



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Návrh senzoru s vláknově Braggovskou mřížkou pro měření pnutí a teploty

Diplomová práce

Studijní program: Elektronika a komunikace

Studijní obor: Fotonika

Vedoucí práce: prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Bc. Jakub Koller
Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Koller** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **438690**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Fotonika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh senzoru s vláknově Braggovskou mřížkou pro měření pnutí a teploty

Název diplomové práce anglicky:

Design of a Sensor with a Fiber Bragg Grating for Strain and Temperature Measuring

Pokyny pro vypracování:

V rámci diplomové práce analyzujte využití optických vláknových Braggovských mřížek (FBG, Fiber Bragg Grating) pro senzorové účely. Zaměřte se na jejich návrh zejména s ohledem na spektrální závislosti. V rámci návrhového nástroje RSoft GratingMOD navrhnete FGB pro současnou detekci teploty a pnutí materiálů analyzujte pro rozsah vlnových délek zdroje a jednotlivé parametry mřížky. Návržený senzor s Braggovskou mřížkou realizujte a charakterizujte jeho parametry. Výsledný návrh optimalizujte za zejména účelem zpřesnění měření pnutí materiálů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] R. Hui, M. O'Sullivan, „Fiber Optic Measurement Techniques”, Academic Press, 2009.
- [2] J. M. Lopez-Higuera, “Handbook of Optical Fibre Sensing Technology”, John Wiley & Sons, 2002.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.01.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

Praha, 20.05.2022

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce prof. Ing. Stanislavovi Zvánovcovi, Ph.D. za vedení mé práce, cenné rady, odborný dohled, trpělivost a čas, který mi při psaní této práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Safibra, s.r.o. za poskytnutí prostor a měřících přístrojů, které byly podstatnou částí této práce. V souvislosti s tím bych chtěl poděkovat kolegovi Ing. Jiřímu Weissovi, za přínosné diskuze a povzbuzení.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá sensorikou optických vláken. Cílem této práce byl návrh Braggovské mřížky. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou popsány základy optických vláken a mřížkové struktury. V praktické části je návrh Braggovské mřížky v simulačním programu RSoft, na který navazuje měření charakteristik mřížky a dopočet koeficientů pro teplotu a relativní prodloužení.

The diploma thesis deals with optical fiber sensors. The aim of this work was to design a fiber Bragg grating. The work is divided into theoretical and practical parts. The theoretical part describes the basics of optical fibers and grating structures. The practical part involves the design of the fiber Bragg grating in the simulation program RSoft, which is followed by the measurement of the grating characteristics and the calculation of coefficients for temperature and relative elongation.

Klíčová slova

Optika, fotonika, FBG, senzor, měření, teplota, prodloužení, vláknová Braggovská mřížka

Key words

Optics, photonics, FBG, sensor, measurement, temperature, strain, fiber Bragg grating

Obsah

1	Úvod	1
2	Teoretický popis	2
2.1	Optické vlákno	2
2.2	Zákon odrazu a lomu	2
2.3	Úplný odraz	3
2.4	Numerická apertura	4
2.5	Braggova difrakce	4
2.6	Braggovská mřížka	5
2.6.1	Typy Braggovských mřížek	6
2.6.2	Možnosti zápisu mřížky do jádra	8
2.6.3	Koeficienty Braggovy vlnové délky	10
3	Využití FBG v optovláknové senzorce	11
3.1	Monitorování relativního prodloužení kovového mostu	11
3.2	Bezpečnost	12
4	Simulace struktury FBG a závislost parametrů	13
4.1	Odražené spektrum pro různé vlnové délky	14
4.2	Závislosti parametrů	16
4.2.1	Index lomu jádra	16
4.2.2	Index lomu mřížky	18
4.2.3	Délka mřížky	20
5	Mřížky použité v praktickém měření	22
6	Teplotní koeficient	24
6.1	Zapojení pracoviště	24
6.2	Měření	27
7	Koeficient změny relativního prodloužení	31
7.1	První měření	31
7.1.1	Zapojení pracoviště	31
7.1.2	Měření	32
7.2	Druhé měření	36
7.2.1	Zapojení pracoviště	36
7.2.2	Měření	38
8	Závěr	42

Seznam tabulek

1	Parametry znázorněné struktury	13
2	Získané parametry výsledného spektra	16
3	Parametry mřížky FBG ₁₅₁₁	23
4	Parametry mřížky FBG ₁₅₅₈	23
5	Parametry mřížky FBG ₁₅₈₃	23
6	Parametry mřížky FBG ₁₅₅₀	23
7	Získané vlnové délky pro jednotlivá FBG při dané teplotě	29
8	Výsledné hodnoty změn vlnové délky pro mřížku FBG ₁₅₅₈	33
9	Výsledné hodnoty změn vlnové délky pro mřížku FBG ₁₅₈₃	34
10	Referenční nastavení pro měření mřížky FBG ₁₅₅₈	38
11	Získané vlnové délky pro jednotlivá FBG při daném prodloužení	40

Seznam obrázků

1	Základní struktura optického vlákna. Převzato z [1]	2
2	Odraz a lom vlny na rozhraní dvou prostředí. Převzato z [3]	3
3	Dopad záření na strukturu.	4
4	Struktura optického vlákna s Braggovskou mřížkou	5
5	Uniformní struktura. Převzato z [6]	6
6	Čirpovaná struktura. Převzato z [6]	7
7	Nakloněná struktura. Převzato z [6]	7
8	Spektrum odražené apodizované struktury. Převzato z [6]	7
9	Zápis uniformní mřížky metodou dvou UV záření	8
10	Zápis uniformní mřížky metodou fázové masky	9
11	Zápis uniformní mřížky metodou femtosekundového laseru	10
12	Náčrt senzoru pro měření mechanického namáhání	11
13	Umístění senzoru FBG na drátovém plotě	12
14	Simulace struktury FBG pro vlnovou délku 1558	13
15	Spektrum a získané parametry FBG ₁₅₁₁	14
16	Spektrum a získané parametry FBG ₁₅₅₈	15
17	Spektrum a získané parametry FBG ₁₅₈₃	15
18	Průběh FWHM v závislosti na rozdílu $n_{\text{jádra}}$ a $n_{\text{okolí}}$	16
19	Průběh amplitudy spektra v závislosti na rozdílu $n_{\text{jádra}}$ a $n_{\text{okolí}}$	17
20	Průběh periodicity struktury v závislosti na rozdílu $n_{\text{jádra}}$ a $n_{\text{okolí}}$	17
21	Průběh FWHM v závislosti na velikosti rozdílu n segmentů struktury oproti jádru	18
22	Průběh amplitudy spektra v závislosti na velikosti rozdílu n segmentů struktury oproti jádru	19
23	Průběh periodicity struktury v závislosti na velikosti rozdílu n segmentů struktury oproti jádru	19
24	Průběh FWHM v závislosti na délce struktury	20
25	Průběh amplitudy spektra v závislosti na délce struktury	21
26	Realizované vlákno se zapsanou mřížkou, opatřeno pig-tailem s konektorem FC/APC	22
27	Realizovaná mřížka FBG ₁₅₅₈	22
28	Jednotka FBGuard 1550	24
29	Blokové schéma zapojení pro měření teplotního koeficientu	24

30	Umístění FBG v komoře	25
31	Tepelná komora	26
32	Průběh teploty v komoře	27
33	Referenční spektrum	27
34	Graf teploty v intervalu stabilizace komory	28
35	Graf mřížky (a)FBG ₁₅₁₁ a mřížky (b)FBG ₁₅₅₀ v intervalu stabilizace komory	28
36	Grafické srovnání závislosti vlnové délky na teplotě pro jednotlivá FBG	30
37	První měření změny relativního prodloužení	31
38	Blokové schéma sestavy prvního měření relativního prodloužení	32
39	Pohled do mikroskopu pro odečítání změn prodloužení	32
40	Referenční spektrum pro mřížku FBG ₁₅₅₈	33
41	Referenční spektrum pro mřížku FBG ₁₅₈₃	34
42	Sestava druhého měření změny relativního prodloužení	36
43	Monitorizovaný lineární posuv STANDA-8MT175	37
44	Blokové schéma sestavy druhého měření relativního prodloužení	37
45	Sestava druhého měření změny relativního prodloužení	38
46	Referenční spektrum	39
47	Program XILab v referenčním bodě	39
48	Program XILab v koncovém bodě	39
49	Grafické srovnání závislosti vlnové délky na relativním prodloužení pro jednotlivá FBG	41

1 Úvod

Hlavní podstata diplomové práce jsou optovláknové senzory s úzkým zaměřením na vnitřní struktury. Primárně se jedná o Braggovskou mřížku, za pomoci které je možné optické vlákno využívat jako senzor pro měření změn relativní délky, teploty, ale i mnoha jiných parametrů.

Existují případy, kdy ne vždy je možné implementovat elektrický či mechanický senzor. Důvody mohou být různé, jako nevyhovující podmínky vnějšího prostředí (například přítomnost elektromagnetických vln), požadavek na kontinuální měření vícero veličin zároveň, zbytečně drahá konstrukce a provoz. Při těchto příležitostech nastupují vláknové senzory, které dokáží měřit vícero veličin zároveň, v místě měření nemusí být přítomno žádné napájení, měří s vysokou přesností a spolehlivostí a jejich konstrukce není nijak složitá. V současné době jsou tyto typy senzorů na vzestupu a to především ve stavebnictví.

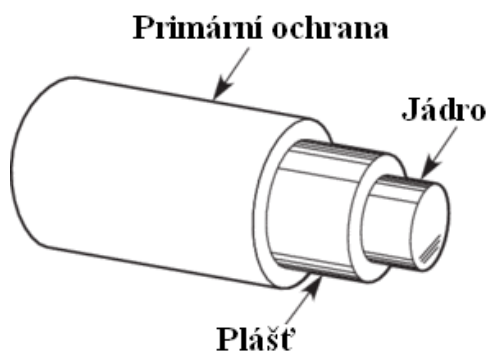
Má práce spočívala v seznámení se se strukturou Braggovské mřížky a jejím návrhem v programovém softwaru RSoft GratingMOD. V tomto simulačním prostředí jsem zkoušel jednotlivé parametry měnit a získat tak strukturu, která by se označila jako ideální pro měření teploty a změny relativní délky.

Ve společnosti Safibra s.r.o. jsem mohl strukturu Braggovské mřížky osobně navrhnout, změřit a také s ní pracovat. S časem jsem zjistil, že jedny z nejdůležitějších parametrů u tohoto typu senzoru jsou jeho koeficienty na přepočítání zisku teploty, nebo pnutí. To je z toho důvodu, že drtivá většina měřících přístrojů sleduje optický signál a jeho parametry pro odraženou nebo prošlou vlnovou délku. z těchto dat dopočítávají hledaný parametr. Proto bylo realizováno měření čtyř vláknových senzorů, na kterých jsem hledal a dopočítával jejich koeficient, abych zjistil míru jejich odlišnosti v závislosti na jejich referenční vlnové délce a typu primární ochrany.

2 Teoretický popis

2.1 Optické vlákno

Optické vlákno je nejdůležitější prostředek pro optické komunikační systémy, stejně tak jako pro optické měřicí metody a systémy. Základní struktura optického vlákna je znázorněna na obrázku 1. Optické vlákno v základu obsahuje jádro, plášť a primární ochranu. Pro posílení mechanické odolnosti je vlákno opatřeno také sekundární ochranou.



Obrázek 1: Základní struktura optického vlákna. Převzato z [1]

Vedení a šíření světla v optickém vlákne je založeno na totálním vnitřním odrazu mezi jádrem a pláštěm. Díky extrémně nízkému útlumu v oxidu křemičitém na vlnové délce 1550 nm, mohou optická vlákna přenášet optické signály na velmi dlouhou vzdálenost bez výrazné ztráty optického výkonu. Pro pochopení mechanismu šíření optického signálu ve vlákne, je potřeba znát koncept odrazu a lomu elektromagnetických vln na optickém rozhraní.[2]

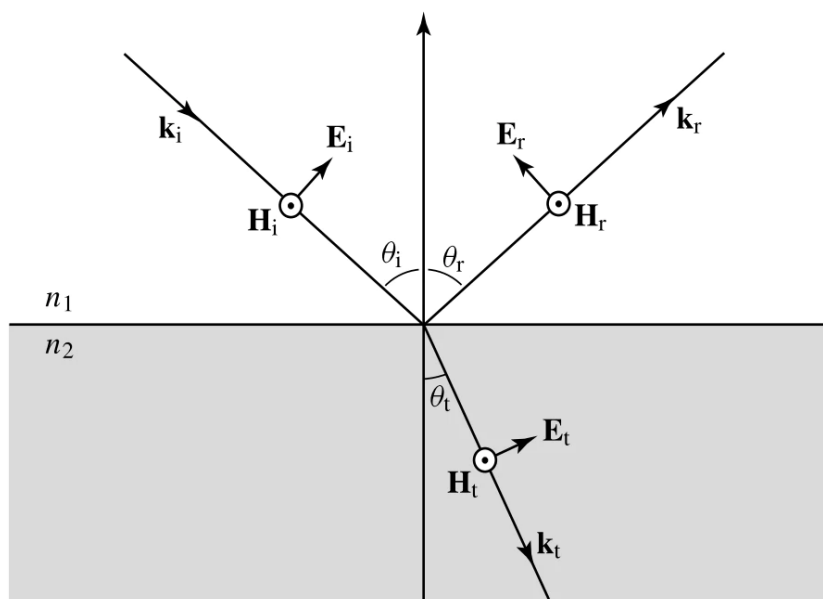
2.2 Zákon odrazu a lomu

Optické rozhraní je obecně definováno jako rovina, kde dojde k narušení kontinuity optického svazku. Například vodní hladina je optickým rozhraním, protože dojde k náhlé změně indexu lomu. Voda má index lomu $n = 1,33$ a index lomu vzduchu je $n = 1$.

Pro zjednodušení byly učiněny následující předpoklady:

- Šíření rovinné vlny
- Lineární médium
- Izotropní prostředí
- Hladké planární optické rozhraní

Jak je znázorněno na obrázku 2, mezi dvěma prostředími s různými indexy lomu n_1 a n_2 je vytvořeno optické rozhraní. Rovinná vlna se promítá na optické rozhraní pod úhlem dopadu θ_1 . Optická vlna je lineárně polarizovaná a její vektor amplitudy pole lze rozložit na dvě ortogonální složky. Rovnoběžnou a kolmou k rovině dopadu. Na optickém rozhraní se část energie odráží zpět a část se energie se láme přes rozhraní.[2]



Obrázek 2: Odraz a lom vlny na rozhraní dvou prostředí. Převzato z [3]

Snellův zákon lomu:

$$n_2 \cdot \sin\theta_2 = n_1 \cdot \sin\theta_1 \quad (1)$$

udává směr šíření lomené vlny vzhledem ke směru šíření vlny dopadající. Změna směru šíření vlny je úměrná rozdílu indexů lomu na rozhraní. Snellův zákon je odvozen na základě relativního indexu lomu, který je stanoven podílem rychlostí světla v_1 a v_2 . Kde

$$v_1 = \frac{c}{n_1 \cdot \sin\theta_1} \quad (2)$$

$$v_2 = \frac{c}{n_2 \cdot \sin\theta_2} \quad (3)$$

a zároveň platí skutečnost, že $v_1 = v_2$. Ze Snellova zákona tedy plyne, že $\theta_2 > \theta_1$ společně s $n_2 < n_1$. [2]

2.3 Úplný odraz

Úplný odraz nastává v momentě vzniku kritického úhlu dopadu paprsku na rozhraní. Nutné podmínky pro kritický úhel závisí na podmínkách rozhraní.

Pokud $n_1 < n_2$, tak se paprsek pohybuje z opticky řidčího prostředí do opticky hustšího a neexistuje možnost vzniku úplného odrazu.

Pokud ale $n_1 > n_2$, tak může dojít k úplnému odrazu, kde úhel $\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$. Můžeme tedy vyvodit závěr, že všechny úhly kdy $\theta_1 > \theta_c$, splňují tuto podmínku. [2] Úplný odraz je primárně využíván v optických vláknech se skokovou změnou indexu lomu.

2.4 Numerická apertura

Numerická apertura je parametr, který se používá k určení největšího úhlu θ_a , pod kterým může paprsek vstupovat do optického vlákna. Aby paprsek světla mohl být veden v optickém vláknu, je k tomu potřeba úplný odraz, který nastane v jádře optického vlákna (uvažujeme optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu). Numerická apertura je obecně definována jako:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4)$$

Pro jednovodová optická vlákna se doporučuje rozdíl indexů lomu jádra a pláště, menší než je 1%. V tomto případě tedy můžeme vztah (4) zjednodušit na:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (5)$$

..

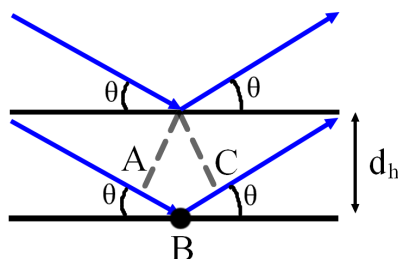
Kde $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$, jedná se o normalizovaný rozdíl indexu lomu jádra a pláště.[2]

2.5 Braggova difrakce

Difrakce je fyzikální jev, kdy se elektrony struktury rozkmitají s frekvencí odpovídající vlnové délce záření. Tyto kmitající elektrony jsou nyní zdrojem sekundárního záření a jako takové se šíří všemi směry. Za pomoci interference těchto vln se některé směry tohoto záření posílí a některé zase naopak vyruší.

Aby ovšem k tomuto jevu mohlo dojít, je potřeba splňovat určité geometrické podmínky. Základním předpokladem je srovnatelná velikost vlnové délky záření s rozměry objektu. Dále záleží i na dopadajícím záření a orientaci struktury. Tyto podmínky lze vyjádřit například Braggovou rovnicí.

Tuto rovnici zformuloval Sir William Lawrence Bragg a společně s otcem vyvinuli Braggovu metodu na určování krystalové struktury. Tento objev ale nepomohl pouze k určování krystalové struktury, ale i k měření vlnové délky, což se uplatňuje dnes ve vláknové senzorce. Následně byli roku 1915 oceněni Nobelovou cenou za fyziku.



Obrázek 3: Dopad záření na strukturu.

Představa W. L. Bragga byla v pojetí difrakce jako odrazu rentgenového záření na strukturální rovině krystalu. Na obrázku 3 jsou vidět rovnoběžné paprsky dopadající pod úhlem θ na osnovu mřížkových rovin, které jsou od sebe vzdáleny o hodnotu d_h . Tyto paprsky se odráží od osnovy rovin pod stejným úhlem. Dráhový rozdíl těchto vln je dán jako:

$$(AB + BC) = (d_h \cdot \sin\theta + d_h \cdot \sin\theta) \quad (6)$$

Ke konstruktivní interferenci a následně difrakci dojde v případě, kdy odražený paprsek od jedné roviny se zpozdí vůči paprsku odraženému od roviny druhé, právě o celý násobek m jeho vlnové délky λ [4]. Což je splněno právě tehdy, když platí Braggova rovnice:

$$2 \cdot d_h \cdot \sin\theta = m \cdot \lambda \quad (7)$$

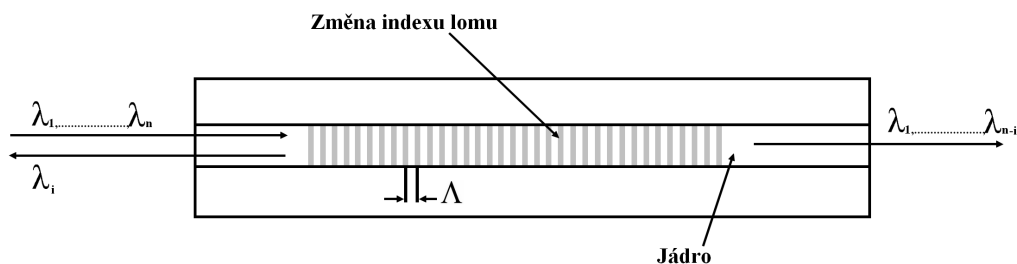
Pro difrakci prvního řádu musí platit, že $\lambda < 2 \cdot d_h$.

2.6 Braggovská mřížka

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, nejrozšířenější uplatnění této rovnice je ve vláknových senzorech, které jsou označovány jako FBG, nebo-li vláknová Braggovská mřížka. Braggovská mřížka je zapisována jako periodické změny indexu lomu do jádra optického vlákna podél jeho osy. Výsledný index lomu zapisované struktury je počítán jako $(n_1 + \Delta n_1)$. Charakteristika takovéto struktury je primárně ovlivněna mřížkovou periodicitou Λ a poté i délkou této struktury L . Pokud dojde k interakci světla a mřížky, část světelného spektra je na mřížce odražena, vzhledem k rozdílu indexu lomu jádra a mřížky. Centrální vlnovou délku tohoto odraženého spektra můžeme nazývat jako Braggovskou a označit ji λ_B . Na následujícím vzahu (8) můžeme vidět závislost této vlnové délky na mřížkové periodě.

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (8)$$

Kde n_{eff} je efektivní index lomu. Zároveň měřením velikosti amplitudy tohoto odraženého spektra dostaneme přímo změřenou periodicitu mřížky Λ . Což má za následek, že každá změna parametrů n_{eff} a Λ mění odraženou velikost spektra.[5]



Obrázek 4: Struktura optického vlákna s Braggovskou mřížkou

Pro výpočet refraktivity mřížkové struktury ve vlákně se využije znalost šířící se vlny dopředné (9) a zpětné (10) v optickém vláknu:

$$A(z) = a_1 e^{-\gamma z} + a_2 e^{\gamma z} \quad (9)$$

$$B(z) = b_1 e^{-\gamma z} + b_2 e^{\gamma z} \quad (10)$$

Po definování parametru ρ (11) a zisku koeficientů a a b , jsme schopni nalézt funkci pro popis refraktivity mřížkové struktury ve vlákně (12).

$$\rho = \frac{k}{j(\Delta\beta_i - \gamma)} \quad (11)$$

$$R = \frac{B(0)}{A(0)} = \rho \cdot \left(\frac{e^{-2\gamma L} - 1}{e^{-2\gamma L} - \rho^2} \right) \quad (12)$$

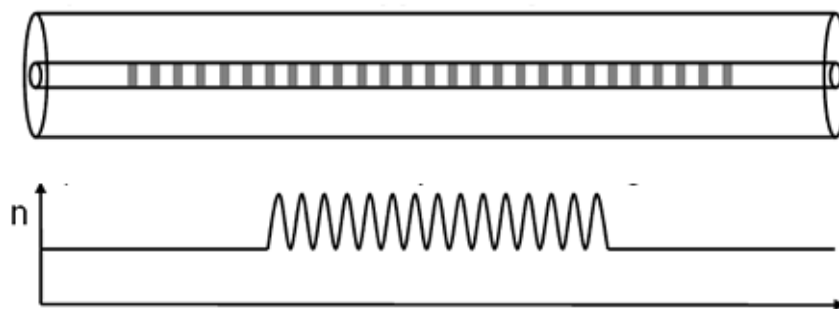
Kde k je sdružený koeficient, L je délka struktury, γ je konstanta šíření a β_i je fázová konstanta.[2]

2.6.1 Typy Braggovských mřížek

Braggovské mřížky nejsou pouze jednoho typu. V dnešní době rozlišujeme mřížky uniformní a neuniformní. Liší se primárně tvarem struktury, využitím a výsledným odraženým spektrem.

1. Uniformní

Tento typ mřížky má po celé délce konzistentní strukturu, zobrazenou na obrázku 5. Nedochází zde ke změně tvaru struktury, ani ke změně indexu lomu jednotlivých segmentů. Jedná se o základní typ Braggovské mřížky.



Obrázek 5: Uniformní struktura. Převzato z [6]

2. Čířpované

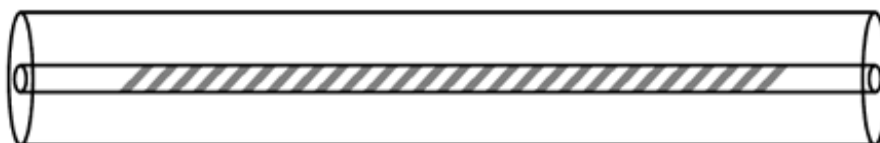
Tvar jednotlivých segmentů této mřížky se postupně mění s délkou struktury. Tento typ je často využíván ve WDM, jelikož potlačuje vliv disperze.



Obrázek 6: Čířpovaná struktura. Převzato z [6]

3. Nakloněné

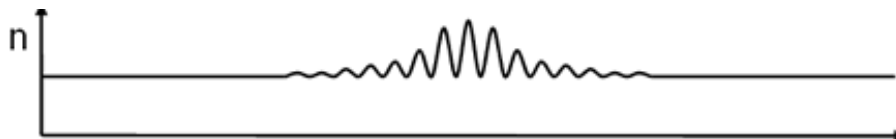
U tohoto typu mřížky jsou segmenty nakloněné pod určitým úhlem, aby se část energie záření dostala do pláště vlákna. To má za příčinu vznik minim (ghost) na kratších vlnových délkách, než je centrální odražená vlnová délka. A zároveň můžeme na spektru pozorovat vliv plášťových vidů. Díky tomu se tento typ vlákna dá využít na snímání změn indexu lomu v okolí vlákna. Například jako biosenzor.



Obrázek 7: Nakloněná struktura. Převzato z [6]

4. Apodizovaná

V případě požadavku na potlačení postranních vlnových délek výsledného spektra, se používá apodizovaný typ mřížky. Uniformní struktura je do jádra zapisována s postupnou modulací změn indexu lomu mřížky. Tudíž střed této struktury obsahuje největší změnu indexu lomu vůči jádru a na koncích struktury je tato změna indexu lomu nejmenší. To má za následek lepší odfiltrování nežádoucích vlnových délek. Tento typ je pro své vlastnosti nejčastěji využíván ve vláknové senzorce. Například na měření relativního prodloužení, nebo na měření teploty.



Obrázek 8: Spektrum odražené apodizované struktury. Převzato z [6]

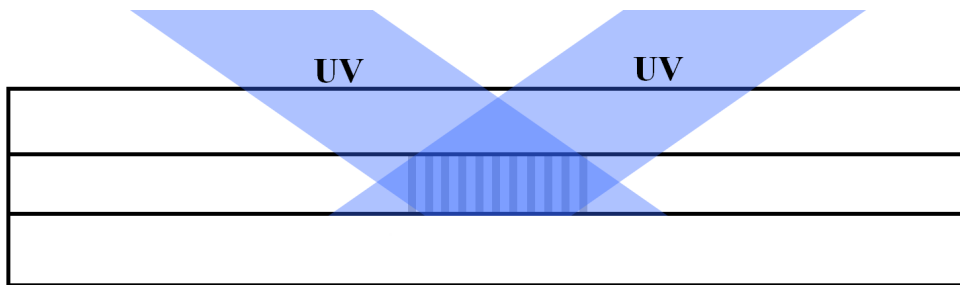
2.6.2 Možnosti zápisu mřížky do jádra

Mřížka je do jádra zapisována jako změna indexu lomu. Tyto změny mohou být náhlé, nebo pozvolné. Záleží na požadovaných parametrech mřížky. Samotný zápis je možné provést několika způsoby, které jsou v této kapitole popsány.

1. Holografický zápis uniformní mřížky

Jak je znázorněno na obrázku 9, mřížkový tvar struktury je vytvořen interferencí dvou soustředěných UV záření s odpovídajícím úhlem a požadovanou kvalitou záření (parametr koherence, kvalita paprsku, atd).

Aby bylo docíleno co nejvýraznějšího mřížového tvaru struktury a kontrastního poměru, tak oba paprsky musí mít totožnou intenzitu. Zároveň také musí mít stejnou frekvenci, amplitudu a vysokou prostorovou koherenci.[5]

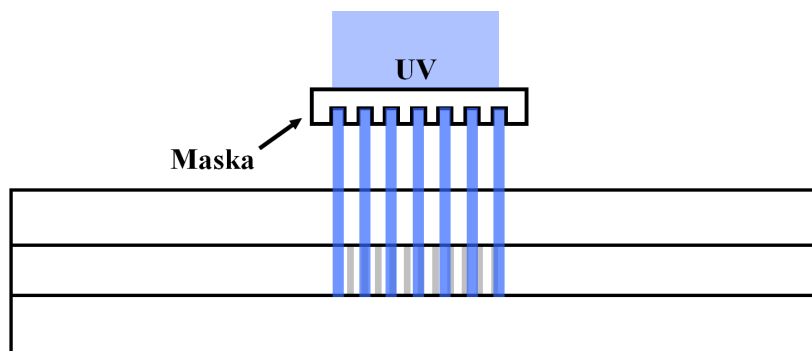


Obrázek 9: Zápis uniformní mřížky metodou dvou UV záření

Pro opakovatelnou tvorbu vysoce kvalitních struktur mřížek, je potřeba kontrola těchto tří parametrů:

- Kvalita a stabilita obou paprsků
- Přesný úhel paprsků pod kterým je struktura zapisována
- Celková mechanická stabilita celé zapisovací sestavy

Velice častý je zápis mřížkové struktury za použití fázové masky. V tomto případě se využívá pouze jeden paprsek UV záření, který je nasměrován na masku, skrze kterou je zaznamenána změna indexu lomu do jádra ve vlákne. Tento proces je znázorněn na obrázku 10.



Obrázek 10: Zápis uniformní mřížky metodou fázové masky

2. Holografický zápis neuniformní mřížky

Zápis neuniformní struktury je obdobný proces, jako je tomu u zápisu struktury uniformní. Pokud bychom se zaměřili třeba na čírpovanou strukturu, tak i v tomto případě výroby můžeme použít fázovou masku. Zde je ale třeba používat aperiodické masky, které zápis požadované čírpové struktury do jádra umožní.

Stejně tak můžeme využít dva paprsky UV záření, kdy jeden je nasměrován přímo na místo zápisu, zatímco druhý paprsek je veden na místo zápisu přes ploskovypuklou čočku. Čočka v tomto případě zařizuje aperiodickou interferenci, která je potřebná pro tvorbu čírpové struktury.[5]

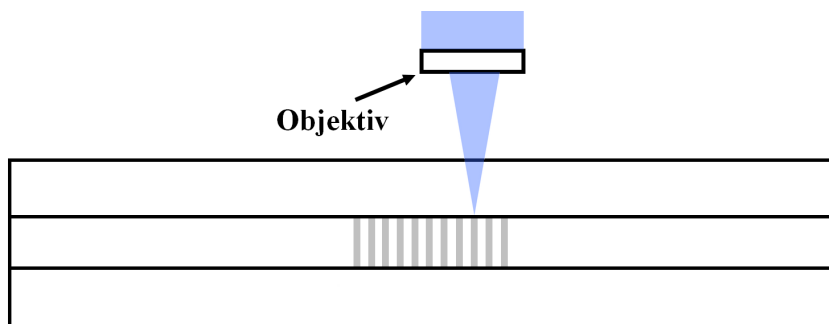
3. Bod po bodu

Zde je mřížka zapisována do jádra po jednotlivých segmentech. Díky tomu můžeme touto metodou získat mřížky takzvaně vyrobené na míru. Nutno ale podotknout, že tento proces trvá ze všech procesů nejdéle.

4. Zápis femtosekundovým laserem

V současné době je nejrozšířenější způsob zápisu Braggovské mřížky přes fázovou masku. S tím rozdílem, že UV záření bylo nahrazeno femtosekundovým laserem. Zápis Braggovské mřížky přes fázovou masku je poměrně jednoduchý, nicméně výroba specifické masky je poměrně náročná. Pokud se budeme bavit o apodizačních mřížkách, tak náročnost fázové masky se o to více zkomplikuje, jelikož různé apodizační mřížky vyžadují různou fázi masky.

Stejně jako u metody zápisu mřížky přes fázovou masku, je možné využít femtosekundový laser pro zápis mřížky metodou bod po bodu. To s pomocí fokusačního objektivu, který je mezi laserový paprsek a vlákno vložen, viz obrázek 11.



Obrázek 11: Zápis uniformní mřížky metodou femtosekundového laseru

Femtosekundový laser má výhodu ultrakrátké šířky pulzu a vysokého výkonu. Mřížky zapsané do jádra vlákna femtosekundovým laserem mají vysokou teplotní stabilitu, což může být žádoucí pro vysokoteplotní vláknové senzory.[7]

2.6.3 Koeficienty Braggovy vlnové délky

V případě vláknové sensoriky jsou měřené veličiny zakódovány do Braggovy vlnové délky. Důsledkem změny periodicity segmentů mřížky, případně efektivního indexu lomu, je změna výsledné Braggovy vlnové délky. Tato skutečnost umožňuje jednomu vláknovému senzoru snímat více měřených veličin skrze změnu fyzického parametru Y . Efekt změny tohoto parametru Y může být vyjádřen skrze odpovídající koeficienty.

$$(1/\lambda_B)(\delta\lambda_B/\delta Y) = (1/\Lambda_B)(\delta\Lambda_B/\delta Y) + (1/n_{eff})(\delta n_{eff}/\delta Y) \quad (13)$$

Základními měřenými veličinami ve vláknové sensorice jsou teplota T , relativní prodloužení ϵ a tlak P . Těmto veličinám odpovídají koeficienty, které jsou klíčové pro správný výpočet změny Braggovy vlnové délky.[5]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \alpha \cdot \Delta T \quad (14)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \beta \cdot \Delta\epsilon \quad (15)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \gamma_P \cdot \Delta P \quad (16)$$

Kde α je teplotní koeficient, β je koeficient relativního prodloužení a γ_P je koeficient tlaku.

Velkou výhodou ve vláknové sensorice je obrovská citlivost na některé měřené veličiny, jako je například relativní prodloužení. V případě teploty lze zase pozorovat lineární závislost až do hodnoty 350 °C, což je výhodné pro určité zjednodušení výpočtů při měření.[5]

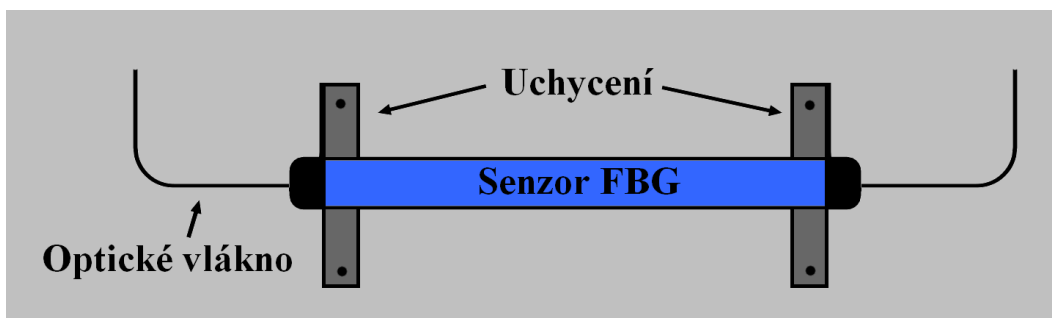
3 Využití FBG v optovláknové sensorice

3.1 Monitorování relativního prodloužení kovového mostu

Problematika dnešních mostů se točí kolem jejich životnosti a celkového stavu. V případě kovových mostů jde především o jejich materiálové vlastnosti a mechanické deformace. S těmito očekávanými problémy se ale pojí i jejich modernizace. Postupem času roste frekvencovanost dopravy, což v některých případech může vyvolat větší mechanické deformace, pro které už daný most nebyl navržen a je potřeba takovýto most opravit a modernizovat.[8]

V případech kdy je potřeba vypracovat plán na nový most, případně opravit starý, je ideální znát chování takovéto stavby v praxi. To ovšem ale znamená mít velké množství dat, ze kterých lze toto chování mostu vyvodit a dále ho zavést do plánu stavby. Pro získání takovýchto dat je potřeba neustálý monitoring konstrukce v provozu, případně monitoring v jednotlivých etapách stavby konstrukce.[9]

Pro takovýto typ měření je ideální použití vláknového senzoru s Braggovskou mřížkou. Senzor může být použit jak na novostavbu, tak pro sledování životnosti starého mostu. Při většině případů v praxi je použito senzorů více, aby se lépe popsalo chování dané konstrukce. Zároveň je také možné mít umístěnou monitorovací jednotku mimo oblast měřené konstrukce, což by se v případě elektrických senzorů výrazně prodražilo.[10] Jeden z návrhů takového senzoru na měření mechanického namáhání mostu, je zobrazen na obrázku 12.



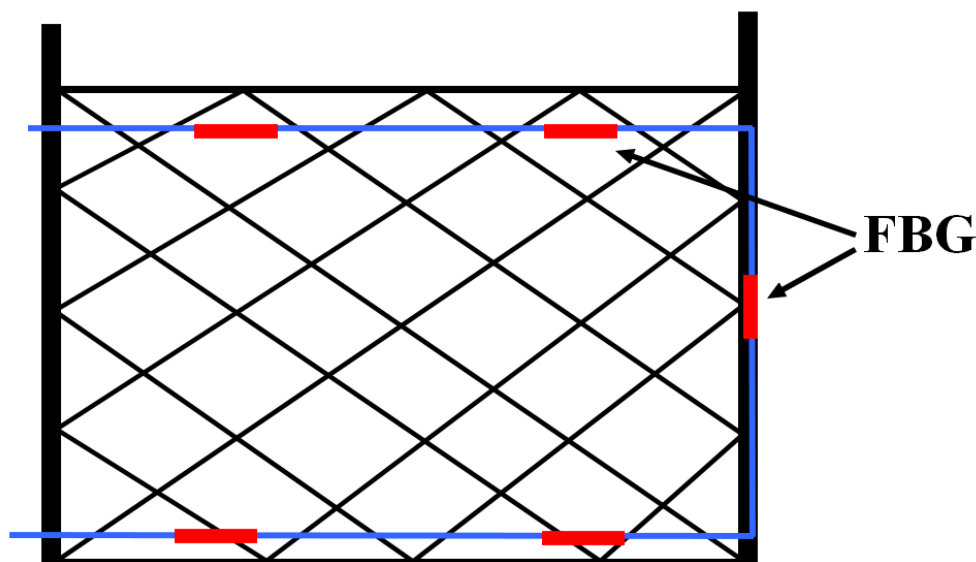
Obrázek 12: Náčrt senzoru pro měření mechanického namáhání

Braggovská mřížka dokáže zachytit změnu relativního prodloužení po celé délce vlákna, což ale u tohoto senzoru není žádoucí. Pokud bychom chtěli takovýto senzor zkonstruovat, musíme znát délku měřeného místa. Na základě tohoto parametru se vytvoří trubička, z materiálu s ideálními vlastnostmi pro dané měření, kterou se provlékne optické vlákno s Braggovskou mřížkou a na koncích této trubičky se vlákno zafixuje lepidlem. Vždy musí být brán ohled na typ lepidla který je pro danou aplikaci senzoru používán. Touto fixací docílíme páky a díky tomu budeme měřit mechanické namáhání především v místě které jsme si určili. Optické vlákno a trubička s mřížkou jsou opatřeny ochranou vůči vnějším vlivům, například silnější trubičkou a armorovaným kabelem. Takto sestavený senzor se poté umístí na měřené místo stavby, za pomoci úchytek.

3.2 Bezpečnost

Stejně jako je tomu u modernizace ve stavebnictví, tak i v oblasti bezpečnosti se s postupem času zvyšují nároky na moderní a efektivní senzory. Idea moderního bezpečnostního systému, je kombinace senzorů s kamerovými systémy. Je to kvůli tomu, že senzory zachycují aktuální událost a alarmují ostrahu, která má za úkol vzniklý problém řešit. Kamerový systém v tomto případě uchovává záznam jako důkazní materiál.

Zhlediska použití senzorů FBG pro zabezpečení areálu, máme několik možností aplikace senzoru. Jedna z nich je použití takzvaného řetízku za což se označuje delší úsek optického vlákna opatřen více jak jednou optickou mřížkou. Takovéto vlákno se poté opatří jak sekundární tak i posilující ochranou proti mechanickému poškození. Takto sestrojený senzor se poté může aplikovat přímo na místo zabezpečení, což lze vidět na obrázku 13.



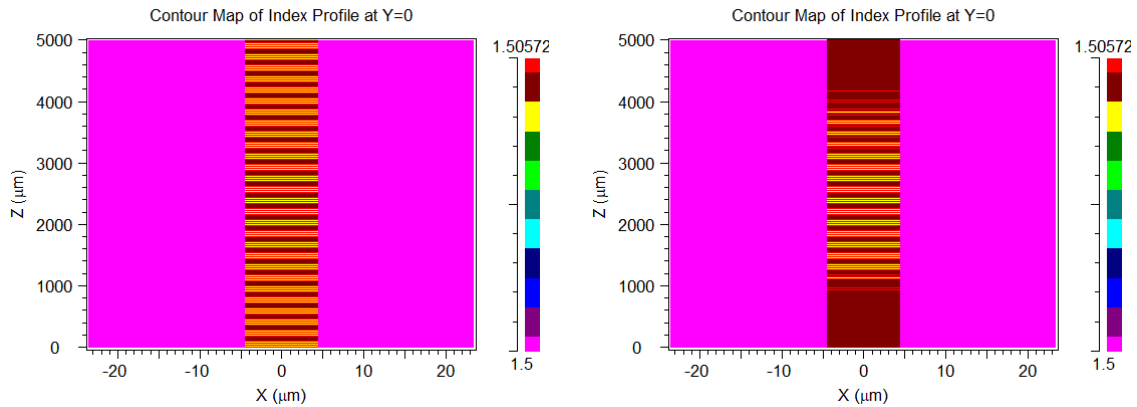
Obrázek 13: Umístění senzoru FBG na drátovém plotě

Optické vlákno je zde nataženo ideálně po obvodu drátového plotu, přičemž rozmístění senzorů FBG by mělo zachovávat rozestupovou vzdálenost. Mřížky umístěné v horní části drátového plotu vybudí změnu návratové vlnové délky v momentě, kdy dojde k pokusu o přelezení plotu. To z toho důvodu, že dojde k pnutí drátového plotu. FBG senzory jsou umístěny ve spodní části plotu pro případy, kdyby se dotýčný pokusil plot podlézt. Čímž se bude opakovat situace jako tomu je u senzorů umístěných v horní části drátového plotu. Na obrázku 13 je také vidět, že jedna mřížka je umístěna na kotvícím sloupcu plotu. To je z toho důvodu, aby nedošlo k poškození sloupku a tím k průniku do hlídaného objektu.

Ovšem nemusí vždy jít o násilný pokus průniku do objektu. Díky velké citlivosti FBG senzoru, je možné pozorovat i přestřížení plotového drátu, díky šířícím se vibracím po kovových částech plotu.[11] Samozřejmě v momentě kdy je drát přestřížen, je okamžitě upozorněna ochranka ohledně narušení bezpečnosti.

4 Simulace struktury FBG a závislost parametrů

Veškeré simulace byly realizovány v programu RSoft - GratingMOD [12]. Tento program slouží jako nástroj pro analýzu a syntézu vlnovodných obvodů, ať už se jedná o integrované planární mřížkové struktury nebo vláknovou optiku. Na následujícím obrázku je znázorněna struktura Braggovské mřížky. Obrázek znázorňuje mřížku s uniformní strukturou a obrázek v pravé části znázorňuje apodizaci této struktury (důvod proč bude apodizace u naší mřížky žádána bude vysvětlen v následující kapitole).



Obrázek 14: Simulace struktury FBG pro vlnovou délku 1558

Tabulka 1: Parametry znázorněné struktury

$n_{\text{jádra}}$	1,5052
$n_{\text{okolí}}$	1,5000
L [μm]	5000
d [μm]	9

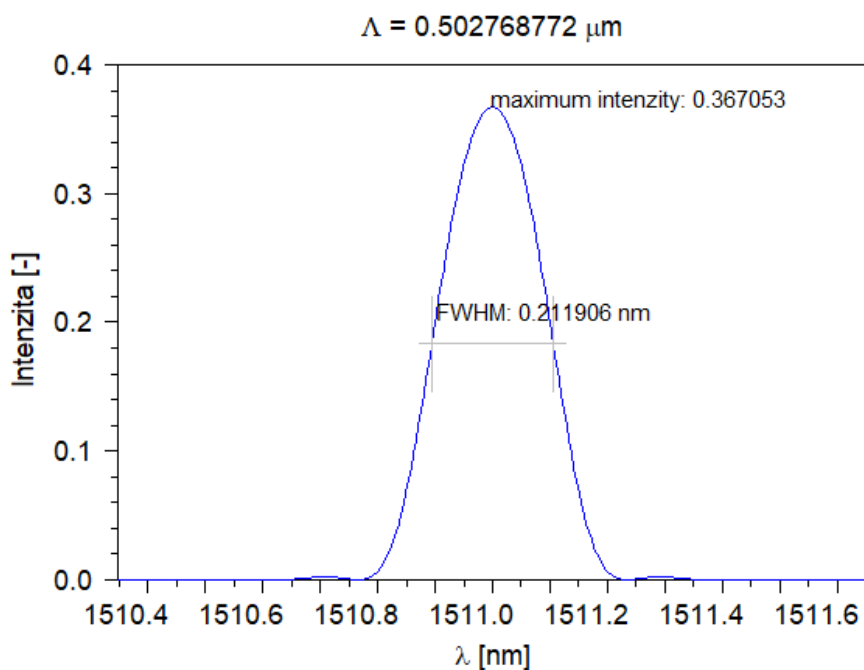
Kde $n_{\text{jádra}}$ je index lomu jádra vlákna, $n_{\text{okolí}}$ je index lomu pláště vlákna, L je délka mřížkové struktury a d je průměr jádra vlákna.

Program RSoft - GratingMOD umožňuje nalézt i žádané parametry pro návrh mřížky jako je například periodičita struktury, a to díky znalosti Braggovy podmínky a známým parametrům struktury. Je taky možné zjistit výslednou šířku spektra v polovině maxima (FWHM) a amplitudu odraženého spektra.

4.1 Odražené spektrum pro různé vlnové délky

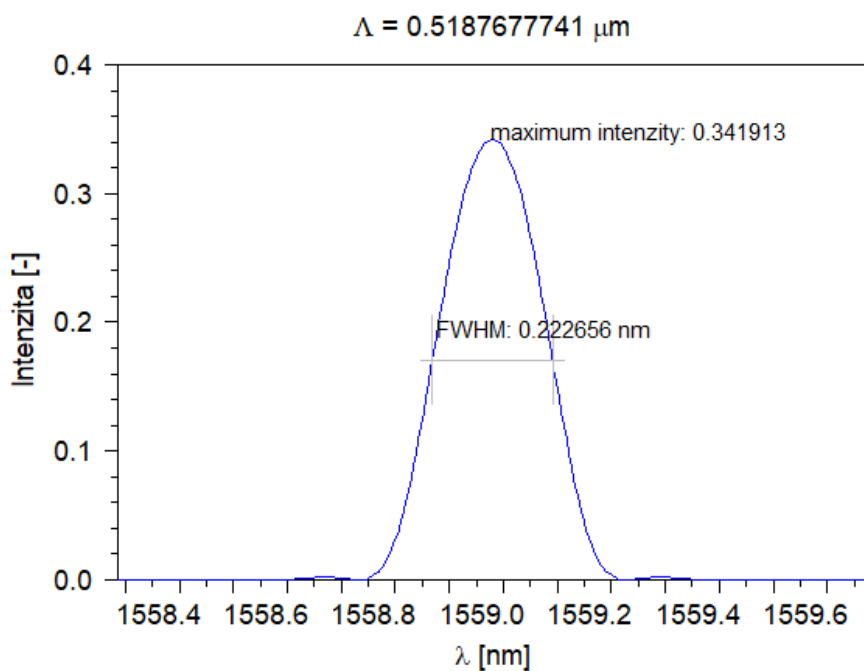
Nejprve bylo potřeba si ujasnit pro jaké vlnové délky by měly dané struktury být realizovány. Vzhledem k tomu, že jsem měl přístup k monitorovací jednotce FBGuard 1550, zaměřil jsem se na spektrum, které bych mohl i následně změřit v praxi. Proto byly vybrány k simulaci vlnové délky 1511 nm, 1558 nm a 1583 nm. Krajní hodnoty spektra byly zahrnuty, ze zájmu o reálné chování mřížky v mezích spektra. Parametry struktury byly popsány v předchozí kapitole.

Na následujícím obrázku je znázorněno odražené spektrum pro vlnovou délku 1511 nm, zároveň jsou v grafu programem spočítány hodnoty pro periodicitu mřížky, maximum amplitudy odraženého spektra a FWHM. Při této analýze je zásadní spočtená hodnota periodicity struktury.

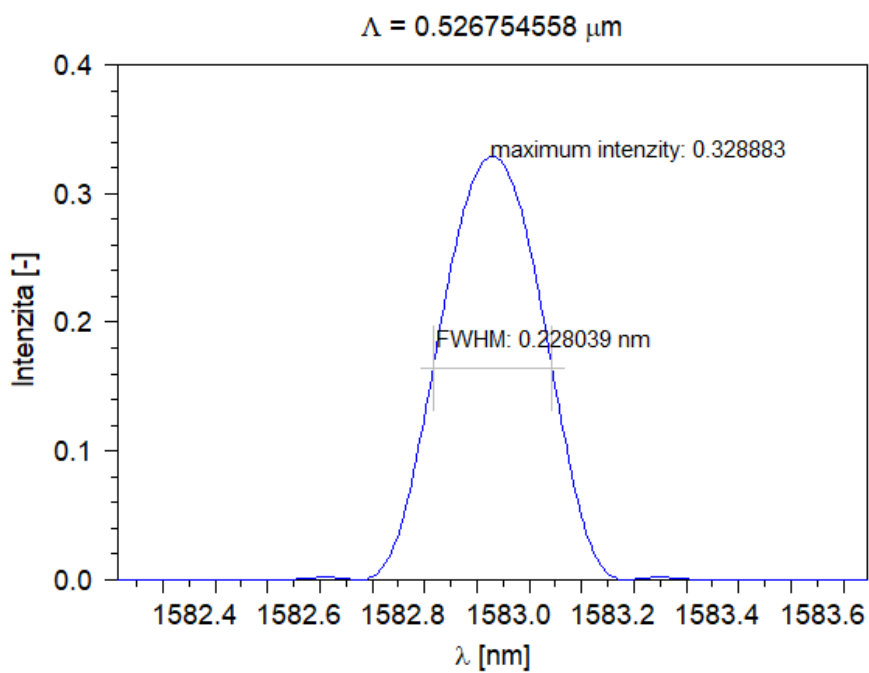


Obrázek 15: Spektrum a získané parametry FBG₁₅₁₁

Následně byla tato simulace zopakována pro vlnovou délku 1558 nm a 1583 nm. Předpoklad byl, že dojde ke změně periodicity a získem bude parametr, podle kterého se bude konstruovat výsledná struktura. Na následujícím obrázku je zobrazeno odražené spektrum struktury pro vlnovou délku 1558 nm a dále je ukázáno spektrum pro vlnovou délku 1583 nm.



Obrázek 16: Spektrum a získané parametry FBG_{1558}



Obrázek 17: Spektrum a získané parametry FBG_{1583}

Tabulka 2: Získané parametry výsledného spektra

	Λ [μm]	FWHM [nm]	Intenzita [%]
FBG ₁₅₁₁	0,502768772	0,211906	36,7053
FBG ₁₅₅₈	0,5187677741	0,222656	34,1913
FBG ₁₅₈₃	0,526754558	0,228039	32,8883

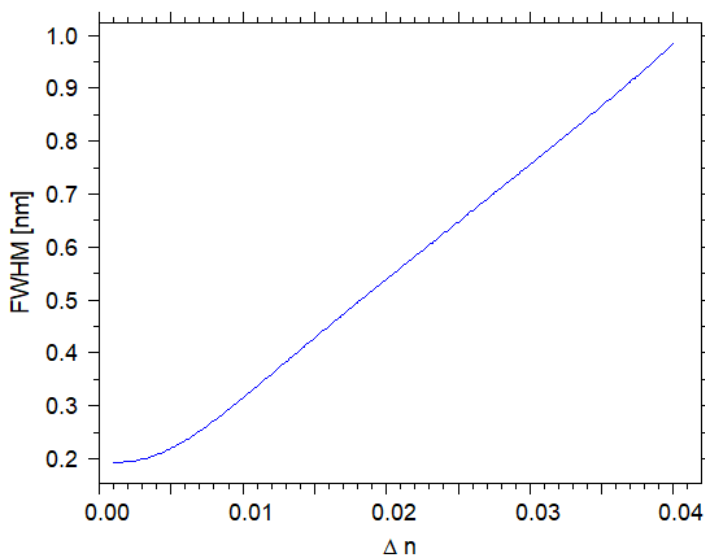
4.2 Závislosti parametrů

Vzhledem k tomu že změnou vlnové délky bylo docíleno změny tvaru spektra téměř ve všech jeho parametrech, tak bylo žádoucí ověřit, se kterými dalšími parametry lze takto pracovat. V následujících podkapitolách jsou měněny parametry struktury, nikoli vlnová délka vstupujícího záření.

4.2.1 Index lomu jádra

V první řadě byla pozornost zaměřena na změnu indexu lomu. Vzhledem k tomu jaké materiály je možné v dnešní době používat byly započaty simulace, které měnily index lomu jádra ve vlákně. Opět se jednalo o parametry FWHM, intenzitu amplitudy spektra a periodicitu. Simulace vycházely ze splnění podmínek Braggovy difrakce a pevně zadané vlnové délky 1550 nm.

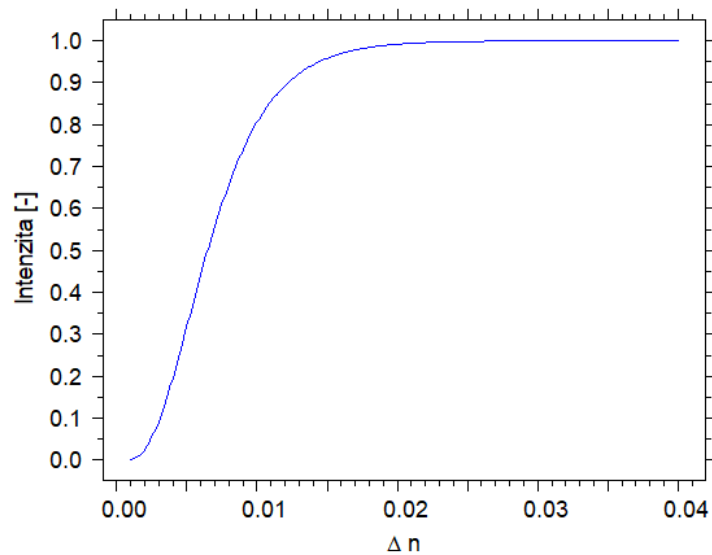
Na následujícím obrázku je vidět výsledná závislost FWHM na velikosti rozdílu indexu lomu jádra a pláště pro danou strukturu mřížky. Simulace byla spuštěna s přírůstkem 0,0001 od minimální hodnoty 0,001 až do maximální hodnoty 0,02.



Obrázek 18: Průběh FWHM v závislosti na rozdílu $n_{\text{jádra}}$ a $n_{\text{okolí}}$

Tento obrázek poukazuje na téměř lineární závislost od hodnoty rozdílného indexu lomu 0,0055.

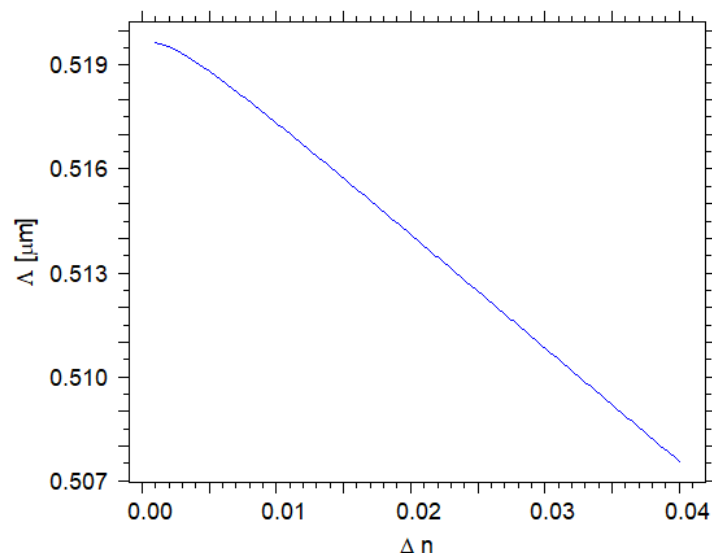
Následně byla provedena simulace závislosti velikosti intenzity amplitudy spektra k velikosti rozdílu indexu lomu jádra a pláště.



Obrázek 19: Průběh amplitudy spektra v závislosti na rozdílu $n_{\text{jádra}}$ a $n_{\text{okolí}}$

Očekávána byla nulová hodnota velikosti intenzity amplitudy v minimu rozdílu indexu lomu jádra a pláště. Co bylo překvapivé, byla hodnota Δn pro maximální intenzitu amplitudy spektra, která se podle simulace jevila jako 0,02.

V poslední simulaci byly analyzovány změny parametru rozdílu indexu lomu jádra a okolí, byla zkoumána periodičita struktury. Na obrázku níže je vidět výsledná závislost.

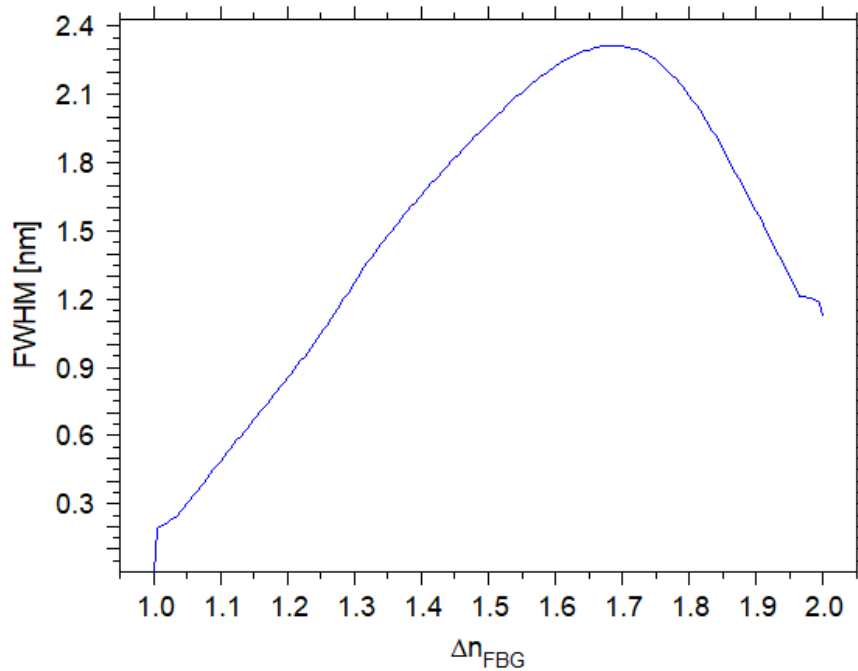


Obrázek 20: Průběh periodičity struktury v závislosti na rozdílu $n_{\text{jádra}}$ a $n_{\text{okolí}}$

Z obrázku je patrné, že s rostoucím rozdílem indexu lomu jádra a pláště se nám požadavek periodičity mřížkové struktury bude snižovat. Co je ale zajímavé, je opět téměř lineární závislost od hodnoty 0,005.

4.2.2 Index lomu mřížky

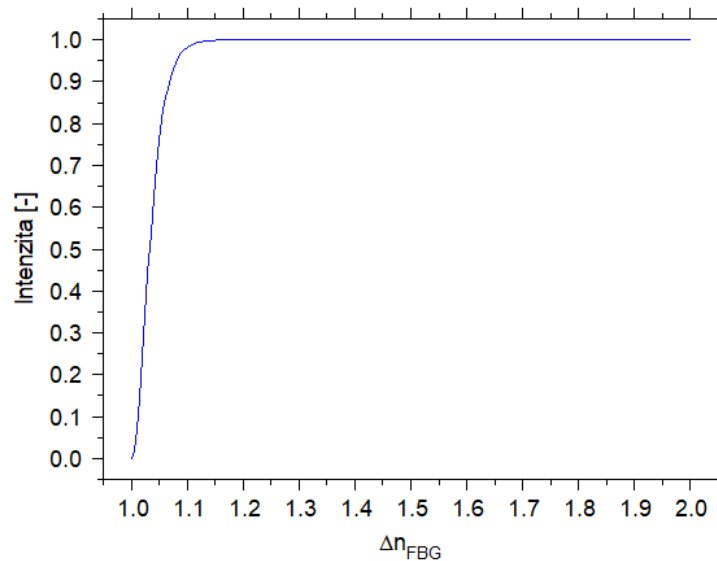
Následující simulace byly zaměřeny na indexu lomu Braggovské mřížky. Konkrétně na velikost rozdílu indexu lomu segmentu a jádra, ale i na velikost rychlosti změny indexu lomu jednotlivých segmentů struktury (Δn_{FBG}). Opět byly sledovány parametry FWHM, velikost amplitudy spektra a periodičita mřížky. Stejně jako u předchozích simulací se zde vycházelo z pevně dané vlnové délky a povinnosti splnit Braggovu podmínku.



Obrázek 21: Průběh FWHM v závislosti na velikosti rozdílu n segmentů struktury oproti jádru

Při dosažení hodnoty 1,7 pro veličinu Δn_{FBG} je patrný pokles šířky spektra v polovině jeho maxima.

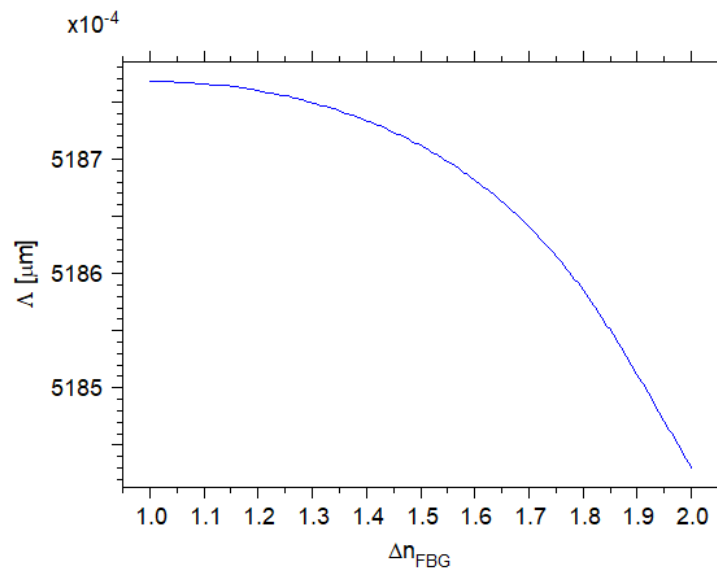
Další simulace měřila závislost změny modulační indexu lomu na velikosti amplitudy odraženého spektra.



Obrázek 22: Průběh amplitudy spektra v závislosti na velikosti rozdílu n segmentů struktury oproti jádru

Od určité hodnoty (1,1) se intenzita spektra projevuje jako maximální možná.

Poslední simulace hledala parametr periodicity mřížky při změně indexu lomu Braggovy mřížky.



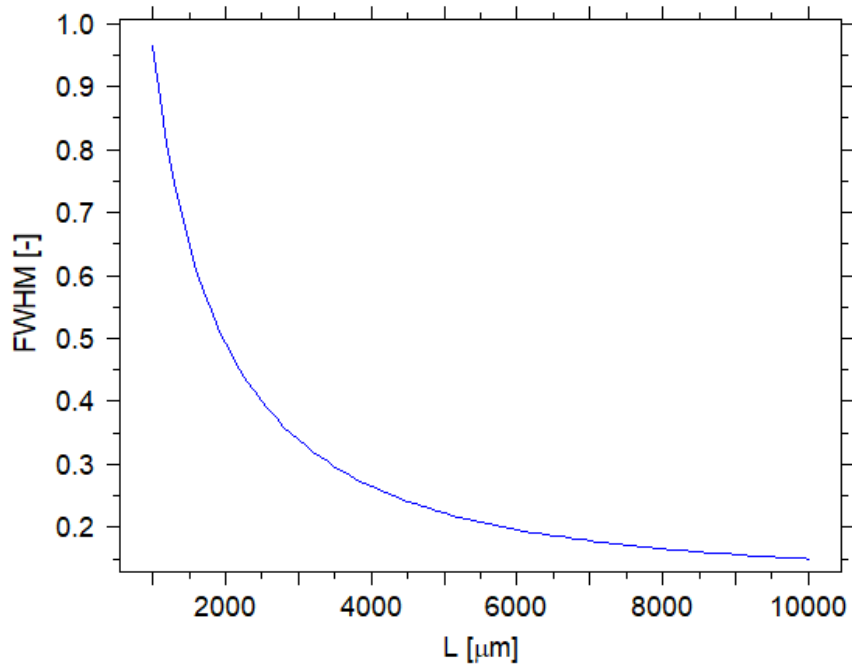
Obrázek 23: Průběh periodicity struktury v závislosti na velikosti rozdílu n segmentů struktury oproti jádru

Můžeme vidět, že požadavek periodicity mřížky na Braggovu difrakci klesá s rostoucí modulací indexu lomu mřížky. Což je očekávané vzhledem k zesílení intenzity, jak je znázorněno na předchozím obrázku.

4.2.3 Délka mřížky

Poslední parametr, na kterém byla prováděna simulace, je celková délka struktury mřížky. V tomto případě nemělo smysl dělat simulaci na periodicitu mřížky, jelikož nedocházelo k vnitřní změně struktury, ale pouze k jejímu prodloužení. Můžeme tedy konstatovat, že periodicitu by v případě této simulace zůstala zachována.

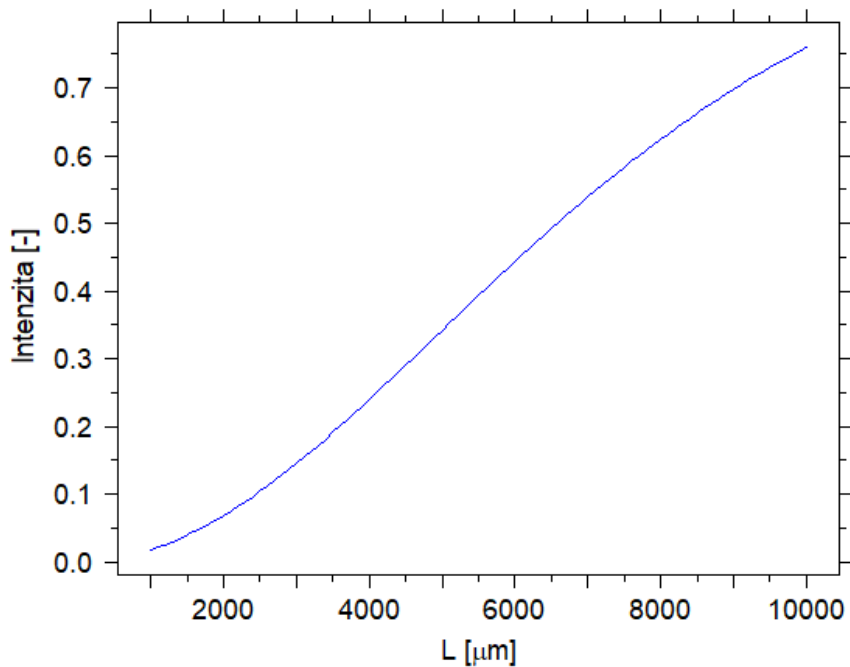
První simulace tedy zkoumá závislost FWHM na délce struktury mřížky.



Obrázek 24: Průběh FWHM v závislosti na délce struktury

Vzhledem k tomu, že mřížka má funkce rezonátoru a také filtrace, lze předpokládat, že čím delší bude struktura, tím více se odfiltrují nežádoucí vlnové délky a výsledné spektrum bude užší. Což můžeme vidět na předchozím obrázku.

Stejně tak lze očekávat posílení žádané vlnové délky a tedy i nárůst intenzity výsledného spektra. Následující simulace měla právě toto tvrzení otestovat a zjistit závislost velikosti amplitudy na délce struktury mřížky.

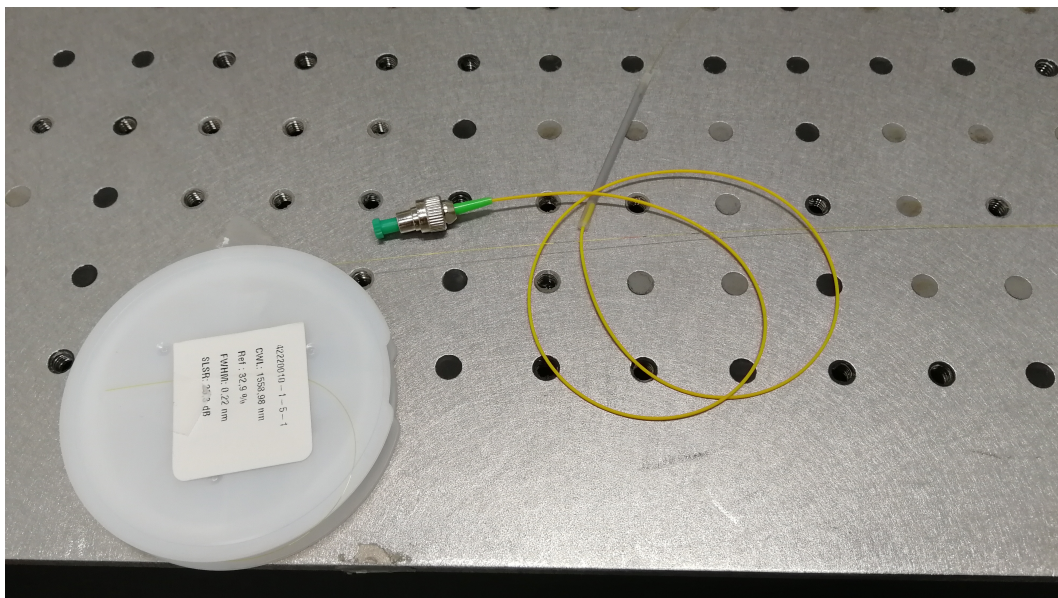


Obrázek 25: Průběh amplitudy spektra v závislosti na délce struktury

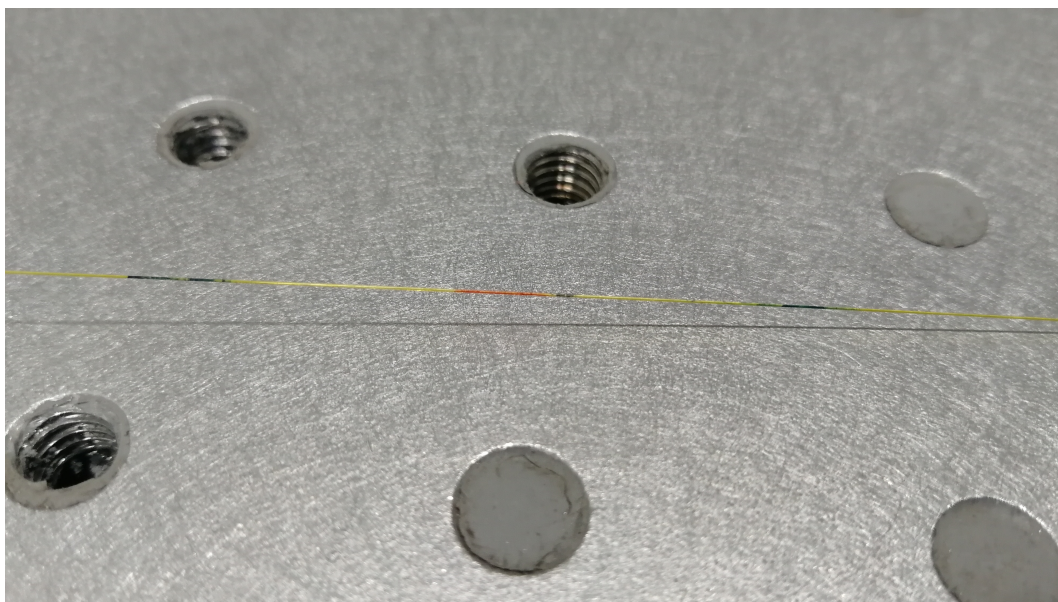
Z předchozího obrázku lze usoudit, že tvrzení bylo správné a pokud prodloužíme strukturu mřížky, dojde k posílení intenzity výsledného spektra.

5 Mřížky použité v praktickém měření

Veškerá měření související s touto prací probíhala v sídle společnosti Safibra s.r.o. s použitím místních měřicích přístrojů a vybavení. Použité mřížky byly zhotoveny ve spolupráci s touto společností. Níže jsou vypsány vybrané mřížky a jejich parametry.



Obrázek 26: Realizované vlákno se zapsanou mřížkou, opatřeno pig-tailem s konektorem FC/APC



Obrázek 27: Realizovaná mřížka FBG₁₅₅₈

V tabulkách 3 až 6, jsou uvedeny následující parametry: FWHM, SLSR (potlačení postraních amplitud), R (odrazivost), L (délka struktury), typ vlákna, NA (numerická apertura) a typ primární ochrany. Typy primární ochrany jsou zde uvedeny PI (polyimid) a akrylát.

Tabulka 3: Parametry mřížky FBG₁₅₁₁

$\lambda = 1511,00 \text{ nm}$						
FWHM [nm]	SLSR [dB]	R [%]	L [mm]	typ vlákna	NA	primární ochrana
0,24	16,8	30,7	5	SM1250	0,12	PI

Tabulka 4: Parametry mřížky FBG₁₅₅₈

$\lambda = 1558,98 \text{ nm}$						
FWHM [nm]	SLSR [dB]	R [%]	L [mm]	typ vlákna	NA	primární ochrana
0,22	25,3	32,9	5	SM1250	0,12	PI

Tabulka 5: Parametry mřížky FBG₁₅₈₃

$\lambda = 1582,93 \text{ nm}$						
FWHM [nm]	SLSR [dB]	R [%]	L [mm]	typ vlákna	NA	primární ochrana
0,28	23,8	38,6	5	SM1250	0,12	PI

Tabulka 6: Parametry mřížky FBG₁₅₅₀

$\lambda = 1550,05 \text{ nm}$						
FWHM [nm]	SLSR [dB]	R [%]	L [mm]	typ vlákna	NA	primární ochrana
0,18	19	93,87	10	SMF-28e	0,14	Akrylát

6 Teplotní koeficient

Měření bylo zahájeno zjišťováním teplotního koeficientu pro vybrané mřížky. To z toho důvodu, aby jedna z nich poté mohla být vybrána a použita jako teplotní kompenzace při měření změny relativního prodloužení. Jak již bylo zmíněno v úvodu práce. Znat teplotní koeficient je velice podstatné pro aplikaci senzoru. Ať už je důvodem použití mřížky jako teplotní kompenzace, nebo k měření teploty. Literatura uvádí změnu vlnové délky v závislosti na teplotě jako $11 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. (pro vlnovou délku 1550 nm)[5]

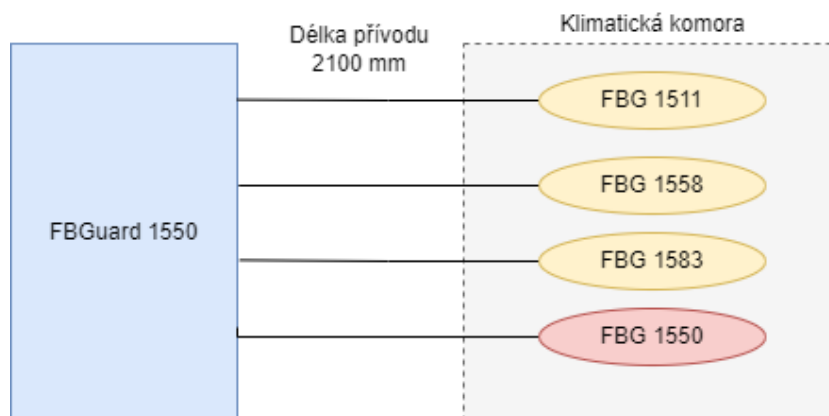
6.1 Zapojení pracoviště

Pro získání konkrétních hodnot teploty byla použita klimatická komora C 180 [13] a pro měření byla použita monitorovací jednotka FBGuard 1550 [14], která je vyfocena na obrázku níže.



Obrázek 28: Jednotka FBGuard 1550

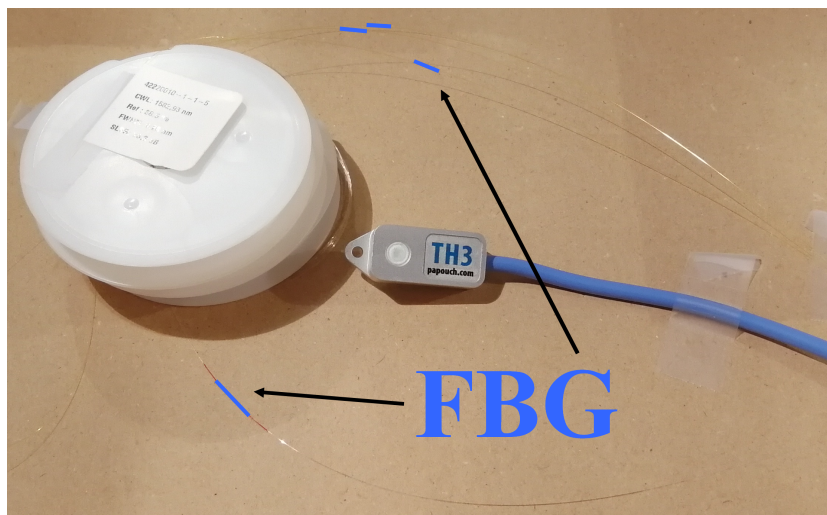
Monitorovací jednotka obsahuje 4 volné kanály. Na tyto kanály byla připojena vlákna s mřížkami opatřena konektory FC/APC. Následně byly tyto mřížky vloženy do klimatické komory.



Obrázek 29: Blokové schéma zapojení pro měření teplotního koeficientu

Klimatická komora obsahuje ventilátor pro rovnoměrné rozložení teploty v komoře. Vzhledem k velké citlivosti mřížek na vibrace byla vlákna s mřížkami umístěna do kartonové krabice, aby bylo zajištěno co nejmenší ovlivnění ventilátorem. Při tomto měření byly mřížky volně, to znamená že nebyly nijak mechanicky namáhány. Vše je vidět na následujícím obrázku, kde je vyfocen způsob umístění mřížek. Přičemž spodní mřížka

FBG₁₅₅₀ je oproti ostatním opatřena akrylátovou primární ochranou. Mezi mřížky byl umístěn snímač teploty a vlhkosti TH3 od společnosti Papouch [15], pro kontrolu teploty v komoře a zároveň v kartonové krabici. Jelikož by teplotní senzor komory nemusel být dostatečně přesný a teplota by mohla být mírně zkreslená.



Obrázek 30: Umístění FBG v komoře

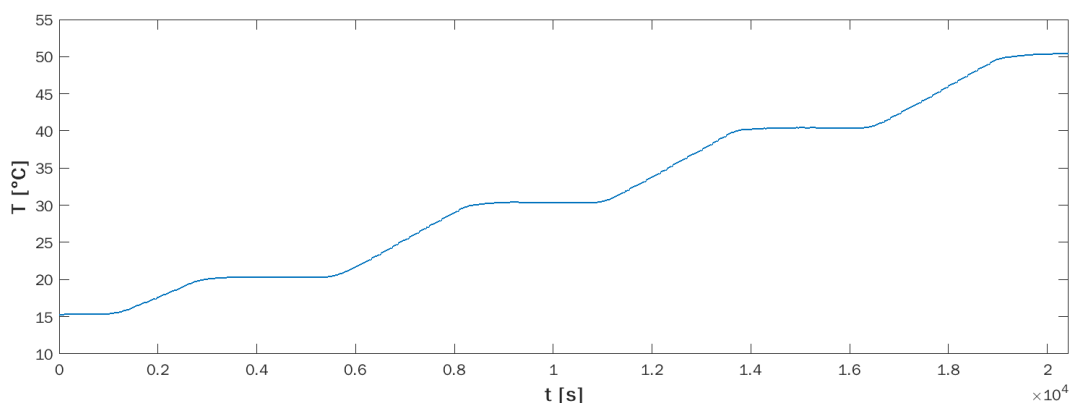


Obrázek 31: Teplotní komora

6.2 Měření

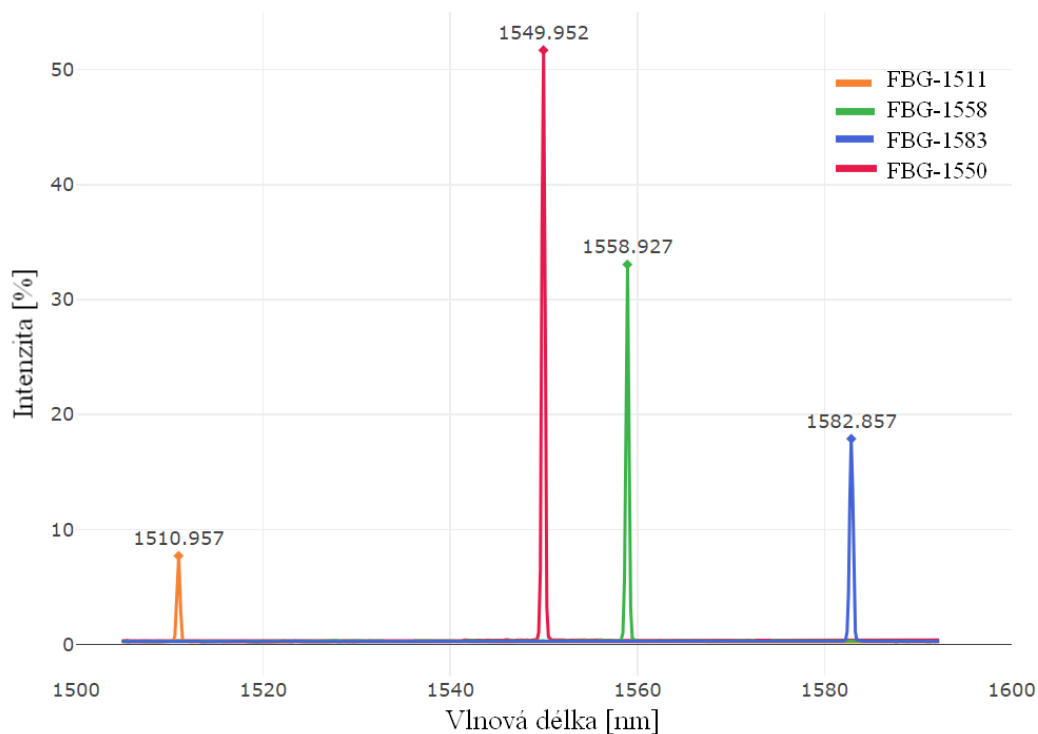
Měření bylo zahájeno spuštěním a nastavením (temperováním) teploty v komoře. Nastavení dále probíhalo přes program komory, který umožnil nastavení intervalů teplot komory. Bylo tudíž možné regulovat délku celého procesu a jeho dílčí části, jako například interval stabilní teploty nebo náběh.

Na obrázku 32 je zobrazen nastavený program komory. Vzhledem k množství dat která byla požadována ke zpracování, byl určen interval stabilní teploty 90 min.



Obrázek 32: Průběh teploty v komoře

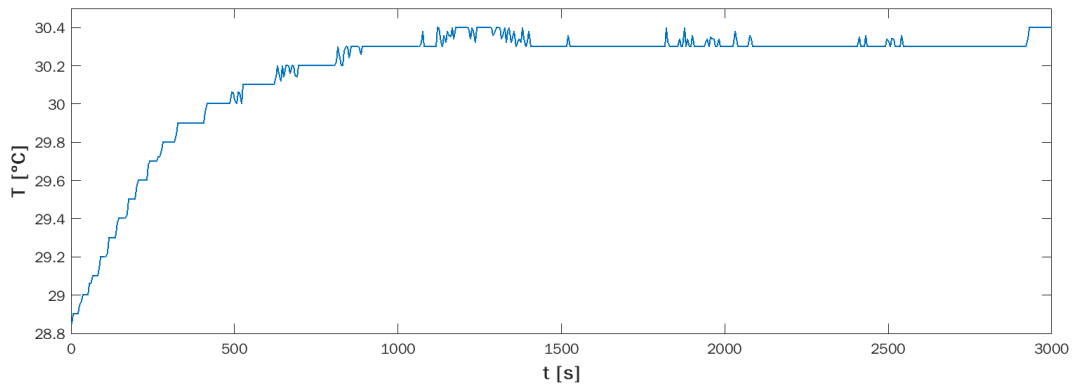
Před spuštěním komory bylo zaznamenáno na monitorovací jednotce referenční spektrum pro všechny měřené mřížky. Toto spektrum je vidět na obrázku 33.



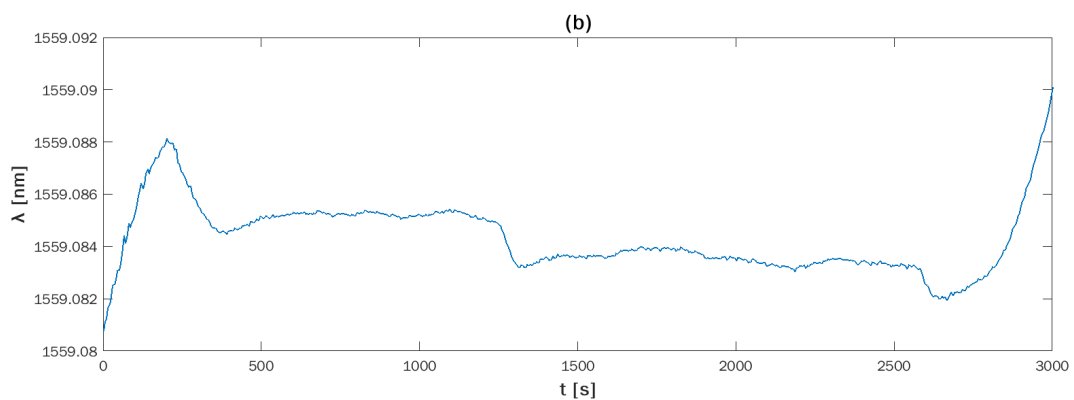
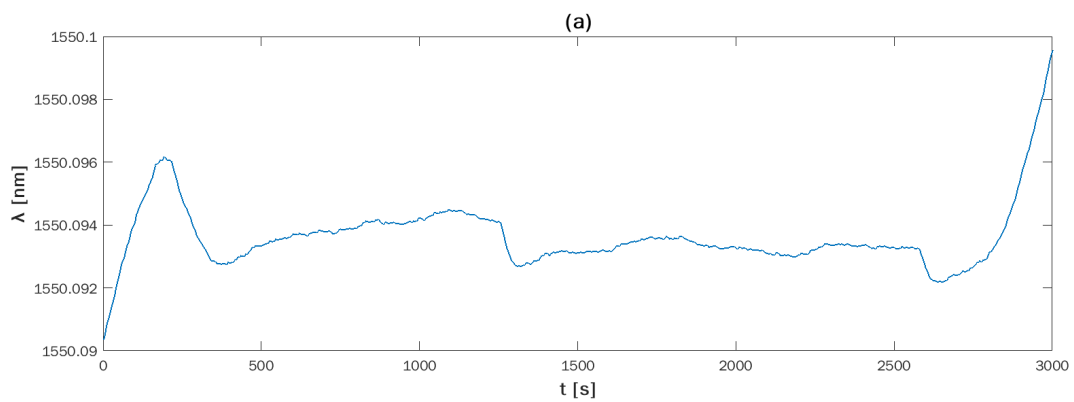
Obrázek 33: Referenční spektrum

Veškerá získaná data byla během měření odesílána do internetového prostředí programu Grafana, který vykreslil jednotlivé závislosti teploty a vlnové délky v čase. Následně byla data z programu převedena do souboru .csv, který byl nahrál do programu Matlab, ve kterém byla data dále upravována a zpracována.

Během analýzy dat v programu Grafana byla zjištěna nestabilita polyimidových vláken a skokové výchylky v momentech, kdy klimatická komora započala stabilizaci teploty v komoře. Tyto události jsou zobrazeny na obrázcích 35 (a) a 35 (b).



Obrázek 34: Graf teploty v intervalu stabilizace komory



Obrázek 35: Graf mřížky (a)FBG₁₅₁₁ a mřížky (b)FBG₁₅₅₀ v intervalu stabilizace komory

Tento jev se projevoval u každého začátku stabilizace teploty v komoře. Zde se projevuje opravdu velká citlivost vláknových mřížek jako senzoru. V momentě kdy se teplota začíná v komoře stabilizovat, přepne klimatická komora ohřívací program a ve své podstatě komoru momentálně ochladí, čímž si pomůže při následné stabilizaci. Mřížka ovšem pozoruje prudký pád teploty v komoře, a to i přes umístění v kartonové krabici.

Důvod proč je mřížka s polyimidovou primární ochranou méně stabilní je ten, že polyimid je rozkmitáván vlhkostí v komoře (40%). Ve své podstatě je totiž polyimid na vlhkost citlivější než akrylát. Proto se zde jeví mřížka s akrylátovou primární ochranou jako stabilnější.

Byla snaha obě tyto události dány chybou měřící soustavy, ne mřížky samotné, co nejefektivněji odfiltrovat v programovém prostředí Matlab. V tomto programu byla nastavena omezovací podmínka, při které byla vybrána pouze ta data, která se jeví jako stabilní pro daný úsek. To znamená, že z necelých 5000 hodnot byl vybrán největší úsek hodnot s minimálním rozdílem vlnové délky a tyto hodnoty byly následně prohlášeny za stabilní. Tyto získané hodnoty byly nadále zprůměrovány a použity pro výpočet teplotního koeficientu. Ke každému úseku vlnových délek odpovídal úsek hodnot teploty, ze kterých byl také udělán průměr pro následné výpočty. Takto získané hodnoty jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 7: Získané vlnové délky pro jednotlivá FBG při dané teplotě

Teplota [°C]	FBG ₁₅₁₁ [nm]	FBG ₁₅₅₈ [nm]	FBG ₁₅₈₃ [nm]	FBG ₁₅₅₀ [nm]
20,3	1510,9954	1558,9705	1582,8990	1549,9984
30,3	1511,1052	1559,0838	1583,0131	1550,0934
40,3	1511,2141	1559,1976	1583,1282	1550,1975
50,4	1511,3189	1559,3100	1583,2413	1550,2961

Následně byly spočteny teplotní koeficienty podle daného vzorce a jejich nejistota metodou celkové chyby přímých měření. Výsledné koeficienty jsou zobrazeny níže.

$$\alpha_{1511} = (7,1274 \pm 0,0041) \cdot 10^{-6}$$

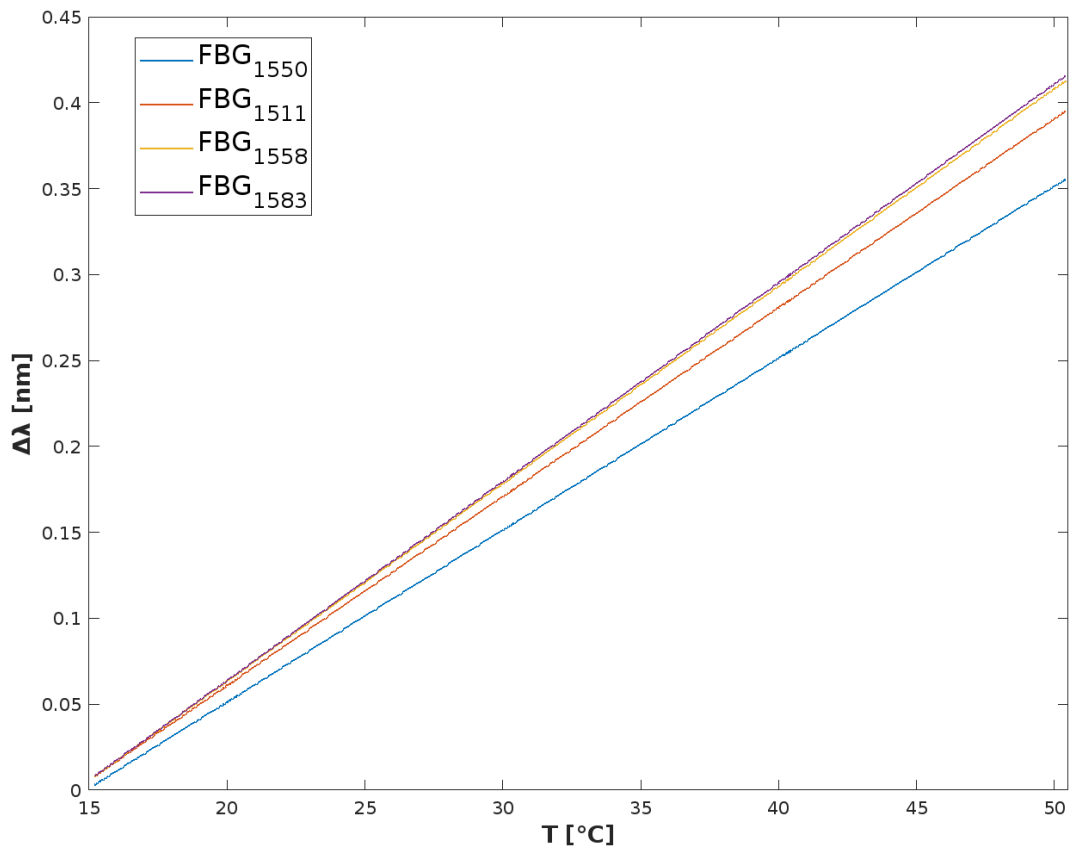
$$\alpha_{1558} = (7,2463 \pm 0,0032) \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_{1583} = (7,1991 \pm 0,0043) \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_{1550} = (6,4144 \pm 0,0032) \cdot 10^{-6}$$

Z výsledných koeficientů můžeme usoudit, že závisí na tom zda je použita mřížka v akrylátové primární ochraně, nebo v polyimidové. Je to z důvodu vlastností těchto dvou materiálů.

Na následujícím obrázku 36 jsou vyobrazeny vlnové délky jednotlivých mřížek v závislosti na teplotě.



Obrázek 36: Grafické srovnání závislosti vlnové délky na teplotě pro jednotlivá FBG

Z výsledného grafu můžeme pozorovat rapidnější nárůst vlnové délky u mřížek ve vláknech s polyimidovou primární ochranou, oproti mřížce ve vlákne s akrylátovou primární ochranou. Z charakteristiky této závislosti lze říct, že se chová lineárně.

7 Koeficient změny relativního prodloužení

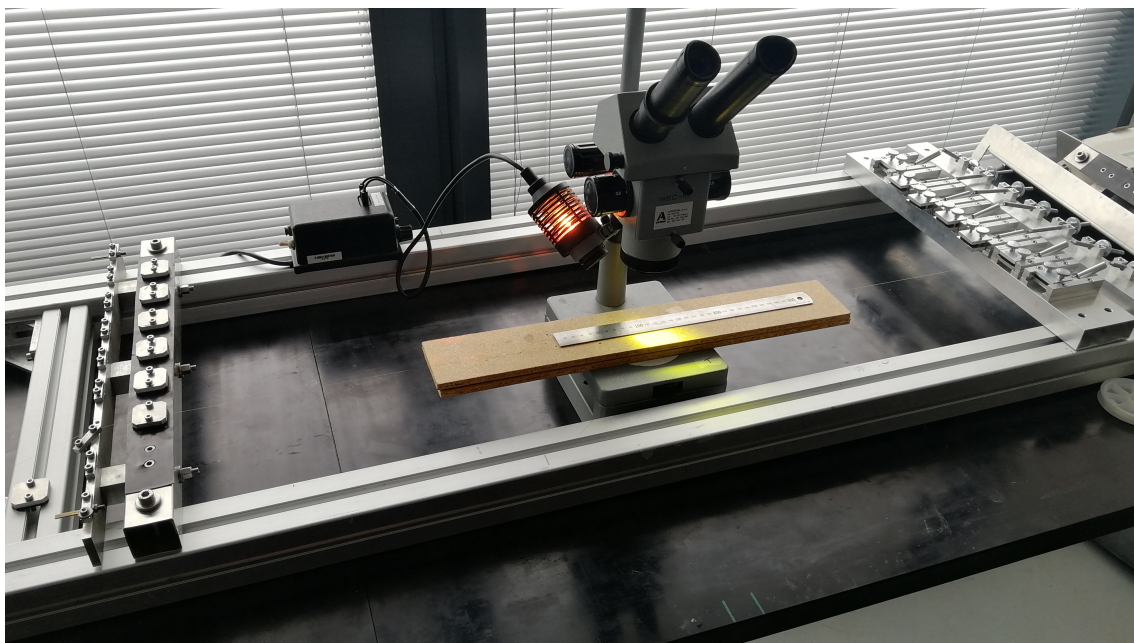
V případě kdy bude požadováno měření změny mechanické veličiny, je zásadní znát správnost koeficientu změny relativního prodloužení β . Tento koeficient udává hodnotu vlnové délky v závislosti na pnutí optického vlákna. Změna relativního proudložení se dá přeložit do angličtiny jako strain, tento výraz je v optovláknové sensorice hojně používán a jeho jednotkou jsou $\mu\epsilon$ (micro-strainy). Literatura uvádí poměr vlnové délky a strainu jako $1,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$. (pro vlnovou délku 1550 nm)[16] Do tohoto měření vstupujeme s předpokladem, že Braggova vlnová délka bude ovlivněna $10 \mu\epsilon$ stejně, jako kdyby byla ovlivněna 1°C . [17]

7.1 První měření

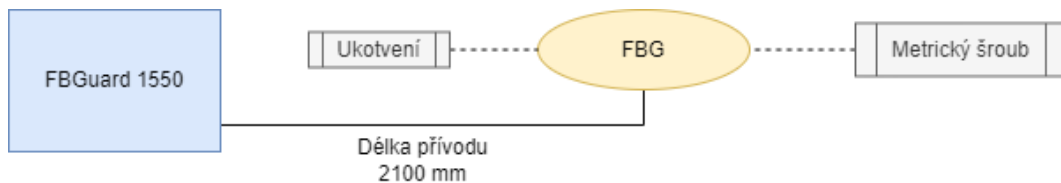
7.1.1 Zapojení pracoviště

Pro první měření obsahovalo pracoviště monitorovací jednotku FBGuard 1550, mikroskop a soustavu pro fixaci optických vláken.

Vlákno bylo pevně zafixováno na levém konci soustavy a následně bylo na druhém konci přichyceno k metrickému šroubu. Otáčením matky u tohoto šroubu bylo docíleno pnutí fixovaného vlákna a tím docházelo ke změně relativního prodloužení. V důsledku procesu došlo ke změně velikosti odražené vlnové délky. Na následujícím obrázku je celá sestava pracoviště vyfocena.

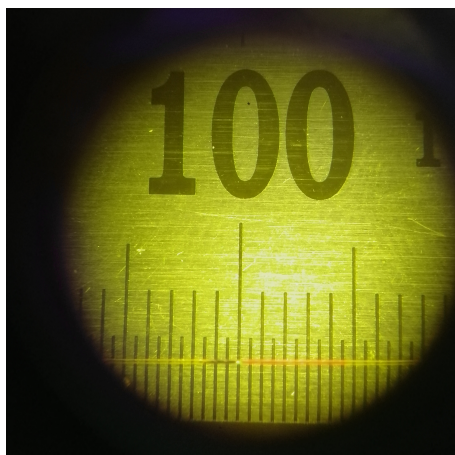


Obrázek 37: První měření změny relativního prodloužení



Obrázek 38: Blokové schéma sestavy prvního měření relativního prodloužení

Během tohoto měření byla zjišťována velikost pnutí vlákna za pomoci mikroskopu a značky na optickém vlákně. Zároveň se tento parametr kontroloval s počtem otáček na metrickém šroubu. Na obrázku níže je zachycena pozice vlákna v referenční poloze.



Obrázek 39: Pohled do mikroskopu pro odečítání změn prodloužení

Při tomto měření byly měřeny pouze dvě mřížky, FBG_{1558} a FBG_{1583} , poněvadž se při zpracování dat ukázala tato metodika jako málo efektivní.

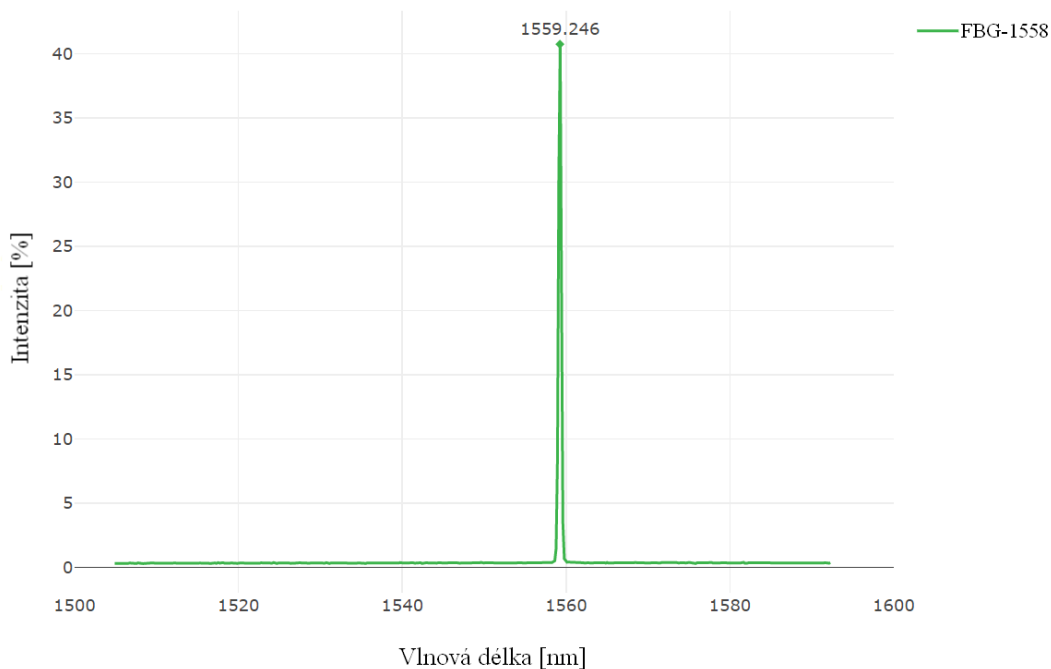
7.1.2 Měření

Bylo potřeba si stanovit délku vlákna mezi zafixovanými body. Tato délka bude referenční a bude se od ní odvíjet jak velký rozdíl vyvolá změnu $1000 \mu\varepsilon$. Jako nejvhodnější pro následující výpočty se jevila délka $L_v = 1000 \text{ mm}$. V tomto případě pro nás znamená, že 1 mm je $1000 \mu\varepsilon$.

Při měření tedy stačí abychom se pohybovali se změnou $\Delta L_v = 1 \text{ mm}$. V průběhu celého měření se zaznamenávala teplota místnosti. Tato hodnota se během měření měnila v rámci $\pm 0,02^\circ\text{C}$, lze tedy konstatovat, že hodnota $T = 23,4^\circ\text{C}$.

I přes kontrolu správnosti změny relativního prodloužení, byla pro každou měřenou mřížku zaznamenána tři měření, aby se co nejvíce omezila chyba lidského oka.

První měřená mřížka byla FBG_{1558} . Na obrázku 40 je vidět referenční spektrum s návratovou hodnotou vlnové délky. Vlákno muselo být předeprnuté do referenční hodnoty vlnové délky a to je důvod proč naměřená vlnová délka neodpovídá hodnotě uvedené z výroby.



Obrázek 40: Referenční spektrum pro mřížku FBG₁₅₅₈

Jednotlivá měření dosáhla maximálních hodnot relativního prodloužení $\Delta L_v = 5$ mm. Výsledné hodnoty změn vlnové délky během tohoto měření jsou ukázány v tabulce 8.

Tabulka 8: Výsledné hodnoty změn vlnové délky pro mřížku FBG₁₅₅₈

L_v [mm]	λ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
1000	1559,246	0
1001	1560,495	1,246
1002	1561,673	1,176
1003	1562,885	1,208
1004	1564,125	1,243
1005	1565,314	1,190

Referenční a získané hodnoty byly dosazeny do vzorce a následně byl dopočítán koeficient β . Takto byl koeficient spočítán pro každé ze tří měření a z těchto hodnot byl udělán průměr. Výsledná hodnota koeficientu je zobrazena níže.

$$\beta_{1558} = 7,7770 \cdot 10^{-7}$$

Druhá měřená mřížka byla FBG₁₅₈₃. Na následujícím obrázku jsou vidět referenční hodnoty a poté i referenční spektrum. Opět bylo potřeba vlákno předepnout aby následné pnutí vycházelo z nezkreslené reference.



Obrázek 41: Referenční spektrum pro mřížku FBG₁₅₈₃

Tabulka 9: Výsledné hodnoty změn vlnové délky pro mřížku FBG₁₅₈₃

L_v [mm]	λ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
1000	1583,190	0
1001	1584,352	1,166
1002	1585,553	1,203
1003	1586,782	1,239
1004	1587,957	1,183
1005	1589,198	1,247

Koeficient β byl nalezen stejným způsobem jako tomu bylo u předcházející měřené mřížky.

$$\beta_{1583} = 7,8390 \cdot 10^{-7}$$

Výsledné hodnoty koeficientů jsou podobné koeficientům, které jsou běžné v praxi. Nicméně není možné být spokojen s takovýmto provedením měření ve kterém proběhlo. Do tohoto měření vstupovalo až příliš mnoho vnějších vlivů, které měření mohli ovlivnit. Změna teploty v místě mřížky, vibrace přenášející se nohou stolu na desku a nepřesnost odečítání stupnice na měřítku. I přes poměrně očekávané výsledky se toto měření ve výsledku jeví spíše jako orientační.

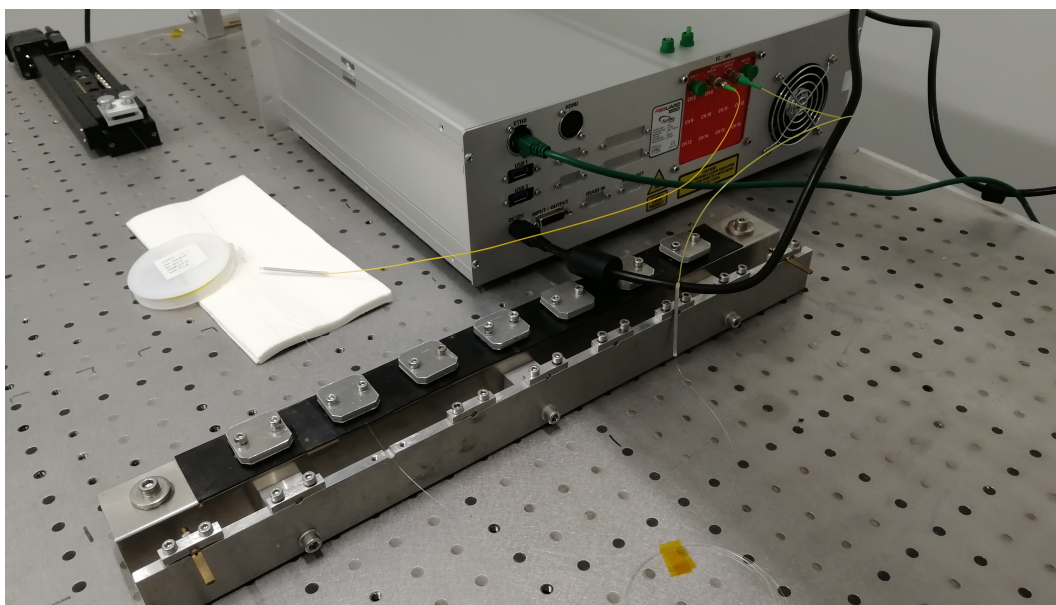
7.2 Druhé měření

Na základě zkušeností z prvního měření bylo sestaveno nové pracoviště pro měření koeficientu relativního prodloužení. Toto pracoviště mělo výrazně omezit vnější vlivy, které do měření mohly zasáhnout, a zároveň se zbavit lidského faktoru.

7.2.1 Zapojení pracoviště

Oproti předchozímu měření, byla sestava umístěna do izolované místnosti, kde měření probíhalo. Zároveň byla sestava přimontována k optickému stolu, který zajistil stabilitu celé sestavy a minimální ovlivnění vibracemi, které se šířily pevným povrchem.

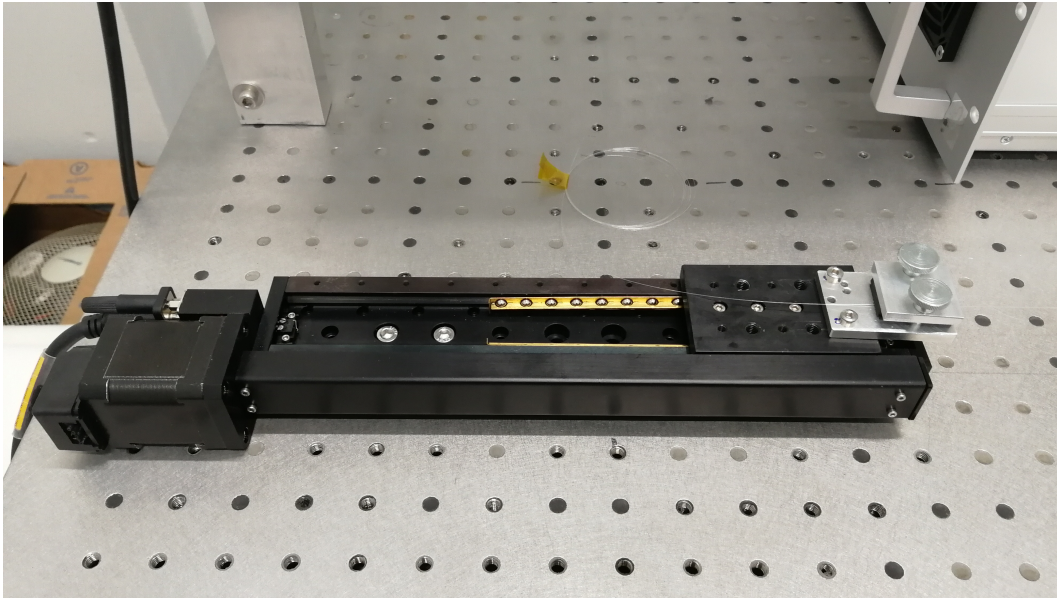
Měřená optická vlákna nebyla z výroby opatřena konektorem, bylo tedy potřeba na všechna vlákna navařit pig-taily, což jsou konce optických vláken, které konektory již mají. Dbal jsem na to, aby byl útlum sváru co nejmenší a optické vlákno co nejvíce odpovídalo charakteristickým vlastnostem vlákna měřeného s optickou mřížkou. Následně byla optická vlákna připojena na monitorovací jednotku.



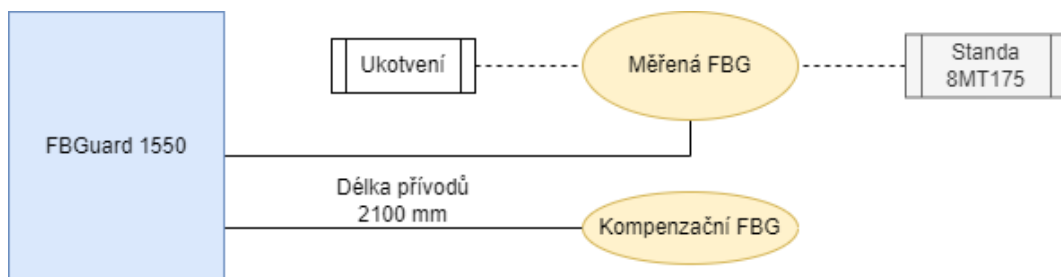
Obrázek 42: Sestava druhého měření změny relativního prodloužení

Při tomto měření byly na monitorovací jednotku FBGuard 1550 připojeny dvě optická vlákna s mřížkami. První optické vlákno bylo měřeno, zatímco druhé připojené optické vlákno mělo funkci kompenzace teploty. Obě tyto mřížky byly umístěny co nejvíce k sobě. Aby se omezila chyba měřícího přístroje, byly měřené mřížky pokaždé umístěny na kanál č. 1, zatímco kompenzační mřížka byla umístěna na kanál č. 2.

Měřené vlákno bylo opět na jedné straně zafixováno do kotvícího přípravku, jako tomu bylo u předchozího měření. Na druhé straně bylo vlákno zafixováno do přípravku STANDA-8MT175 [18], který měl zajistit automatizované relativní prodloužení s maximální přesností $2,5 \mu\text{m}$ na jeden krok. Obsluha přístroje STANDA probíhala přes program XILab.

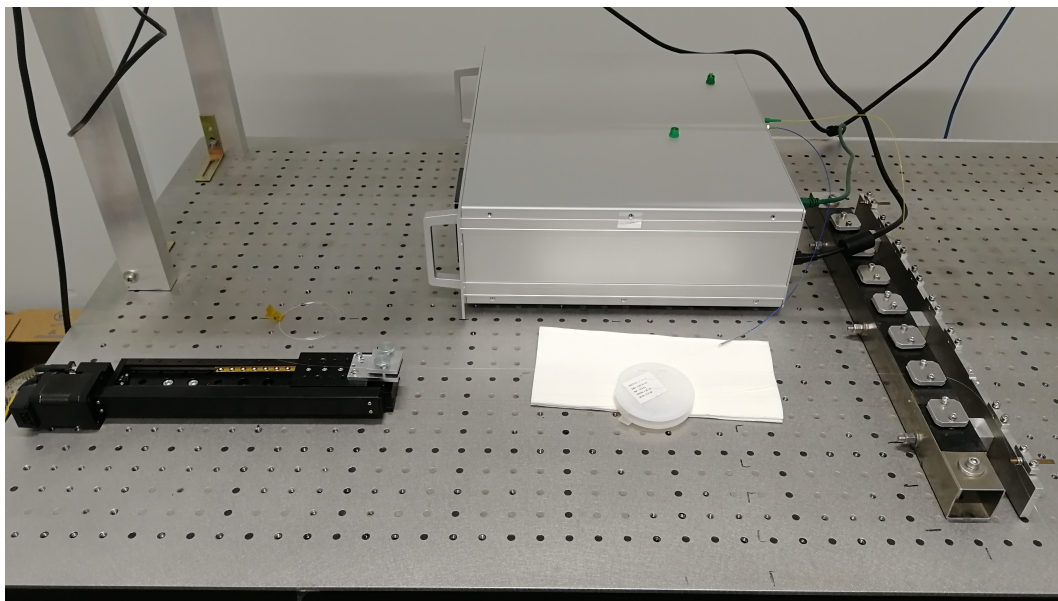


Obrázek 43: Monitorizovaný lineární posuv STANDA-8MT175



Obrázek 44: Blokové schéma sestavy druhého měření relativního prodloužení

Velikost zafixované délky vlákna byla 500 mm. V případě druhého měření se tedy prodloužení vlákna o 0,5 mm projevilo jako $1000 \mu\epsilon$. Mřížka byla nastavena do středu zafixovaného vlákna. Kompenzační mřížka byla volně položena na papírový podklad, vedle mřížky měřené.



Obrázek 45: Sestava druhého měření změny relativního prodloužení

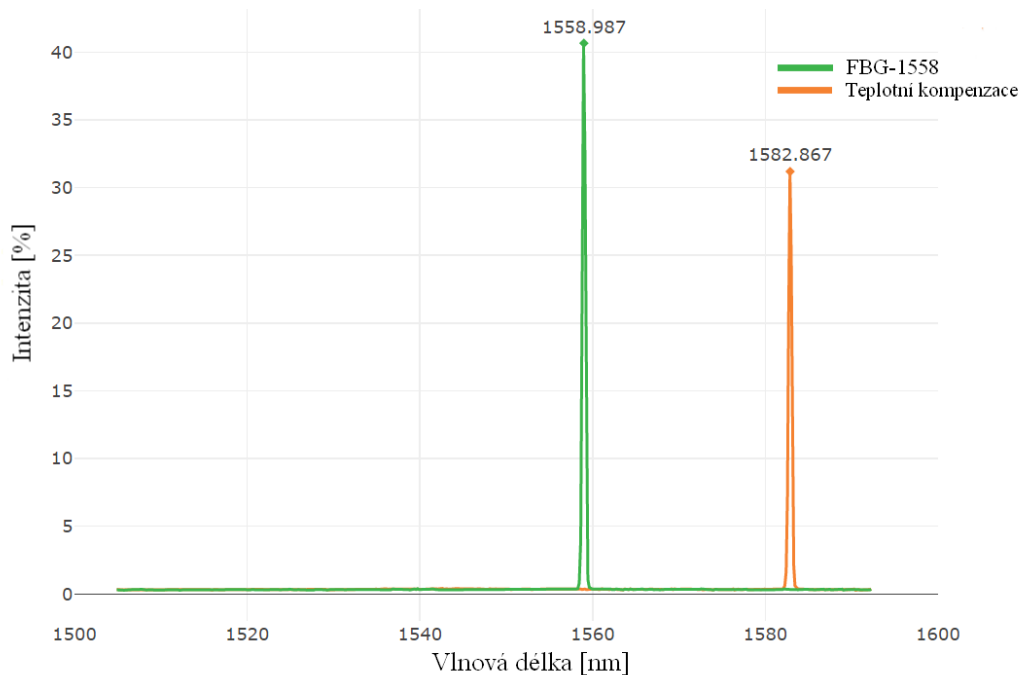
7.2.2 Měření

V první fázi měření bylo potřeba správně nastavit monitorovací jednotku FBGuard 1550, aby jedna mřížka byla měřena z hlediska vlnové délky a druhá byla využita jako kompenzace teploty v místnosti. Díky získaným teplotním koeficientům z předchozích měření, jsem mohl využít jednu z měřených mřížek jako kompenzační a měření tím zpřesnit. Jelikož jsem znal přesnou hodnotu teplotního koeficientu dané mřížky, mohl jsem ji zadat do monitorovací jednotky pro výpočet teploty.

Tabulka 10: Referenční nastavení pro měření mřížky FBG₁₅₅₈

Kanál č.	Typ senzoru	Hodnota
1	λ_{abs}	1558,987 nm
2	λ_{abs}	1582,866 nm
2	T	20,30 °C

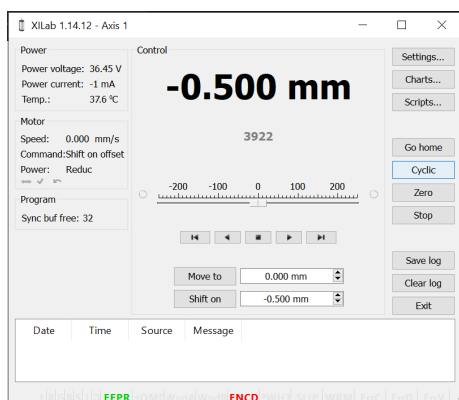
Následně bylo vlákno s měřenou mřížkou zafixováno a mírně předepnuto, aby se stanovila referenční hodnota vlnové délky. Referenční délka zafixovaného vlákna zůstala zachována.



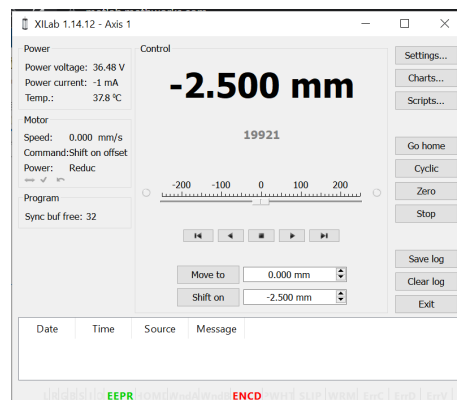
Obrázek 46: Referenční spektrum

Druhá fáze měření se odvíjela od obsluhy programu XILab. V programu byla nastavena počáteční a koncová hodnota posuvu motorizované jednotky, stejně tak jako krok se kterým jednotlivé posuvy realizovat.

Jako krok se dala hodnota 0,5 mm a maximální hodnota prodloužení vlákna se stanovila na 2 mm, nebo-li na 4000 $\mu\epsilon$. Tato hodnota byla stanovena aby nedošlo k přetržení vlákna a zároveň aby bylo možné zanedbat prokluzování materiálu uchycení vlákna. Při vyšší síle pnutí by bylo potřeba tuto skutečnost uvést do výpočtu pro koeficient relativního prodloužení. Což pro tento experiment nebylo potřeba.



Obrázek 47: Program XILab v referenčním bodě



Obrázek 48: Program XILab v koncovém bodě

Po celou dobu měření byly zaznamenávány hodnoty vlnových délek. V momentech posuvu přípravku STANDA, program pozastavil činnost přípravku a na současné hodnotě zůstal po dobu 5-ti minut. Díky tomu měla vlnová délka možnost se ustálit.

Výsledná data vlnových délek pro měření mřížky byla vyexportována do souboru CSV a následně zpracována v programu Matlab. V tomto programu byly nejprve stanoveny hodnoty, které lze brát za ustálené a následně byl z těchto dat realizován průměr.

Tabulka 11: Získané vlnové délky pro jednotlivá FBG při daném prodloužení

L_v [mm]	FBG ₁₅₁₁ [nm]	FBG ₁₅₅₈ [nm]	FBG ₁₅₈₃ [nm]	FBG ₁₅₅₀ [nm]
500,5	1512,5664	1560,1404	1584,2111	1551,4096
501,0	1513,7177	1561,3234	1585,4086	1552,5348
501,5	1514,8667	1562,5047	1586,6054	1553,6610
502,0	1516,0144	1563,6804	1587,8049	1554,7893
502,5	1517,1536	1564,8538	1589,0049	1555,9248

Díky znalosti prodloužení a k němu odpovídající vlnové délce, jsem mohl zjistit velikost koeficientu relativního prodloužení. Výpočet tohoto koeficientu byl uskutečněn dvěma způsoby.

- Získané hodnoty vlnových délek byly dosazeny do vzorce v Matlabu a skrze metodu nejmenších čtverců byl spočítán výsledný koeficient relativního prodloužení.
- Získané změny vlnových délek byly vloženy do grafu, kde tyto hodnoty byly proloženy spojnici trendu a absolutní člen této spojnice odpovídal koeficientu relativního prodloužení.

Rozdíl mezi těmito různými způsoby výpočtu byl přibližně 0,12%. Níže jsou zapsány výsledné koeficienty relativního prodloužení.

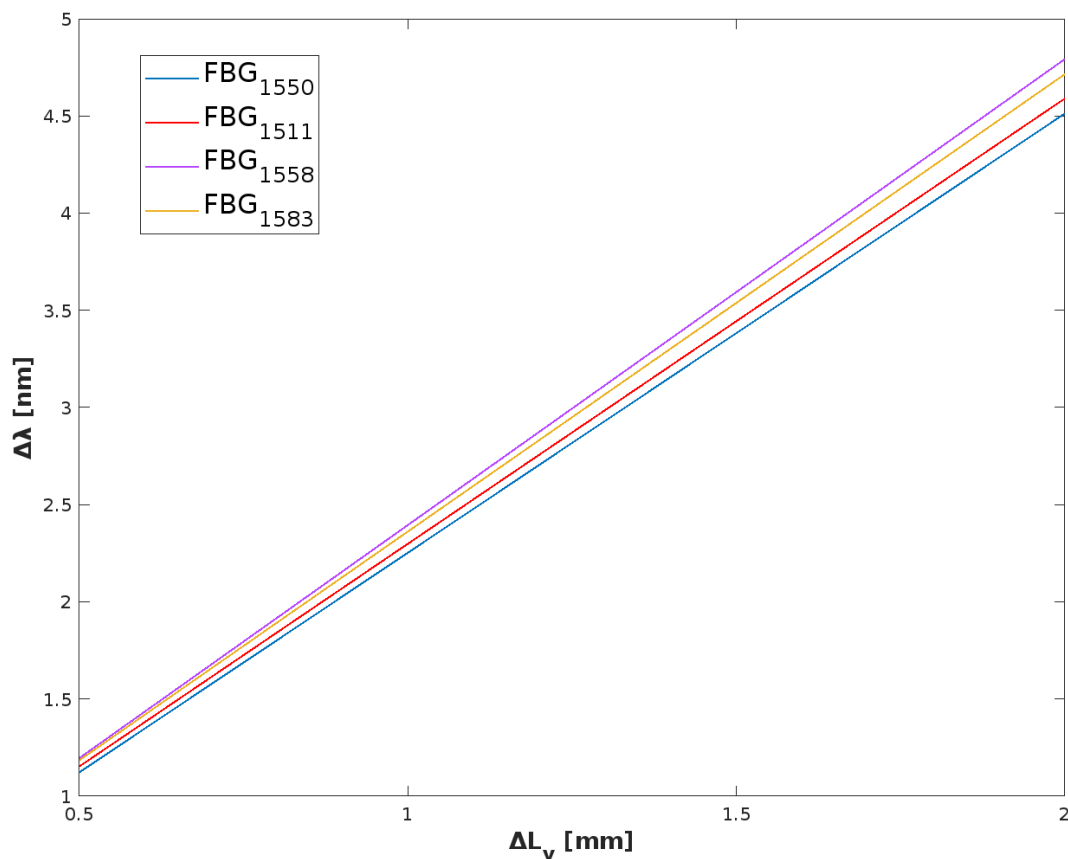
$$\beta_{1511} = 7,5777 \cdot 10^{-7}$$

$$\beta_{1558} = 7,5515 \cdot 10^{-7}$$

$$\beta_{1583} = 7,5589 \cdot 10^{-7}$$

$$\beta_{1550} = 7,2690 \cdot 10^{-7}$$

Výsledné hodnoty byly pozoruhodné z hlediska závislosti na referenční vlnové délce i na materiálu primární ochrany. Obdobně jako u výpočtů teplotního koeficientu se polyimidová primární ochrana jeví jako citlivější pro danou veličinu než je tomu u akrylátové primární ochrany. Pro lepší přehlednost byl vyhotoven graf, kde je vidět sklon měřených Braggovských mřížek.



Obrázek 49: Grafické srovnání závislosti vlnové délky na relativním prodloužení pro jednotlivá FBG

8 Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval mřížkovými strukturami v optických vláknech, které jsou využívány v optovláknové sensorice. Především se jedná o Braggovskou mřížku a její modifikace. Na začátek práce jsem uvedl základy teorie optických vláken a teoretický popis Braggovské mřížky, společně s jejími modifikacemi a výrobním postupem.

V první řadě jsem se soustředil na parametry, které mohou charakteristiku Braggovské mřížky ovlivnit. Mezi ně patří index lomu jádra, pláště ale i jednotlivých segmentů mřížky. Během simulací, které jsou popsány v kapitole 3, jsem mohl jednotlivá chování Braggovské mřížky analyzovat a pozorovat jak lze jednotlivé parametry nastavit pro správné fungování mřížkové struktury.

Následovala praktická část, během které mi bylo umožněno spolupracovat s firmou Safibra. Po rozhovorech s kolegy v této společnosti jsem došel k závěru, že stežejní parametr pro správné fungování senzoru, je koeficient teploty a relativního prodloužení. Provedl jsem tedy experiment, se zhotovenými mřížkami, který měl určit jak moc se tyto koeficienty liší pro různé typy primární ochrany, kterou bylo optické vlákno opatřeno. Zároveň jsem zjišťoval výsledné koeficienty pro různé referenční vlnové délky. Jak se ukázalo, tak větší dopad na změnu koeficientu teplotního i relativního prodloužení mělo to, jakou primární ochranou bylo optické vlákno, a tudíž i mřížka, opatřeno.

V návaznosti na tuto práci bych chtěl provést řadu experimentů, u kterých bych zjišťoval další vlastnosti Braggovských mřížek. Například přejímání charakteristiky teplotní roztažnosti v momentě kdy bude mřížka zbavena primární ochrany a přilepena na určitý materiál. Nebo zkoumání ztrát intenzity vlnové délky v případech kdy je zapojen levý nebo pravý konec vlákna s Braggovskou mřížkou.

Reference

- [1] NEWPORT. [online] Dostupné z:
<https://www.newport.com/t/fiber-optic-basics>
- [2] HUI, Rongqing a Maurice S. O'SULLIVAN. *Fiber optic measurement techniques*. Burlington: Academic Press, c2009. ISBN 978-0-12-373865-3.
- [3] FOSCO. [online] Dostupné z:
<https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/reflection-and-refraction>
- [4] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B. LEIGHTON a Matthew L. SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky: revidované vydání s řešenými příklady*. 2. vydání. Praha: Fragment, 2013. ISBN 978-80-253-1642-9.
- [5] LÓPEZ-HIGUERA, José Miguel. *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*. John Wiley Sons, 2002. ISBN 0 471 82053 9.
- [6] FOSCO. (19.3.2011). *What is Fiber Bragg Grating?* [online] Dostupné z:
<https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95046406-what-is-fiber-bragg-grating>
- [7] GUO, Qi, Zhongming ZHENG, Bo WANG, Xuepeng PAN, Shanren LIU, Zhenan TIAN, Chao CHEN a Yongsen YU. Femtosecond Laser Fabricated Apodized Fiber Bragg Gratings Based on Energy Regulation. *Photonics*. 2021. Dostupné z:
doi:<https://doi.org/10.3390/photonics8040110>
- [8] KITADA T.. *Considerations on recent trends in, and future prospects of, steel bridge construction in Japan*. *J Constr Steel Res*, 62 (11) (2006), pp. 1192-1198
- [9] FARHEY D.N.. *Bridge instrumentation and monitoring for structural diagnostics*. *Struct Health Monit*, 4 (4) (2005), pp. 301-318
- [10] RODRIGUES Carlos, Filipe CAVADAS, Carlos FÉLIX, Joaquim FIGUEIRAS. *FBG based strain monitoring in the rehabilitation of a centenary metallic bridge*. *Engineering Structures*, Volume 44 (2012), pp. 281-290
- [11] WU, Huijuan, Yunjiang RAO, Cheng TANG, Yu WU a Yuan GONG. A novel FBG-based security fence enabling to detect extremely weak intrusion signals from non-equivalent sensor nodes. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011, 548-555. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.02.046>
- [12] SYNOPSISYS. [online] Dostupné z:
<https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-photonic-device-tools/cad-environment.html>
- [13] WEISS TECHNIK. [online] Dostupné z:
<https://www.weiss-technik.com/environmental-simulation/en/detailpages/climeeco>
- [14] SAFIBRA. [online] Dostupné z:
<http://www.safibra.cz/fbguard-interrogacni-jednotka>

- [15] PAPOUCH. [online] Dostupné z:
<https://papouch.com/th3-snimac-teploty-a-vlhkosti-p4605/>
- [16] KUMAR, Jitendra, Ramakanta MAHAKUD, Sudhir KUMAR, Pankaj K. SAINI, Om PRAKASH, Sudhir K. DIXIT a Shankar V. NAKHE. *Analysis and experiment on simultaneous measurement of strain and temperature by etched and un-etched FBG pair*. Results in Optics. 2021. Dostupné z:
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100135>.
- [17] DELEPINE-LESOILLE, Sylvie, Erick MERLIOT a Yves GAUTIER. *Optical fiber strain sensors for use in civil engineering: State-of-the-art*, industrial applications and outlook. 2008, 18.
- [18] STANDA. [online] Dostupné z:
https://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=60prod=motorized_linear_stages