	index lomu jadra vlákna
n_{cl}	index lomu plášťa vlákna
n_{eff}	efektívny index lomu
c	rýchlosť svetla vo vákuu
k	krok chirpu alebo konštanta šírenia vo voľnom priestore
L_g	dĺžka mriežok
N	rád mriežky
z	súradnica súhlasná s osou vlákna
$R_i(\lambda)$	odrazivosť mriežky
F_{apo}	apodizačná obálka
λ	vlnová dĺžka
λ_b	Braggova rezonančná vlnová dĺžka
λ_D	navrhovaná vlnová dĺžka pre veľmi slabé mriežky
Λ	perióda mriežky
Λ_0	začiatočná perióda mriežky
Λ_{dlha}	perióda dlhej chirpovanej mriežky
Λ_{kratka}	perióda krátkej chirpovanej mriežky
δ_n	zmena indexu lomu
Θ	náklon naklonenej mriežky
β	konštanta šírenia alebo koeficient teplotnej rozťažnosti
ω	uhlová frekvencia
σ	jednosmerný väzbový koeficient alebo Poissonov pomer
σ_i	jednosmerný samoväzbový koeficient

α_{metal}	koeficient teplotnej rozťažnosti kovového bloku
$\varepsilon_{\text{axis}}$	aximálne mechanické napätie
ζ	koeficient teplotnej optiky
L_{metal}	dĺžka kovového bloku
L_F	dĺžka vlákna
p_e	efektívna deformačná optická konštanta
p_{12}	koeficient deformácie optického senzora
p_{11}	koeficient deformácie optického senzora

Skratky:

CCD	Charge-Couple Device
FBG	fiber Bragg grating (Braggova vláknová mriežka)
LPFG	long period fiber grating (vláknová mriežka s dlhou periódou)
OSNR	optical signal-to-noise ratio (optický pomer signálu k šumu)
S-LED	Superluminescent light-emitting diodes
UV	ultrafialové žiarenie

Príloha

Meranie parametrov optických vláknových Braggových mriežok

Cieľ

Cieľom tejto úlohy je oboznámiť študentov s optickými vláknovými mriežkami. Zameranie bude na Braggove mriežky. Študent sa zoznámi s vplyvom rôznych zaťažení vlákna a následným vplyvom na ich vlnovú dĺžku.

Zadanie

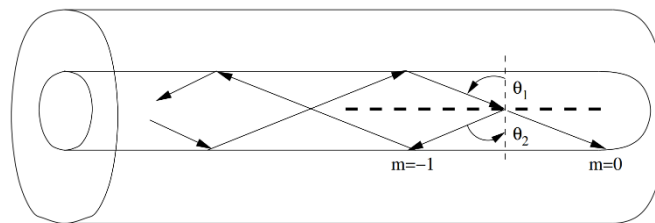
1. Zoznámte sa s obsluhou prístroja NWG-FBG-INTERROGATOR a laboratórnymi prípravkami na ohyb a rotáciu vlákna.
2. Otestuje vplyv narastajúceho zaťaženia na optické vláknové Braggovej mriežky s vlnovými dĺžkami 1539,54 a 1545,73 nm pomocou závaží.
3. Zistite vplyv rovnakého zaťaženia na optickú vláknovú Braggovu mriežku s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm z rôznych smerov.
4. Zmerajte vplyv ohybu optickej vláknovej Braggovej mriežky s vlnovou dĺžkou 1545,53 nm do rôznych smerov.
5. Výsledky merania zostavte do prehľadnej správy o meraní.

Úvod

Dnešná doba kladie široké nároky na množstvo prenášaných dát a hlavne na rýchlosť a kvalitu prenosu. Od objavenia optických vlákien sa stále viac a viac presviedčame o ich nenahraditeľnosti nielen v oblasti telekomunikácií ale aj v oblasti senzorov, lekárstve. . .

Difrakčné štruktúry sú charakterizované periodickými alebo kvázi periodickými zmenami indexu lomu produkovanými pozdĺž osi optického vlákna. Vo vláknach sú z difrakčných štruktúr najviac využívané Braggove mriežky, mriežky s dlhou periódou a taktiež aj naklonené mriežky.

V optických vlnovodoch je „vid“ termín pre šírenie elektromagnetických vln, ktorý prenáša energiu. Táto energia je prenášaná v neprerušenom a bezstratovom systéme cez optické vlákno s určitou uhlovou frekvenciou ω s konečným počtom vidov. Následkom naväzovania vedených vidov môže byť smerovanie plášťových a vedených vidov rovnakým smerom alebo smerovanie plášťových vidov opačným smerom ako vedené. Smerovanie môžeme považovať za zásadný rozdiel medzi FBGs a LPFGs [1] [2].



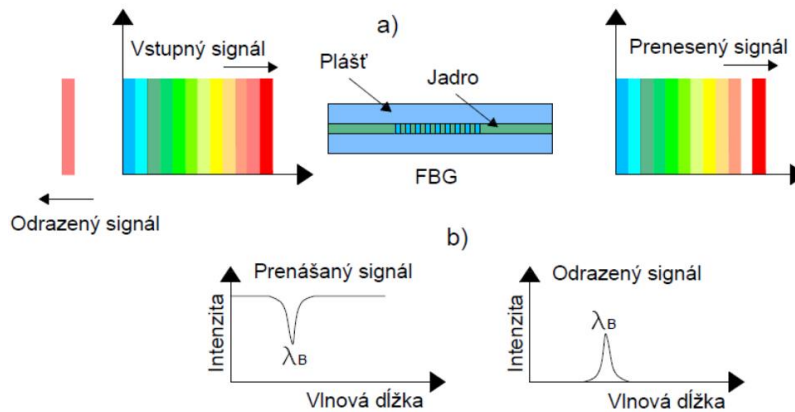
Obr. 1: Znázornenie geometrickej optiky v Braggovej mriežke [3].

Braggove optické vláknové mriežky sú tvorené periodickou alebo kvázi periodickou zmenou indexu lomu jadra v pozdĺžnom smere k osi. Mriežky fungujú ako frekvenčný filter tak, že časť svetla vstupujúceho do vlákna a následne do mriežkovej štruktúry odrazí späť od každej mriežkovej roviny avšak iba v tom prípade, že spĺňajú navrhnuté parametre. Ostatná časť spektra je prepustená. Odrazené časti svetla sa spoja a vytvoria jeden odrazený lúč svetla, v prípade, že je splnená Braggova podmienka, ktorá je daná ako :

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff}$$

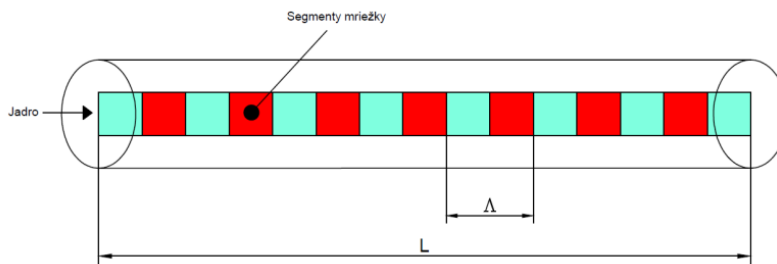
kde Λ je mriežková perióda vzdialenosti medzi dvoma susednými mriežkovými rovinami, n_{eff} je efektívny index lomu jadra a λ_B je Braggova vlnová dĺžka. Braggovu podmienku sleduje mriežková štruktúra ktorá funguje ako zrkadlo ktoré zvolenú vlnovú dĺžku odráža a zostávajúce prepúšťa [3].

-
- [1] BUGGY, S. J.: Composite material process monitoring using optical fibre grating sensors. 2008.
[2] BHATIA, V.: Properties and sensing applications of long-period gratings. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
[3] MUÑIZ, R. M. R.: Fibre Bragg grating structures: Applications in optical communications and sensor technology. Universidade do Porto (Portugal), 2004.



Obr. 2 : (a) Schematický náčrt Braggovej vláknovej mriežky, (b) popisuje typický prenesený a odrazený signál [4].

Nesplnením Braggovej podmienky sa všetky odrazy vyrušia, a preto nie je možné pozorovať žiadny odraz. Existujú rôzne typy Braggových mriežok ktoré môžeme rozdeliť do viacerých kategórií, ktoré sú odlišné v modulácii indexu lomu a v mriežkovej perióde. Sú to : Rovnomerné FBG, Apodizované FBG, Chirpované FBG a iné. Rovnomerná vláknová mriežka je mriežka s konštantnou periódou Λ_0 . Vlákna sú posunuté o vzdialenosť Λ_0 a proces sa opakuje pokiaľ nie je vygenerovaný požadovaný počet periód vláknovej mriežky.



Obr. 3 : Štruktúra rovnomernej mriežky [3].

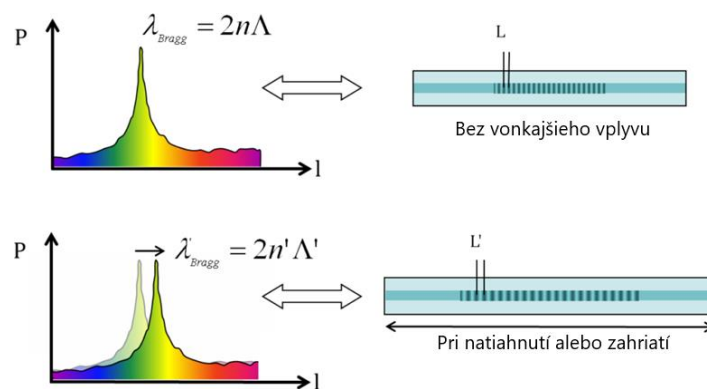
Vlnová dĺžka Braggovej mriežky závisí od periodicity, rozostupu mriežok alebo efektívneho indexu lomu jadra vo vlákne. Pôsobením zmeny teploty alebo mechanickým namáhaním, ktoré pôsobí na FBG štruktúru dochádza k zmene Braggovej vlnovej dĺžky. Zmenu Braggovej vlnovej dĺžky v dôsledku deformácie a teploty možno napísať ako :

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\Lambda \frac{n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right] \Delta l + 2 \left[\Lambda \frac{n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right] \Delta T$$

Kde prvý člen značí deformačný efekt a druhý člen teplotnú efektivitu [5].

[4] VALÁŠEK, M.: Vlákňové difrakčné štruktúry Point-by-Point [online]. Dizertačná práca, Master's thesis, Vysoké učenie technické v Brně, 2014.

[5] CHALUVADI, V. N. B.; PATNAIK, P. K.: Effect of Strain and Temperature on FBG. In 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), IEEE, 2020, s. 1–4.



Obr. 4 : Vplyv teploty a namáhania Braggovej mriežky [6].

Na kompenzáciu teplotnej odchýlky vo vláknitej Braggovej mriežke sa využíva atermálny balíček s kovovým povlakom. Tento kovový povlak je na optickom vlákne bez prúdovo pokovovaný, aby fungoval ako tepelný kompenzátor na udržanie stability vlnovej dĺžky. Atermálny balíček poskytuje takmer nulový posun Braggovej vlnovej dĺžky [7].

Optické vláknové Braggove mriežky sa taktiež využívajú ako senzory. Tieto senzory sú založené na meraní vlnových dĺžok, aby sa určili účinky teploty a napätia, ktoré pôsobia na špeciálne upravenú časť jadra vlákna. Vhodnou úpravou puzdra senzora a nakalibrovania je následne možné pomocou FBG merať teplotu, tlak, ťah, mechanické deformácie, vibrácie, náklon, zrýchlenie a pod. Tieto senzory môžu byť prevádzkované vo veľmi širokom rozsahu teplôt. Hlavnou výhodou je, že nie sú citlivé na elektromagnetické rušenie a môžu byť použité aj vo výbušných prostrediach. Medzi ďalšie výhody patria napríklad malé rozmery, nízka hmotnosť, vysoká citlivosť a dlhodobá stabilita. Platí, že pokiaľ je FBG použité na akékoľvek iné veličiny ako je teplota, je dôležité zabezpečiť teplotnú kompenzáciu [8].

[6] Julia, M.; Nieto-Callejas, M.; Castro-Caicedo, A.; aj.: Desarrollo y prueba de un inclinómetro basado en fibra óptica. XV Congreso Colombiano de Geotecnia 2016. 10 2016.

[7] LO, Y.-L.; KUO, C.-P.: Packaging a fiber Bragg grating without preloading in a simple athermal bimaterial device. IEEE transactions on advanced packaging, ročník 25, è. 1, 2002: s. 50–53.

[8] Hirayama, N.; Sano, Y.: Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use. ISA Transactions, ročník 39, è. 2, 2000: s. 169–173, ISSN 0019-0578, doi:[https://doi.org/10.1016/S0019-0578\(00\)00012-4](https://doi.org/10.1016/S0019-0578(00)00012-4).

Postup merania

1. Zapnite prístroj. Do prístroja na kanál 1 pripojte optické vlákno. Na obrazovke otvorte priečinok s názvom GUI FBG aktual a následne spustíte program Application.exe. Kliknite na okienko channel a zvolíte kanál 1. Ďalej nastavte rozsah zobrazovaného signálu od 1538 do 1546 nm (LambdaStart, LambdaEnd). Následne tlačidlom Start/Stiop OSA spustíte grafickú vizualizáciu odrazeného signálu. Pod ochranným materiálom sa v bode označenom X nachádzajú mriežky. Pritlačením rukou na danú časť otestujete či sa vlnová dĺžka v spustenom programe zmenila. Následne na dané body pokladajte závažia s hmotnosťou 2, 4, 6 a 10 kg. Po každej zmene závažia exportujte dáta na zostavenie grafických závislostí.

Hmotnosť [kg]	Tlak [kPa]	Vlnová dĺžka [nm]
2		
4		
6		
10		

2. Do prístroja na kanál 2 pripojte optické vlákno. V okienku channel zmeňte kanál na 2. Nastavte rozsah zobrazovaného signálu od 1544 do 1547 nm. Optické vlákno umiestnite do prípravku na rotáciu tak aby sa Braggova mriežka nachádzala v strede prípravku pod skrutku. Uchytíte vlákno a pomocou bočnej skrutky vlákno jemne napnite. Spustíte grafickú vizualizáciu odrazeného signálu. Pomocou skrutky zatlačte na bod Braggovej mriežky aby vznikol malý ohyb vlákna. Následne skrutku povoľte a pomocou rotovateľného kolesa otočte vlákno na ďalší bod. Vlákno posúvajte po 22,5°. Následne zatlačte na vlákno ako v prvom meraní. Po každom otočení a zaťažení vlákna exportujte dáta na zostavenie grafických závislostí. Pri vypravovaní laboratórnej úlohy zvolíte pre prehľadnosť nameraných hodnôt radarový typ grafu.

Uhol [°]	Vlnová dĺžka [nm]
0	
22,5	
45	
67,5	
90	
112,5	
135	
157,5	

Uhol [°]	Vlnová dĺžka [nm]
180	
202,5	
225	
247,5	
270	
292,5	
315	
337,5	

3. Uvoľnite vlákno a vložte ho do druhého prípravku na ohyb vlákna. Vlákno umiestnite tak aby Braggova mriežka prechádzala medzi dvoma vyvýšenými bodmi prípravku. Spustíte grafickú vizualizáciu odrazeného signálu. Postupne ohýbajte vlákno po 5° od 0° do 70°. Meranie uskutočnite pre ohyb doprava a doľava. Po každom posune vlákna exportujte dáta na zostavenie grafických závislostí.

Otáčanie doľava	
Uhol [°]	Vlnová dĺžka [nm]
0	
5	
10	
15	
20	
25	
30	
35	
40	
45	
50	
60	
70	

Otáčanie doprava	
Uhol [°]	Vlnová dĺžka [nm]
0	
5	
10	
15	
20	
25	
30	
35	
40	
45	
50	
60	
70	

Kontrolné otázky

Akým spôsobom sa v optickej vláknovej Braggovej mriežke šíri vid?

Ako môžeme kompenzovať teplotnú odchýlku v optických vláknových mriežkach?

Aký typ Braggovej mriežky bol využitý pri meraní?

Zoznam skratiek

FBG		fiber Bragg grating (Braggova vláknová mriežka)
LPFG		long period fiber grating (vláknová mriežka s dlhou periódou)

Doporučená literatúra

[1] ALI ALIAN, Taha, Nazmi AZZAM and Moustafa HUSSEIN. 2014. Performance Evaluation of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor: Apodized Fiber Bragg Grating, Design and Simulation. ISBN: 978-3-6595-8590-6

[2] CUSANO, Andrea, 2018. Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation. ISBN 978-1-6080-5343-8.

Použité prístroje a pomôcky

- NWG-FBG-INTERROGATOR
- Optické vlákna s rovnomernými Braggovými mriežkami
- Prípravok na rotáciu vlákna
- Prípravok na ohyb vlákna
- Závažia

Elektronická príloha

Obsahom elektronickej prílohy je zip súbor obsahujúci dva súbory vo formáte step. Prvý súbor s názvom Prípravok-na-ohyb obsahuje 3D model laboratórnej pomôcky na ohyb vlákna. Druhý súbor s názvom Prípravok-na-rotáciu-vlákna obsahuje 3D model laboratórnej pomôcky na rotáciu vlákna. Ďalej zip súbor obsahuje pripravenú laboratórnu úlohu vo formáte pdf s názvom Meranie parametrov optických vláknových Braggových mriežok.