

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh a realizace FBG senzorů pro měření vybraných fyzikálních
veličin**

**Design and realization of FBG sensors for selected physical
quantities measurement**

2019

Bc. Emil Bednár

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Emil Bednár

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Návrh a realizace FBG senzorů pro měření vybraných fyzikálních veličin
Design and realization of FBG sensors for selected physical quantities measurement

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Práce se věnuje návrhem a realizací Braggovských senzorů alespoň tří vybraných fyzikálních veličin. Cílem práce je realizovat FBG senzory pro měření teploty, deformace, vibrací a po domluvě s vedoucím práce případně i jiných veličin. Všechny realizované FBG senzory budou kalibrovány a ověřeny experimentálním měřením. Součástí práce je také rešerše možných způsobů pouzdření Braggovských mřížek.

1. Proveďte literární rešerši možných způsobů pouzdření Braggovských mřížek pro měření fyzikálních veličin.
2. Navrhněte a realizujte FBG senzory vybraných fyzikálních veličin.
3. Proveďte kalibraci realizovaných FBG senzorů a stanovte citlivost, přesnost a rozlišení měření.
4. Ověřte činnost FBG senzorů experimentálním měřením.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] OTHONOS, Andreas, Kyriacos KALLI a Francis T YU. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. 2nd ed. Boston, Mass.: Artech House, 1999, xiv, 422 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 08-900-6344-3.
- [2] YIN, Shizhuo, Paul B RUFFIN a Francis T YU. Fiber optic sensors: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008, xiii, 477 p. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.), 132. ISBN 14-200-5365-5.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

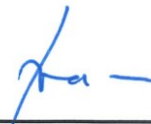
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marcel Fajkus, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: *24. apríla 2019*


.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval pánovi Ing. Marcelovi Fajkusovi, Ph.D. za cenné rady, odbornú pomoc a konzultáciu pri spracovaní tejto diplomovej práce. Ďalej by som rád poďakoval Ing. Stanislavovi Hejdukovi Ph.D. za 3D tlač a pánovi profesorovi Dr. Ing. Alešovi Dudáčkovi za poskytnutie pomôcok, prístrojov a pomoc pri tlakovom meraní.

Abstrakt

Celá táto diplomová práca sa zaoberá optickými vláknami, v ktorých je vytvorená Braggova mriežka. Najskôr si v teoretickej časti priblížime čo to vôbec optické vláknové Braggové mriežky sú, aké metódy sa používajú pri výrobe, jednotlivé typy Braggových mriežok a na koniec ich príkladné využitie v praxi. V praktickej časti sa najskôr zaoberám samotným návrhom a realizáciou senzorov na meranie rôznych fyzikálnych veličín za pomoci optických Braggových mriežok. Následne už s vyrobenými senzormi testujem ich funkčnosť pomocou meraní a následne spracovávam namerané dáta. Keďže sa optické Braggové mriežky čoraz častejšie objavujú v rôznych senzoroch na meranie fyzikálnych veličín predpokladám, že mnou vyrobené senzory by mali byť plne funkčné. Ich citlivosť a rozsah budú ovplyvnené najmä materiálom, ktorý použijem na ich výrobu.

Kľúčové slová

optická Braggova mriežka, optické vlákno, senzory, teplotný FBG senzor, deformačný FBG senzor, tlakový FBG senzor

Abstract

This thesis deals with optical fibers in which Bragg grid is created. First of all, in the theoretical part, we will describe what optical fiber Bragg grids are, what methods are used in production, the different types of Bragg grids and, in the end, their practical application. In the practical part I first deal with the design and implementation of sensors for measuring various physical quantities using optical Bragg grids. Subsequently, with the sensors produced, I test their functionality using measurements and then process the measured data. As optical Bragg grids appear more and more often in various sensors for measuring physical quantities, I assume that sensors made by me should be fully functional. Their sensitivity and extent will be influenced mainly by the material I use for their production.

Key words

optical Bragg grating, optical fiber, sensors, FBG temperature sensor, FBG deformation sensor, FBG pressure sensor

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Braggove mriežky	- 3 -
1.1 Princíp Braggových mriežok.....	- 3 -
1.2 Použitie Braggovej mriežky.....	- 5 -
1.3 Typy Braggovej mriežky	- 5 -
1.3.1 Uniformná vláknová Braggova mriežka (Uniform Fiber Bragg grating).-	5 -
1.3.2 Rozmietaná vláknová Braggova mriežka (Chirped Fiber Bragg grating) -	6 -
1.3.3 Naklonené Braggove mriežky (Tilted Bragg gratings)	- 7 -
1.4 Výroba Braggových mriežok	- 9 -
1.4.1 Interferometrická metóda	- 9 -
1.4.2 Fázovo maskovacia metóda.....	- 10 -
1.4.3 Metóda bod po bode	- 11 -
1.5 Braggove mriežky Typ I, II, IIA/In.....	- 12 -
2 FBG senzory vybraných fyzikálnych veličín	- 14 -
2.1 Meranie teploty pomocou FBG.....	- 14 -
2.1.1 Teplotný rozsah a spôsob ochrany vlákien.....	- 14 -
2.1.2 Ukážka použitia	- 15 -
2.2 Deformačné FBG senzory.....	- 19 -
2.2.1 Deformačný senzor vkladajú do betónu	- 19 -
2.2.2 Senzor na meranie povrchového napätia	- 21 -
2.3 Tlakový senzor.....	- 23 -
2.3.1 Príklad použitia tlakového senzoru	- 25 -
3 Návrh a realizácia teplotného FBG senzoru.....	- 29 -
3.1 Návrh a výroba senzora.....	- 29 -
3.2 Kalibrácia a meranie	- 31 -
4 Návrh a realizácia sklolaminátového FBG senzoru na meranie deformácií	- 36 -
4.1 Výroba.....	- 36 -
4.2 Meranie teplotnej závislosti	- 36 -
4.3 Meranie zaťažovaním na PMD podložke.....	- 37 -
4.4 Meranie prechodu po schodoch	- 39 -
5 Návrh a realizácia tlakového FBG senzoru pomocou 3D tlačiarne	- 46 -

5.1	Návrh a výroba senzora.....	- 46 -
5.2	Meranie zaťažovaním.....	- 48 -
5.3	Meranie tlaku	- 49 -
6	Záver	- 53 -
	Použitá literatúra	- 55 -

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
m	kg	Hmotnosť
n	-	Index lomu
t	s	Čas
T	°C	Teplota
p	mbar	Tlak
P	W	Výkon
UV	nm	Ultrafialové žiarenie
λ	nm	Vlnová dĺžka
λ_{Bragg}	nm	Braggova vlnová dĺžka
Λ	-	Periódá zmeny indexu lomu

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Význam
DWDM	Dense Wavelength-division multiplexing (husté vlnové multiplexvanie)
FBG	Fiber Bragg Grating (vláknová braggova mriežka)
FMCW	Frequency modulated continuous wave (frekvenčne modulovaná kontinuálna vlna)
FOS	Fiber-optic sensor (vláknovo-optický senzor)
OSA	Optical Spectrum Analyzer (Optický spektrálny analyzátor)

Zoznam ilustrácií a zoznam tabuliek

Číslo ilustrácie	Názov ilustrácie	Číslo stránky
1.1	Braggova mriežka v optickom vlákne	4
1.2	Princíp Braggovej mriežky	4
1.3	Uniformná Braggova mriežka	6
1.4	Odzrazové spektrum uniformnej Braggovej mriežky	6
1.5	Rozmietaná Braggova mriežka	7
1.6	Odzrazové spektrum rozmietanej Braggovej mriežky	7
1.7	Naklonená Braggova mriežka	8
1.8	Prenosové spektrum naklonenej Braggovej mriežky	9
1.9	Výroba FBG pomocou interferometrickej metódy	10
1.10	Výroba FBG pomocou fázovo maskovacej metódy	11
1.11	Výroba FBG pomocou metódy bod po bode	12
2.1	Ochrana optického vlákna zlatom	15
2.2	Vzťah medzi nameranými teplotami pomocou FBG a ortuťovým teplomerom	16
2.3	Teplotná krivka pri rôznych ohybových zakriveniach	16
2.4	a) Teplotný snímač FBG, umiestnený v plášti termočlánku, b) Podrobná konštrukcia vrchnej časti puzdra	17
2.5	Porovnanie ohybových strát jednotlivých typov vlákien	18
2.6	Senzor na meranie napätia v betóne	20
2.7	Odozva napätia na pôsobiacu silu pomocou FBG, RSG a EFPI senzoru	21
2.8	Návrh senzoru na meranie vnútorného napätia v betóne použitý pri stavbe mostu	21
2.9	Znázornenie umiestnenia senzorov v konštrukcii mostu	21
2.10	Senzory na meranie napätia – Z ľavej strany: Athermálny, miniatúrny polyimidový, kompozitný, zvärací, na meranie povrchového napätia	22
2.11	FBG napäťový senzor s keramickým cementom na železnej podložke	23

2.12	Valcový tlakový senzor s pohyblivou membránou	24
2.13	Znázornenie radiálnej a tangenciálnej deformácie	25
2.14	Tlakový senzor s polymérovou výplňou	25
2.15	Odozva FBG tlakového senzoru na pôsobiaci tlak	26
2.16	Tlakový senzor na kvapaliny	27
2.17	Štruktúra tlakového senzoru	28
3.1	Braggova mriežka v prídavnej polymérovej ochrane	29
3.2	Návrh medeného puzdra pre teplotný FBG senzor	30
3.3	Hotový teplotný senzor	30
3.4	Schéma kalibrácie teplotného FBG senzoru	31
3.5	Teplotné body namerané pomocou digitálneho teplomeru a zaznamenaná vlnová dĺžka z FBG teplotného senzoru	33
3.6	Závislosť teplôt nameraných pomocou digitálneho teplomeru a FBG teplotného senzoru	33
3.7	Priebeh Braggovej vlnovej dĺžky pri teplotnej hysterézii	34
3.8	Priebeh zaznamenatej teploty pomocou FBG senzoru a merača teploty AREXX	35
4.1	FBG senzory zo sklolaminátu, naľavo je prechodový a napravo je koncový senzor	36
4.2	Graf teplotnej závislosti sklolaminátových senzorov	37
4.3	Znázornenie umiestnenia mriežok pri meraní na PMD podložke	38
4.4	Zmena Braggovej vlnovej dĺžky prechodového senzoru v závislosti na zaťažovaní PMD podložky	38
4.5	Zmena Braggovej vlnovej dĺžky koncového senzoru v závislosti na zaťažovaní PMD podložky	39
4.6	Schodisko kde boli umiestnené sklolaminátové FBG senzory	40
4.7	Zaznamenávanie prechodu po schodoch v ~24 hodinách	40
4.8	Maximálne hodnoty získané pomocou sklolaminátových FBG senzorov z ~ 24 hodinového merania	41
4.9	Detailný pohľad na zaznamenaný prechod po schodoch	41
4.10	Znázornenie počtu osôb nachádzajúcich sa na poschodí	43

4.11	Zaznamenávanie prechodu po schodoch v ~ 48 hodinách	44
4.12	Maximálne hodnoty získané pomocou sklolaminátových FBG senzorov z ~48 hodinového merania	44
4.13	Znázornenie počtu ľudí na poschodí počas ~48 hodinového merania	45
5.1	Náčrt tlakového senzoru: vpravo je prvá verzia a vľavo je finálna verzia	46
5.2	Môj tlakový FBG senzor	47
5.3	Schéma zaťažovania tlakového FBG senzora	48
5.4	Priebeh zmeny Braggovej vlnovej dĺžky pri zaťažovaní	49
5.5	Priebeh posunu Braggovej vlnovej dĺžky v závislosti na zaťažovaní	49
5.6	Schéma východzieho nastavenia pre meranie tlaku	50
5.7	Kalibrácia tlakového FBG senzora	51
5.8	Namerané hodnoty pomocou digitálneho, milimetrového a FBG tlakomeru	52

Číslo tabuľky	Názov tabuľky	Číslo stránky
2.1	Porovnanie parametrov jednotlivých optických vlákien	18
3.1	Zmena Braggovej vlnovej dĺžky λ_B	31
3.2	Kalibrácia FBG senzoru	32
4.1	Tabuľka teplotnej závislosti sklolaminátových senzorov	37
4.2	Vľavo: Testovacie prechody, vpravo: namerané prechody	43
5.1	Prehľad meniacej sa Braggovej vlnovej dĺžky tlakového senzora	48
5.2	Tabuľka nameraných a vypočítaných hodnôt z tlakového merania	52

Úvod

Cieľom tejto diplomovej práce je sa zoznámiť s možnosťami zapúzdrenia Braggových mriežok, aby sme boli schopný merať rôzne fyzikálne veličiny. Po zoznámení sa s prevedeniami, ktoré sa bežne používajú alebo boli použité v nejakom experimentálnom vyhotovení, si navrhmem vlastné senzory na meranie rôznych fyzikálnych veličín, ktoré následne vyrobím, vykonám kalibračné meranie pre každý senzor a následne podrobím experimentálnemu meraniu.

Aby som sa k danej problematike a senzorom s Braggovými mriežkami lepšie priblížil, v prvej kapitole sa dozvieme čo to vlastne vláknové Braggove mriežky sú, ako reagujú na zmenu vybraných fyzikálnych veličín a teda, ako s ich pomocou tieto fyzikálne veličiny dokážeme zmerať. Taktiež sa dozvieme, že existuje niekoľko typov Braggových mriežok so špecifickými vlastnosťami a že Braggove mriežky sa nevyrábajú len jedným spôsobom, ale môžu sa vyrábať viacerými spôsobmi, kde každý spôsob má svoje výhody aj nevýhody.

V druhej kapitole sa už venujem zapúzdreniu Braggových mriežok. Túto kapitolu môžeme ďalej rozdeliť na tri časti, kde v prvej časti sa venujem zapúzdreniu Braggovej mriežky na meranie teploty. Dozvieme sa, že na meranie teploty nie je dôležité len správne zapúzdrenie ale taktiež spôsob zápisu Braggovej mriežky v optickom vlákne. Pretože podľa teplotnej odolnosti optického vlákna s Braggovou mriežkou závisí teplotná odolnosť celého senzoru, keďže pri poškodení Braggovej mriežky alebo prírodného optického vlákna nemáme ako získať informácie o zmene teploty.

Druhá časť z tejto kapitoly sa zaoberá deformačnými senzormi, ktoré sú následne rozdelené na dva druhy. Na senzory ktoré sa vkladajú do betónu pri výstavbe budov, mostov, tunelov Čím sme schopný pozorovať ako pracuje betón v závislosti na pribúdajúcom čase od výstavby. Takýmto monitorovaním sme následne schopný predísť prípadnej katastrofe, kedy by bola stavba bežne používaná bez vedomia zlého statického stavu. Druhým typom sú deformačné senzory, na meranie povrchového napätia materiálu, ktoré sa umiestňujú najmä na oceľové konštrukcie. Ako predchádzajúci senzor aj tento má za úlohu monitorovať konštrukciu a jej dobrý statický stav. Pri obidvoch druhoch je dôležité správne zapúzdrenie, aby sa pôsobiaca sila na okolitý materiál správne preniesla aj na Braggovu mriežku.

V poslednej časti druhej kapitoly sa dozvieme o tlakovom senzore s Braggovou mriežkou. Jeho rôzne prevedenia v závislosti na použití a to, že kľúčové je správne a pevné upevnenie optického vlákna s Braggovou mriežkou na membránu, na ktorú bude tlak pôsobiť a na ďalšiu časť puzdra tak, aby bolo optické vlákno pevne zafixované.

S poznatkami z teórie a z rôznych príkladov zapúzdrenia Braggových mriežok na meranie fyzikálnych veličín sa dostávame k praktickej časti tejto diplomovej práce, kde v tretej kapitole sa venujem návrhu a realizácii teplotného senzora. Následne kalibrácií s presnejším teplotným senzorom a na koniec experimentálnemu meraniu v miestnosti taktiež s ďalším teplotným senzorom. Získané dáta z obidvoch teplomerov som potom spracoval a porovnal.

V štvrtej kapitole som si navrhol a vytvoril FBG senzor v sklolaminátovom puzdre, ktorý mal za úlohu merať počet a smer prechodov po schodoch. Avšak ešte pred tým ako bol senzor umiestnený na schody som ho vystavil pokusnému teplotnému a zaťažovaciemu meraniu. Dáta som spracoval

a pripevnil som senzor na schody. Po uchytení som vykonal ako kalibráciu testovacie prechody na začiatku a na konci merania. Namerané dáta som spracoval a testovacie prechody som porovnal s nameranými dátami.

Na koniec v piatej kapitole sa dozvieme ako som si navrhol a zostrojil tlakový senzor, ktorý bol vyrobený pomocou 3D tlačiarne. Po zostrojení som ho najskôr otestoval zaťažovaním malými váhami a následne som pristúpil ku kalibrácii a meraniu s veľmi malým tlakom vzduchu, ktorý sa pohyboval v milibaroch. Namerané dáta som spracoval a porovnal s nameranými dátami z ďalších tlakomerov.

1 Braggove mriežky

V telekomunikačných sieťach sa dnes už bežne pre prenos dát používajú optické vlákna, ktoré vďaka svojim vlastnostiam a za pomoci rôznych prenosových technológií, ako je napríklad DWDM (Dense Wavelength-division multiplexing) dosahujú vysokú priepustnosť dát, ktorá sa pohybuje v petabitoch za sekundu. Avšak optické vlákno nemusí byť použité len na prenos dát v závratných rýchlostiach ale môže sa z neho stať aj druh senzoru. Práve optické vláknové senzory sa čoraz viac rozširujú pre ich výhody, ako je odolnosť voči prostrediu, elektrická odolnosť, malá veľkosť, distribuované/multiplexné schopnosti, a ich široké použitie.

Konkrétne z optických vláknových senzorov sa budeme zaoberať optickým vláknom s Braggovou mriežkou - FBG (Fiber Bragg Gratings) čo je bodový intrinzitný opticko-vláknový senzor (FOS – Fiber-optic sensor) na meranie rôznych fyzikálnych veličín. Pre bližšie vysvetlenie bodový senzor je typ senzoru, ktorý umožňuje meranie danej veličiny v určitom bode, v našom prípade v tej časti vlákna, v ktorej sa nachádza Braggova mriežka. Následne intrinzitný senzor je taký typ senzoru, v ktorom meraná veličina ovplyvňuje vlastnosti svetelného paprsku vo vnútri optického vlákna. V prípade optického vlákna s Braggovou mriežkou meraná veličina ovplyvňuje odrazenú vlnovú dĺžku od Braggovej mriežky tiež nazývanú aj Braggova vlnová dĺžka. Keďže táto práca sa zaoberá problematikou Braggových mriežok a ich uplatnením v senzoroch, ďalšími typmi senzorov sa nebudeme zaoberať. [1][2]

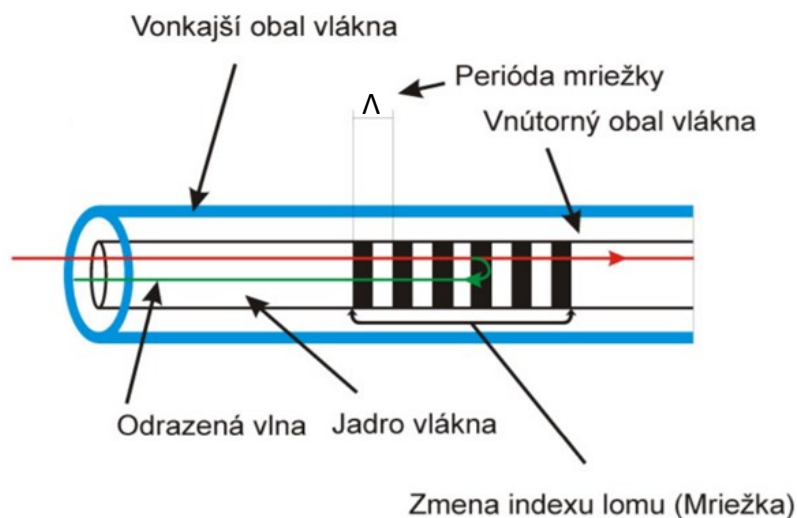
Braggova mriežka bola objavená pánom Kenom Hillom v kanadskom komunikačnom výskumnom centre v roku 1978, keď testoval germánium dopované kremíkové vlákna pomocou viditeľného argónového laserového žiarenia. Vtedy pozoroval, že svetlo vpustené do vlákna sa čoraz viac odrážalo na základe mriežkovaného indexu lomu v jadre optického vlákna. Pomocou pravidelnej zmeny indexu lomu bolo vytvorené prvé optické vlákno s Braggovou mriežkou, ktorá mala šírku pásma 200 MHz. Hlavný prielom však nastal po správe pána Gerryho Meltza v roku 1989, v ktorej písal o holografickom zapisovaní mriežky s použitím fotónovej absorpcie. Táto schéma poskytla potrebnú voľnosť na presun Braggovej podmienky k dlhším a užitočnejším vlnovým dĺžkam. Tento princíp bol použitý na výrobu reflexných mriežok na vlnovej dĺžke 1530 nm a umožňoval demonštrovať prvý optický laser pracujúci z odrazu fotosenzitívnej vláknovej mriežky. Na obrázku č. 1.1 môžeme pozorovať štruktúru uniformnej Braggovej mriežky v optickom vlákne, v ktorej sa pravidelne strieda v pozdĺžnom smere index lomu jadra vlákna n_1 s vyšším indexom lomu n_3 , vďaka ktorému samotná mriežka vznikne. [3]

1.1 Princíp Braggových mriežok

Ako sme sa už dozvedeli Braggova mriežka v jednomódovom optickom vlákne spôsobuje odraz vstupného svetelného lúča naspäť k zdroju žiarenia, čo môžeme pozorovať aj na obrázku 1.1. To, že sa odráža vstupný svetelný lúč naspäť je pravda, ale nie úplná, pretože od Braggovej mriežky sa odráža iba určitá vlnová dĺžka z celého spektra vstupného signálu, čo môžeme vidieť na obrázku 1.2. Funguje to tak, že pri každej periodickej zmene indexu lomu sa odráža malá časť svetla. Všetky odrazené svetelné signály sa kohorentne kombinujú do jedného odrazeného lúča svetla s určitou vlnovou dĺžkou. Všetky ostatné vlnové dĺžky prechádzajú cez optické vlákno transparentne. Odrazená vlnová dĺžka sa označuje λ_B a nazýva sa Braggova vlnová dĺžka. Je definovaná podľa vzťahu 1.1, kde

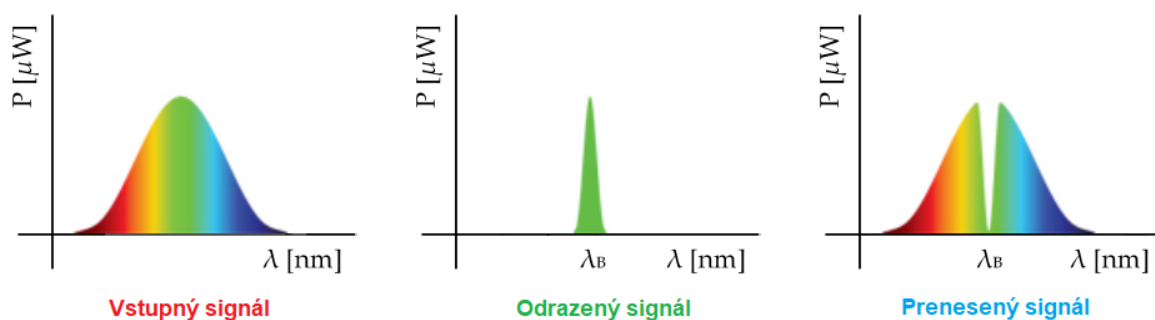
n_{eff} je efektívny index lomu definovaný štruktúrou Braggovej mriežky a Λ je vzdialenosť medzi zmenami indexu lomu v jadre optického vlákna:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda. \quad (1.1)$$



Obrázok 1.1: *Braggova mriežka v optickom vlákne*

Táto hodnota odrazenej vlnovej dĺžky nie je rovnaká pre všetky Braggove mriežky ale pre každú je iná. Preto pri každej Braggovej mriežke nájdeme aj informáciu, ktorú vlnovú dĺžku dané optické vlákno s Braggovou mriežkou odráža. Nemôžeme však zabudnúť, že odrazové charakteristiky závisia najmä na type Braggovej mriežky, pretože každý typ Braggovej mriežky má iné odrazové spektrum. Môže sa stať, že Braggova mriežka neodráža len jednu vlnovú dĺžku ale určité spektrum, ale tomu sa už bližšie venujem v ďalšej podkapitole. Kľúčová vlastnosť Braggových mriežok je tá, že práve táto odrazená Braggova vlnová dĺžka sa mení v závislosti na meniacej sa teplote a/alebo deformácií, na čo je Braggova mriežka citlivá a čo sa využíva pri FBG senzorochoch. [3][4]



Obrázok 1.2: *Princíp Braggovej mriežky*

1.2 Použitie Braggovej mriežky

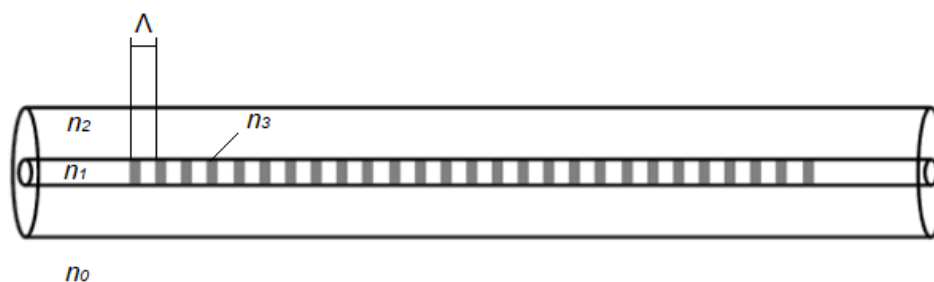
Ako sa neskôr dočítame existujú rôzne typy Braggovej mriežky, ktoré sa líšia vnútornou štruktúrou. A keďže sme sa dozvedeli, že Braggova mriežka je druh senzoru a má ešte aj rôzne typy, poskytuje nám to ešte väčšie možnosti a škálu praktického použitia. Využívajú sa najmä dve vlastnosti mriežok a to je citlivosť na teplotu a na deformáciu, čo je v podstate tlak alebo materiálové napätie. Aj keď sa zdá byť citlivosť na tieto dve fyzikálne veličiny na prvý pohľad málo, v skutočnosti pomocou nich dokážeme zmerať ďalšie veličiny ako je napríklad hmotnosť a rýchlosť. Toto nám poskytuje široké možnosti využitia v senzoch, ktorých podstata je v citlivosti na teplotu, tlak a teda aj deformáciu, ktorá môže byť spôsobená zaťažením, posunutím a prípadne napnutím optického vlákna s Braggovou mriežkou. Keď k tomu pridáme vlastnosti optických vlákien dostávame senzory, ktoré sa vyznačujú výbornou presnosťou a odolnosťou voči okolitým rušivým vplyvom, ktoré spôsobujú nepresnosť merania pri použití digitálnych alebo analógových meracích prístrojov. Preto majú senzory s Braggovými mriežkami uplatnenie v rôznych odvetviach a začínajú sa čoraz viac používať. Či už v stavebníctve, kde môžeme napríklad pozorovať betón ako s postupom času pracuje alebo deformácie rôznych konštrukcií a mostov. V medicíne kde sa začínajú presadzovať ako senzory životných funkcií, v doprave na meranie hmotnosti a rýchlosti vozidiel ale aj v chytrých budovách. V ďalších kapitolách sa k niektorým sensorom vrátíme a priblížime si ich bližšie. [3]

1.3 Typy Braggovej mriežky

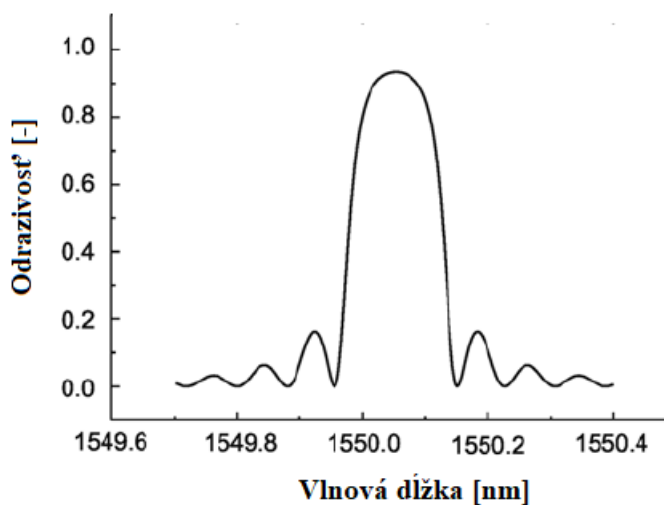
Keďže Braggova mriežka má veľmi široké spektrum použitia, vyrábajú sa rôzne typy Braggových mriežok, ktoré sa líšia vo výrobnom procese a teda najmä vnútornou štruktúrou zmeny indexu lomu v jadre optického vlákna. S tým je samozrejme aj spojené spektrum, ktoré sa od daného typu Braggovej mriežky odráža. S rôznymi typmi vnútornej štruktúry mriežky meníme najmä tvar odrazeného spektra a jeho spektrálnu šírku, čo sú kľúčové parametre Braggovej mriežky. V nasledujúcej časti sú popísané základné typy mriežok, ktoré sa líšia vnútornou zmenou indexu lomu a teda aj rôznymi odrazenými spektrami.

1.3.1 Uniformná vláknová Braggova mriežka (Uniform Fiber Bragg grating)

V jednoduchšej vláknovej Braggovej mriežke, sa index lomu jadra vlákna mení pravidelne pozdĺž vlákna ako je znázornené na obrázku 1.3. Ako môžeme pozorovať na obrázku 1.3 perióda zmeny indexu lomu sa označuje Λ a zmena indukovaného indexu lomu je δn . Tá sa počíta ako rozdiel n_3 a n_1 , kde n_3 je veľkosť indexu lomu po zväčšení n_1 o δn . Optické vlákna, ktoré obsahujú túto pravidelnú zmenu indexu lomu po celej dĺžke Braggovej mriežky sa nazývajú vláknové uniformné Braggove mriežky. Na tom, aká je Braggova mriežka dlhá závisí odrazivosť a šírka odrazeného spektra, ktoré môžeme vidieť na obrázku 1.4. S dĺžkou Braggovej mriežky prirodzene priamo úmerne rastie odrazivosť, keďže svetlo sa odráža od viacerých zmien indexu lomu. Naopak šírka odrazeného spektra rastie nepriamo úmerne. Ako si môžeme všimnúť na obrázku 1.4, odrazové spektrum obsahuje postranné laloky, ktoré sú nežiadúce ako vo WDM systémoch tak aj v senzorickej optike, keďže znižujú kapacitu prenosovej vetvy. Rovnica (1.1) na výpočet Braggovej rezonančnej vlnovej dĺžky pre uniformnú Braggovu mriežku, teda tej ktorá sa odráža od mriežky, je už popísaná v sekcii *Princíp Braggových mriežok*. [3][5]



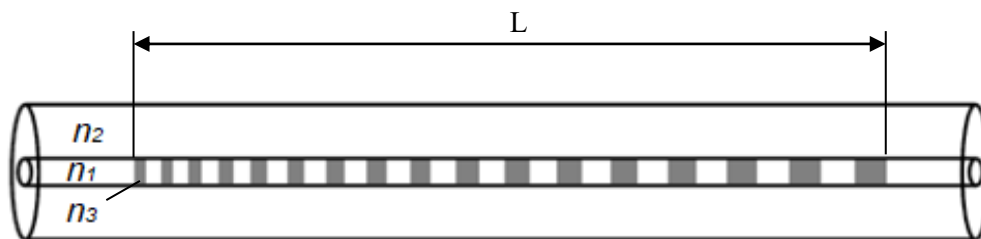
Obrázok 1.3: Uniformná Braggova mriežka



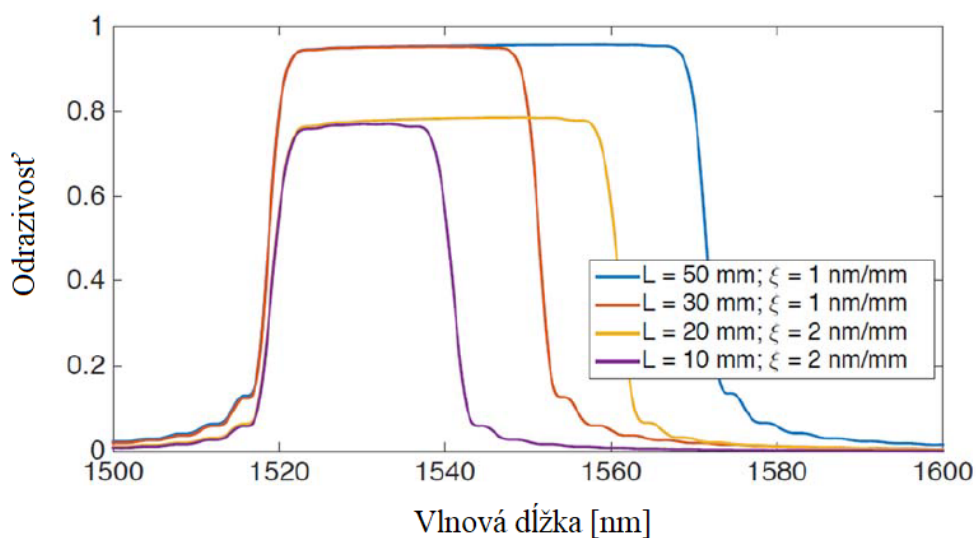
Obrázok 1.4: Odrazové spektrum uniformnej Braggovej mriežky

1.3.2 Rozmietaná vláknová Braggova mriežka (Chirped Fiber Bragg grating)

Tento typ Braggovej mriežky sa líši od ostatných tým, že zmena indexu lomu nie je periodická ale premenlivá, čo môžeme vidieť na obrázku 1.5. Táto premenlivá zmena indexu lomu môže byť napríklad lineárna, kvadratická alebo exponenciálna. To spôsobuje, že každá časť zmeny indexu lomu odráža inú Braggovu vlnovú dĺžku. Ako výsledok dostaneme odrazové spektrum, ktoré je širšie ako pri klasickej uniformnej Braggovej mriežke. Toto odrazové spektrum môže byť v jednotkách nanometrov ale aj v desiatkach nanometrov. Názorné odrazové spektrum z rozmietanej Braggovej mriežky pre rôzne dĺžky L a rôzne koeficienty rozmietania ξ môžeme vidieť na obrázku 1.6. Rozmietané Braggove mriežky sa stali populárne najmä v optických komunikáciách, pretože dovoľujú kompenzáciu chromatickej disperzie pomocou zavedenia oneskorenia diferenciálnej skupiny závislej od vlnovej dĺžky. Najvýznamnejšia a kľúčová charakteristika v porovnaní s uniformnými mriežkami je tá, že celkové spektrum nezávisí na zmene teploty a/alebo deformácie na celej dĺžke mriežky, ale na zmene teploty/deformácie zaznamenananej na každej časti mriežky. Túto vlastnosť môžeme potencionálne použiť pri senzoch na meranie priestorových zmien teploty alebo deformácie. Keďže typická dĺžka rozmietanej vláknovej Braggovej mriežky je 15-50 mm, môžeme teda odhaliť a lokalizovať teplotné alebo deformačné body s milimetrovou presnosťou. Tieto mriežky sa teda používajú ako lokalizátory tepla, snímače na meranie teploty pri tepelnej ablácii, na meranie rýchlosti rázových vln, lokalizáciu a odhad vysokotlakových udalostí, na detekciu poškodenia polyméru vystuženého uhlíkovými vláknami a mnoho iného.



Obrázok 1.5: Rozmietaná Braggova mriežka



Obrázok 1.6: Odražové spektrum rozmietanej Braggovej mriežky

V lineárne rozmietaných Braggových mriežkach má referenčná hodnota Braggovej vlnovej dĺžky λ_B lineárnu závislosť na dĺžke mriežky, keďže odrazená Braggova vlnová dĺžka sa z každej vrstvy líši. Túto závislosť môžeme pozorovať v rovnici 1.2:

$$\lambda_B(z) = \lambda_B(0) + \xi z, \text{ pre } 0 \leq z \leq L, \quad (1.2)$$

kde $\lambda_B(0)$ je centrálna perióda mriežky, z je vzdialenosť pozdĺž optického vlákna a koeficient rozmietanej rýchlosti ξ je konštantný a definuje mieru priestorovej zmeny Braggovej vlnovej dĺžky v štruktúre mriežky. Tento koeficient dostaneme pomocou vzťahu 1.3:[6][7]

$$\xi = (\lambda_{max} - \lambda_{min}) / L. \quad (1.3)$$

1.3.3 Naklonené Braggove mriežky (Tilted Bragg gratings)

Tento druh Braggových mriežok bol prvý krát predstavený v roku 1990. Rovnako ako bežné Braggove mriežky, aj tieto mriežky majú periodické zmeny indexu lomu avšak v axiálnom smere. Teda na rozdiel od ostatných typov Braggových mriežok nemajú rovnú vertikálnu zmenu indexu lomu ale mierne naklonenú, čo môžeme vidieť na obrázku 1.7. Zistilo sa, že ak sa zavedie určitý uhol naklonenia ξ medzi osou vlákna a vektorom vlny, môžu sa v určitých vlnových dĺžkach spájať vedené módy. To dovoľuje tieto Braggove mriežky použiť napríklad ako erbiové vláknové zosilňovače,

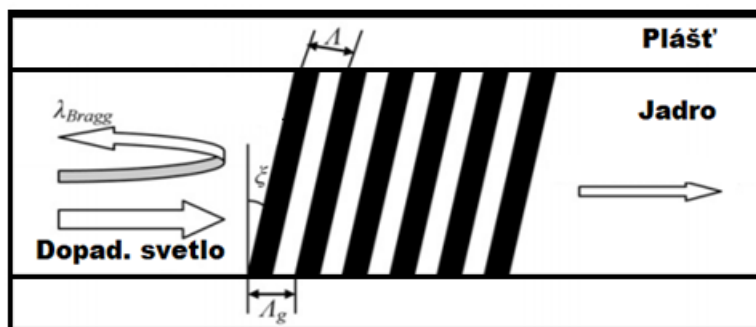
analyzátoary optického spektra a pri veľkom uhle náklonu môžu slúžiť ako polarimetre, keďže vykazujú dobrú citlivosť na polarizáciu. Odrazenú Braggovu vlnovú dĺžku vypočítame podľa rovnice 1.4:

$$\lambda_{Bragg} = \frac{2n_{co,eff}\Lambda}{\cos\xi}, \quad (1.4)$$

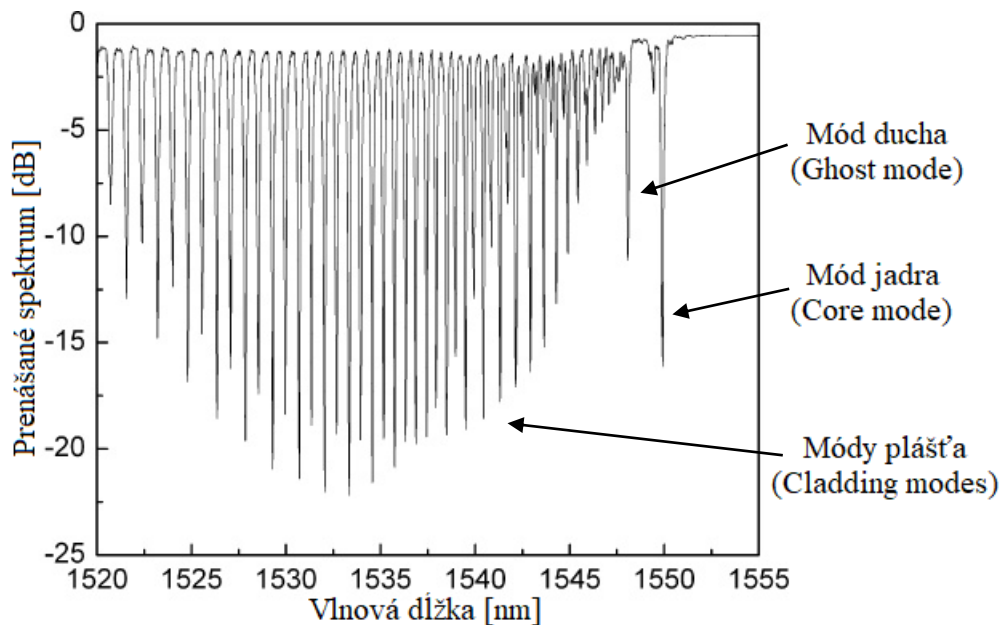
kde $n_{co,eff}$ predstavuje efektívny index lomu jadra, ξ je uhol naklonenia, Λ je nominálna perióda mriežky, ktorá môže byť popísaná pomocou periódy mriežky pozdĺž osi vlákna Λ_g . Tento parameter vypočítame pomocou rovnica 1.5:

$$\Lambda = \Lambda_g \cdot \cos\xi. \quad (1.5)$$

Pri naklonenej Braggovej mriežke nepozorujeme odrazové spektrum, kvôli tomu, že módy plášťa sa rapídne zmierňujú a teda nedajú sa pozorovať v odrazovom spektre, preto sa používa prenosové spektrum, ktoré môžeme vidieť na obrázku 1.8, kde môžeme pozorovať kvôli nakloneniu Braggovej mriežky mód ducha (Ghost mode), ktorý je výsledkom spájania módov z jadra a plášťa vlákna. Na základe veľkosti uhlu naklonenia a indexu lomu závisí veľkosť rezonančnej špičky a šírka pásma pre módy plášťa (cladding modes). Prenosová charakteristika naklonenej Braggovej mriežky nám poskytuje veľké množstvo informácií ohľadom optického vlákna a štruktúry samotnej mriežky. [8][9]



Obrázok 1.7: Naklonená Braggova mriežka



Obrázok 1.8: Prenosové spektrum naklonenej Braggovej mriežky

1.4 Výroba Braggových mriežok

Ako sme sa už dozvedeli Braggova mriežka sa nachádza v optickom vlákne, takže pri výrobe mriežky je základom optické vlákno. Keďže výroba Braggových mriežok prebieha pomocou UV žiarenia, ktoré v osvietenom bode ovplyvní vnútornú štruktúru vlákna a zmení jeho index lomu, potrebujeme aby dané vlákno malo vysokú fotosenzitivitu. Avšak normálne optické vlákno, ktoré je vyrobené z kremikového skla má slabú fotosenzitivitu. Preto sa optické vlákna, ktoré sú použité na výrobu Braggových mriežok, vyrábajú s prímiesou germánia aby sme zvýšili fotosenzitivitu na UV žiarenie a tým mohli vytvárať požadovanú zmenu indexu lomu.

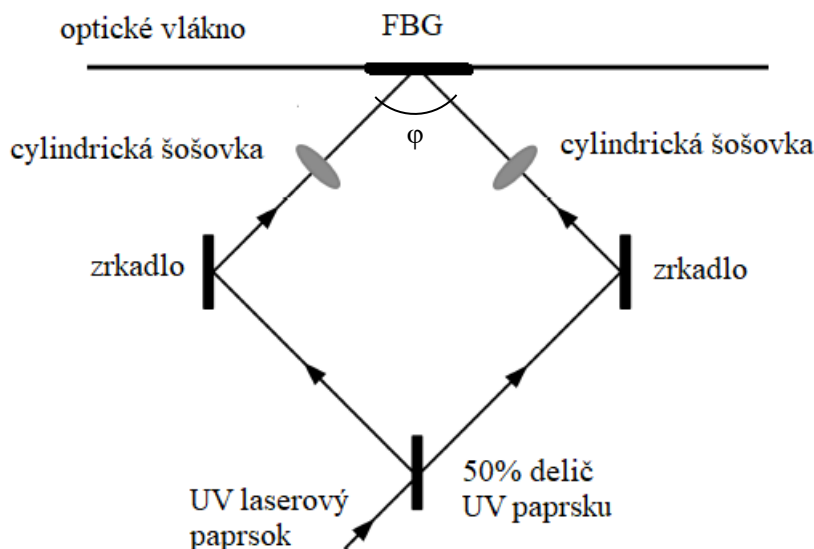
V počiatkoch, sa nevyrábali Braggové mriežky osvietením optického vlákna zo strany ale pomocou stojacej vlny radiačnej interferencie z konca vlákna. Táto výroba bola známa ako metóda vnútorného zápisu. Vlnová dĺžka, ktorá sa odrážala od takejto Braggovej mriežky mala rovnakú vlnovú dĺžku ako svetlo, pomocou ktorého bola Braggova mriežka vpísaná do vlákna. Až neskôr bola vynájdená metóda, ktorá dovoľovala vonkajší zápis Braggovej mriežky. Táto metóda už umožňovala vyrobiť mriežky, ktoré odrážajú ľubovoľnú vlnovú dĺžku a používa sa aj v súčasnosti. Braggove mriežky, ktoré pracujú na iných vlnových dĺžkach na akých boli vyrobené, sú vyrobené technikami, ktoré rozdeľujeme do dvoch kategórií. Na tie, ktoré sú vyrobené holograficky a tie, ktoré sú neinterferometrické. Ďalej existuje niekoľko laserových zdrojov, ktoré môžu byť použité v závislosti na použitom type vlákna použitého na výrobu Braggovej mriežky, type Braggovej mriežky alebo podľa cieľného aplikovania.

V tejto práci sa budeme bližšie zaoberať najpoužívanejšími výrobnými procesmi a teda interferometrickou metódou, výrobu pomocou fázovej masky a metódou bod po bode. [3][10]

1.4.1 Interferometrická metóda

Táto metóda bola prvou metódou, pomocou ktorej bola Braggova mriežka vyrobená vonkajším zápisom. Prvý krát bola predstavená pánom Meltzom v roku 1989. Ako môžeme vidieť

na obrázku 1.9 táto metóda spočíva v tom, že optický laserový lúč z UV zdroja sa rozdelí na dve zložky, ktoré sa následne odrazia od UV zrkadiel a dopadajú na vlákno pod určitým vzájomným uhlom, na ktorom sa tieto zložky spoja a vytvoria interferenčný vzor. Toto spôsobí v jadre vlákna permanentnú zmenu indexu lomu a teda vytvoríme postupne Braggovu mriežku.



Obrázok 1.9: Výroba FBG pomocou interferometrickej metódy

Táto metóda dovoľuje zvoliť Braggovu vlnovú dĺžku podľa vzťahu 1.6:

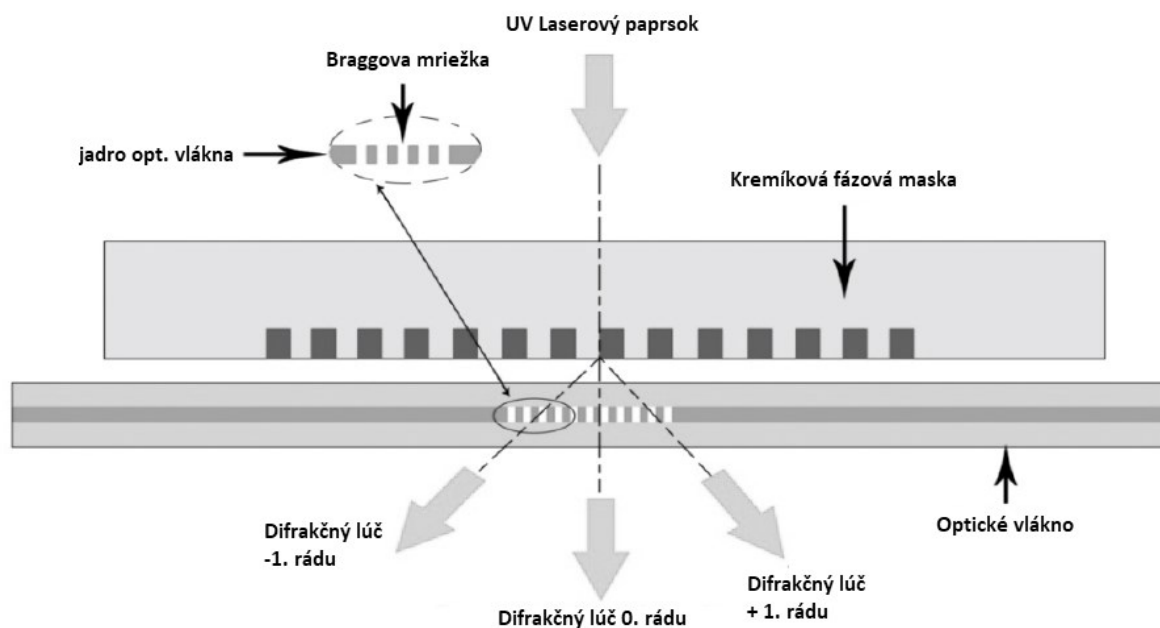
$$\lambda_B = \frac{n_{eff} \cdot \lambda_{UV}}{n_{UV} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (1.6)$$

kde λ_B je odrazená Braggova vlnová dĺžka, n_{eff} je efektívny index lomu vo vlákna, n_{UV} je index lomu kremíka v UV žiarení, λ_{UV} je vlnová dĺžka UV zdroja žiarenia a φ je uhol medzi dopadajúcimi paprskami. V rovnici 1.6 môžeme taktiež pozorovať, že zmenu odrazenej Braggovej vlnovej dĺžky môžeme meniť zmenou vlnovej dĺžky UV žiarenia no najmä zmenou dopadajúceho uhlu medzi paprskami, ktorý môže mať hodnotu 0° až 180° , zatiaľ čo hodnota vlnovej dĺžky je obmedzená UV oblasťou. [10] [11]

1.4.2 Fázovo maskovacia metóda

Nevýhody, ktoré so sebou prinášala vyššie uvedená interferometrická metóda, boli odstránené pri použití fázovo maskovacej metódy. Už z názvu sa môžeme dozvedieť, že hlavný a kľúčový prvok interferometra na výrobu Braggových mriežok je fázová maska. Čo je planárny, difrakčný optický prvok, ktorý má za úlohu rozdeliť dopadajúci paprsek podľa presne navrhutej masky. Fázová maska je vlnitá maska v substráte oxidu kremičitého, ktorá je vyleptaná holografickou metódou alebo litografickou metódou s elektrónovým lúčom. Táto metóda je najpoužívanejšia a najefektívnejšia na zápis Braggovej mriežky do fotocitlivých optických vlákien. Princíp je taký, že optický lúč

prechádza fázovou maskou a je priestorovo lomený tak aby vytvoril interferenčný vzor. Ten spôsobuje zmenu indexu lomu v jadre optického vlákna, čo môžeme vidieť na obrázku 1.10.



Obrázok 1.10: Výroba FBG pomocou fázovo maskovacej metódy

Pri dopadaní UV žiarenia fázová maska rozdeľuje dopadajúci lúč na niekoľko rádov, $m = 0., \pm 1., \pm 2., \dots$. Superpozíciou rôznych kladných a záporných difrakčných rádov, vzniká interferenčný vzor, ktorý sa dá použiť na vyvážanie Braggových mriežok v optickom vlákne. Za normálnych okolností je na výrobu Braggovej mriežky použitý blízky okraj interferencie, teda $\pm 1.$ rád difrakcie. Fázové masky na výrobu Braggových mriežok sú zvyčajne navrhnuté tak aby difrakčný lúč nultého rádu bol potlačený na menej percent – zvyčajne menej ako 3% prenášaného svetla. Naopak $\pm 1.$ rád býva maximalizovaný, kde kladná aj záporná zložka typicky obsahuje viac ako 35% prenášaného svetla. Ako môžeme vidieť vo vzťahu 1.7:

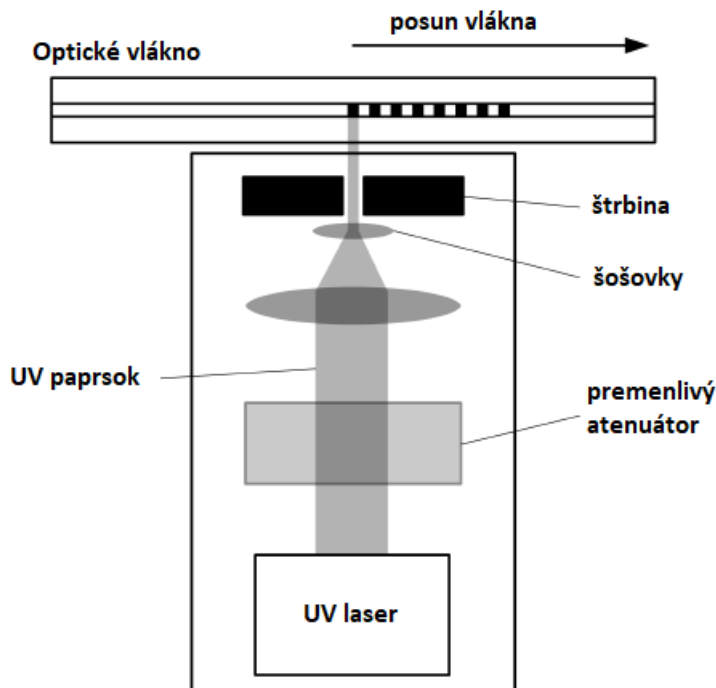
$$\Lambda_B = \frac{\Lambda_{FM}}{2}, \quad (1.7)$$

perióda vyleptanej Braggovej mriežky Λ_B v jadre sa rovná jednej polovici periódy fázovej masky Λ_{FM} . Vlnová dĺžka UV lúča v tomto prípade nijako neovplyvňuje výrobu Braggovej mriežky. [3][10]

1.4.3 Metóda bod po bode

Táto metóda sa považuje za najdokonalejšiu techniku výroby Braggových mriežok. Zmeny indexu lomu v jadre optického vlákna sa vytvárajú pomocou UV laserového impulzu postupne po jednom bode. Daný bod je osvetlený na dobu, ktorá je potrebná na vytvorenie zmeny indexu lomu. UV žiarenie, ktoré dopadá na fotocitlivé vlákno je presne zaostrené a prechádza malou štrbinou masky. Po vytvorení zmeny indexu lomu pre daný bod sa vlákno motorizovane presunie pozdĺž svojej osy o mikropozíciu a následne sa vytvorí ďalší bod zmeny indexu lomu. Tento proces výroby môžeme názorne vidieť na obrázku 1.11. Táto metóda výroby nie je veľmi rýchla, avšak poskytuje flexibilitu

na výrobu rôznych typov Braggových mriežok. Napríklad pri zmene veľkosti posunu môžeme vyrobiť rozmiatané Braggove mriežky alebo pri zmene intenzity UV žiarenia pomocou premenlivého atenuátora dostaneme apodizovanú Braggovu mriežku. Pretože je ťažké riadiť pohyb fázy dostatočne presne, táto metóda je vhodná len pre krátke mriežky. [11][12]



Obrázok 1.11: Výroba FBG pomocou metódy bod po bode

1.5 Braggove mriežky Typ I, II, IIA/In

Ako každý materiál má určitý rozsah použiteľnosti tak aj Braggove mriežky. Hoci nimi meriame teplotu, vysoká teplota môže poškodiť alebo zničiť Braggovu mriežku. Preto výrobcovia určujú rozsah teplôt, pre ktorý sa môže vlákno a teda aj Braggova mriežka používať bez toho, aby sa poškodili. Tento rozsah určujú najmä zaradením optickej Braggovej mriežky do skupín označovaných ako Typ I, Typ II a Typ IIA.

Najjednoduchšie Braggove mriežky s najmenším teplotným rozsahom sú Typu I. Tento typ mriežok je stabilný pri teplotnom rozsahu, ktorý sa pohybuje približne od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ po $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, čo je dostačujúci rozsah pre väčšinu telekomunikačných a senzorových aplikácií. Dokážu merať aj pri vyšších teplotách, no len krátky časový interval. Nesmieme však zabudnúť na to, že vymazanie takejto mriežky nastáva pri teplote približne 200°C . Tento typ Braggových mriežok je vyrábaný laserovými impulzmi s energiou pod prahovou hodnotou poškodenia skla. Zmena indexu lomu vo vlákne je docielená rýchlym a vysoko lokalizovaným zohrievaním a chladením skla, čo vedie k lokálnemu zhutňovaniu a pozitívnej zmene indexu lomu.

Aby sme mohli stabilne merať vyššie teploty, je potreba predísť poškodeniu/zničeniu mriežky. Preto sa pri Type II, Braggova mriežka už vytvára nad prahom poškodenia skla, kedy je sklo ionizované pomocou laserového paprsku, čo vedie k štruktúrnym zmenám čím sa zmení jeho index

lomu. Tieto mriežky majú tendenciu mať nepravidelné odrazové spektrum a vysoké prenosové straty, čo je zapríčinené profilom laserového lúča, avšak výhodou je že môžu stabilne merať teplotu až do 700 °C.

Posledným typom Braggových mriežok je Typ IIA alebo tiež In. Vyrábajú sa dlhým vystavením impulzných laserov alebo pri nízkej hustote energie. Tieto optické mriežky majú výraznú a ostrú spektrálnu odozvu a lepší tepelný výkon. Sú samoregeneračné, teda dokážu sa sami regenerovať pri vyšších teplotách. Bez ďalšej úpravy sú schopné stabilne merať do teploty 600 °C a krátkodobo do 800°C. Ak sú však optické vlákna naplnené vodíkom, ktorý pomáha pri regenerácii, sú schopné stabilne merať teploty vyššie ako 1000 °C. Tým, že sú optické vlákna naplnené vodíkom sú oproti normálnym mriežkam omnoho pevnejšie, čo pomáha k ich odolnosti voči vysokým teplotám.

[3][13][14][15]

2 FBG senzory vybraných fyzikálnych veličín

2.1 Meranie teploty pomocou FBG

Ako sme sa dozvedeli vyššie, Braggova mriežka je citlivá na teplotu a/alebo deformáciu. Ak by sme chceli vypočítať charakteristickú citlivosť vonkajšej deformácie a teploty, ktoré spôsobujú zmenu indexu lomu optického vlákna vplyvom elasto-optického javu použijeme vzťah 2.1:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k\varepsilon + (\alpha_A + \alpha_n)\Delta T, \quad (2.1)$$

kde na ľavej strane nájdeme v čitateli $\Delta\lambda_B$ čo je posun Braggovej vlnovej dĺžky. Teda rozdiel nameranej hodnoty Braggovej vlnovej dĺžky pred zmenou teploty a/alebo pôsobením deformácie od hodnoty Braggovej vlnovej dĺžky po zmene teploty a/alebo pôsobení deformácie. V menovateli je λ_B čo je už spomínaná hodnota Braggovej vlnovej dĺžky pred zmenou teploty a/alebo pôsobením deformácie. Na pravej strane už nájdeme hodnoty pôsobiacej deformácie a zmeny teploty, kde k je deformačný koeficient a ε je pôsobiaca deformácia. Tým môžeme povedať, že prvá časť pravej strany rovnice nám predstavuje vplyv deformácie na zmenu Braggovej vlnovej dĺžky. Druhá časť pravej strany rovnice predstavuje pôsobenie teploty na Braggovu mriežku, kde ΔT je rozdiel teploty, α_A je koeficient teplotnej rozťažnosti a má vplyv na geometrické vlastnosti, α_n je teplotne optický koeficient a vplýva na optické vlastnosti Braggovej mriežky.

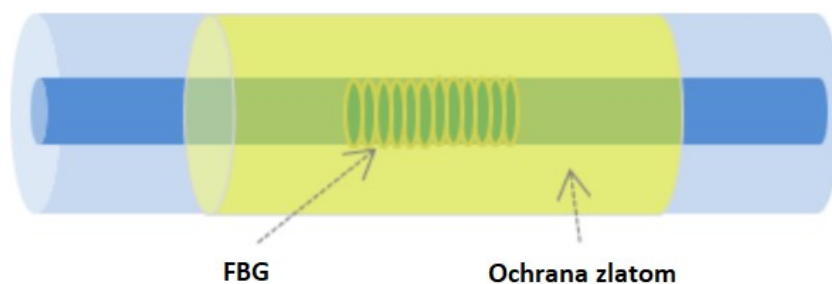
2.1.1 Teplotný rozsah a spôsob ochrany vlákien

Klasické snímače FBG dokážu odolávať teplotám, ktoré dosahujú približne 300 °C až 700 °C, záleží od typu použitej Braggovej mriežky a použitej ochrane. Preto boli vyvinuté rôzne techniky na zvýšenie tohto rozsahu ako napríklad mikroštruktúrované Braggove optické mriežky, ktoré boli vpísané infračervenými lasermi a regeneračné FBG na bázi oxidu kremíka, ktoré môžu stabilne pracovať pri teplote približne 1050 °C. Pri použití týchto techník a zažiarového vlnovodu môžeme teplotný senzor s Braggovou mriežkou použiť dokonca až do 1900 °C.

Optické vlákna s Braggovými mriežkami so základnou akrylátovou primárnou ochranou majú bežne použiteľnosť približne od -20 °C do +80 °C, je to z dôvodu, že pri teplote +80 °C sa začína poškodzovať primárna ochrana optického vlákna. Závisí však od materiálu, ktorý sa na ochranu použije. Môže to byť akrylát, ktorý sa používa najmä v telekomunikačných systémoch a používa dvojité ochrany akrylátu. Vnútornú jemnejšiu a vonkajšiu tvrdšiu. Tento materiál spolu s fluoroakrylátom, ktorý je netoxický a používa sa v medicíne, má teplotnú odolnosť do 80°C. Ak však použijeme na ochranu polyimid, ktorý má dobrú odolnosť vyšších aj nižších teplôt a používa sa v letectve, zväčší sa nám rozsah použiteľných teplôt od -65 °C až do 300 °C. [16][17]

Ak však máme Braggove mriežky s akrylátovou primárnou ochranou, ktoré majú základnú železnú ochranu je stanovený rozsah použiteľnosti približne od -50 °C do +100 °C. Takýto teplotný rozsah môže byť dostačujúci v biomedicíne alebo inom nie tak náročnom priemysle, no najmä v náročných prostrediach je tento teplotný rozsah nedostačujúci. Preto, aby sme mohli maximálne využiť teplotný rozsah snímačov Braggových mriežok, používajú sa na ochranu vlákna kovové zliatiny hliníku, mede a zlata, ktoré okrem ochrany pred teplotou zabraňujú chemickej korózii a mechanickej únavnosti vlákien. Pri použití hliníkového povrchu sa teplotný rozsah použiteľnosti

zväčší od $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$. S medených povrchom sa nám rozsah opäť rozšíri, kde môžeme merať od $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$ a keď je vlákno obalené zlatom dostávame rozsah, opäť od $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ale vrchná hranica sa posunie až na $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ s tým, že vlákno bude chránené až do $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento veľký rozsah a odolnosť voči korózií nám poskytuje použiť vlákno na mnohé náročné aplikácie snímania, ako napríklad v elektrárňach, turbínach, pri spaľovaní, hĺbkovom hľadaní ropy a plynu a mnohé ďalšie. Na obrázku 2.1 môžeme názorne vidieť vlákno so zlatým povrchom. [18][19]



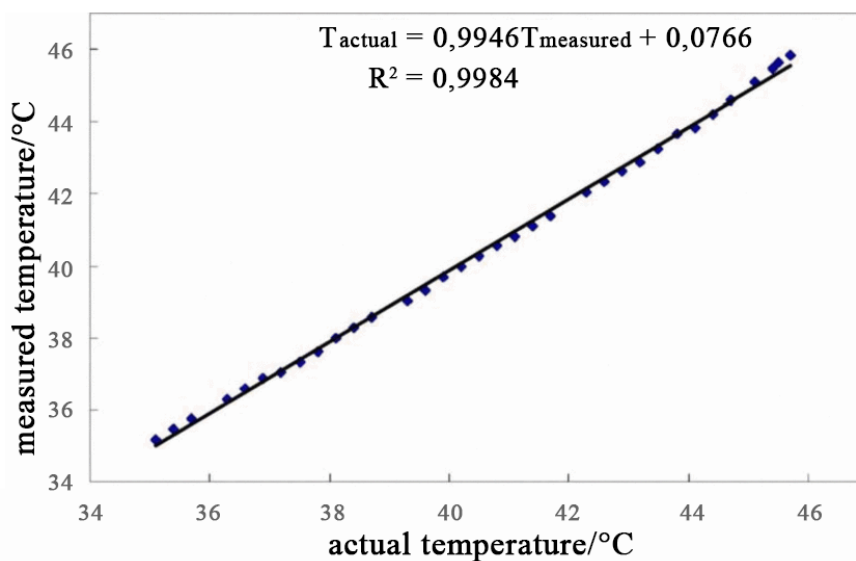
Obrázok 2.1: Ochrana optického vlákna zlatom

2.1.2 Ukážka použitia

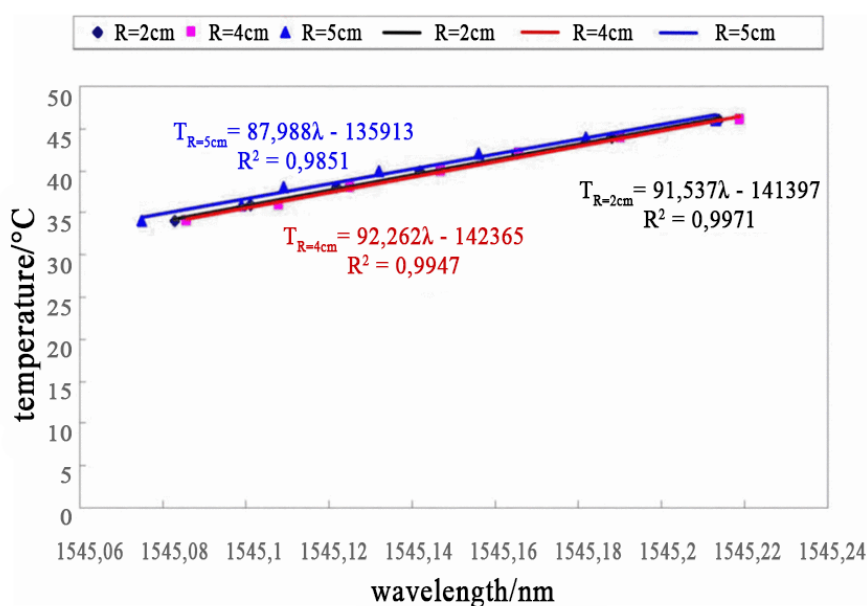
Princíp teplotného senzoru s Braggovou mriežkou spočíva v tom, že zmenou teploty je spôsobený posun Braggovej vlnovej dĺžky. Hlavným dôvodom sú: teplotná rozťažnosť vlákna, termo-optický efekt a elasticko-otický efekt. Tieto vlastnosti spolu s pridanou ochranou, ako bolo spomenuté vyššie, nám poskytuje široké spektrum na použitie. Keďže optické vlákno má dobrú odolnosť voči prírodným podmienkam, často sa používa ako vonkajší systém na meranie teploty. Kde podľa zmeny prírodných podmienok sa mení teplota a tým je ovplyvnená aj mriežka a teda aj centrálna vlnová dĺžka. Pri takýchto senzoroch je potrebné určiť najkratšiu dĺžku vlákien aby sme minimalizovali optické straty. [20] [21]

Z výsledkov testu [21], kde testovali presnosť teplotného senzoru s Braggovou mriežkou voči ortuťovému teplomeru s presnosťou $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, sa meralo s odstupom $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ od $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ po $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vyšla najväčšia odchýlka teplôt $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, čo je štandardná odchýlka. Celková lineárnosť nameraných výsledkov takéhoto senzoru bola 0.9984 čo môžeme vidieť aj z grafu na obrázku 2.2.

Keďže je takýto teplotný senzor s FBG stále optické vlákno, je prirodzene náchylný na ohyby s malým priemerom. Ohyby s veľkým priemerom už nehrajú rolu, keďže dnes vyrábané vlákna sú voči takýmto ohybom odolné. Preto je prirodzene nutné poznať presnosť merania pri rôznych malých polomeroch ohybu. Výsledky takéhoto testovania presnosti teplotného merania môžeme vidieť na obrázku 2.3, kde sa testovalo optické vlákno s Braggovou mriežkou pri polomeroch ohybu 2 cm , 4 cm a 5 cm . Podľa optických vlastností, by mali byť najhoršie výsledky lineárnosti z teplotného senzoru s Braggovou mriežkou pri najmenšom ohybe, kedy by sa malo vyviazať z optického vlákna najviac optického výkonu. No opak je pravdou. Najhoršia lineárnosť, a to „iba“ 0.9851 , vyšla pri najväčšom polomere ohybu. Pri ohyboch s polomerom 2 cm a 4 cm vyšla lineárnosť výsledkov takmer rovnaká no pri polomere 2 cm je lineárnosť 0.9971 čo je o kúsok lepšia ako lineárnosť 0.9947 pri polomere 4 cm .



Obrázok 2.2: Vzťah medzi nameranými teplotami pomocou FBG a ortuťovým teplomerom [21]

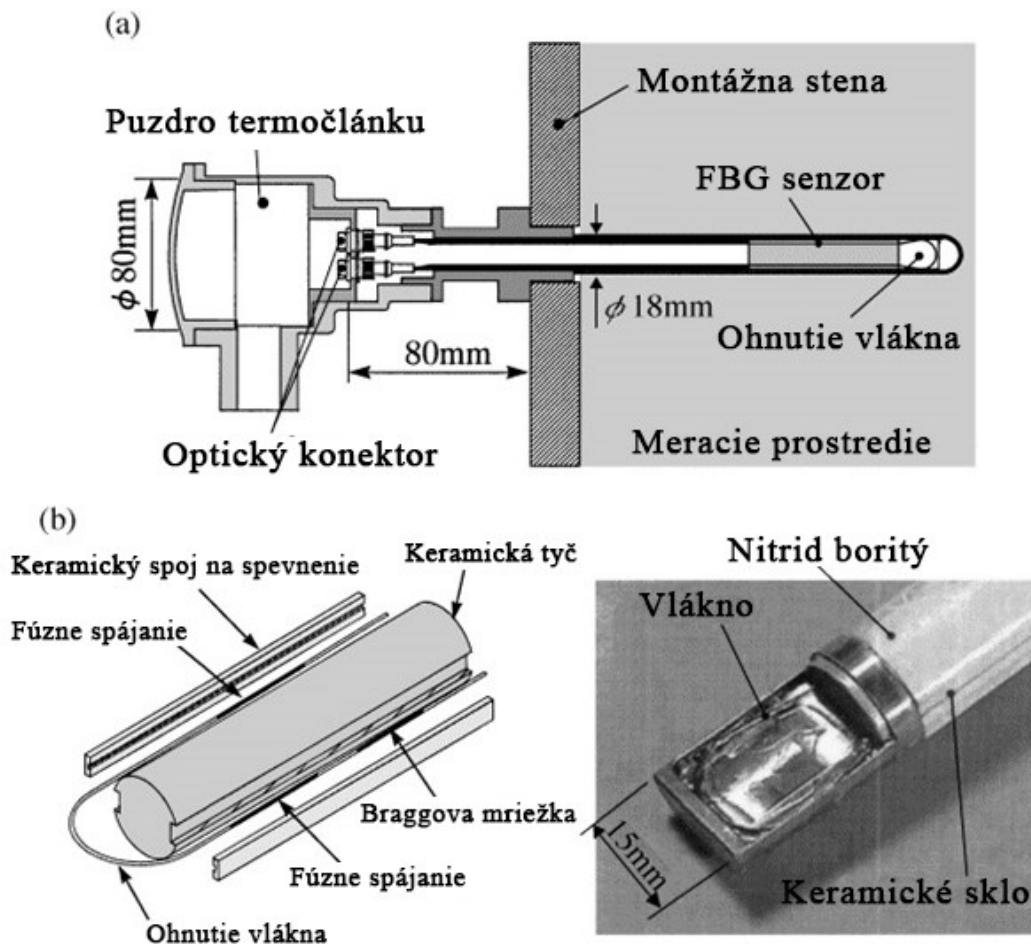


Obrázok 2.3: Teplotná krivka pri rôznych ohybových zakriveniach [21]

Z týchto výsledkov môžeme zhodnotiť, že teplotný senzor založený na optickej Braggovej mriežke je veľmi presný aj pri malých ohyboch a môžeme ho teda použiť aj na presné meranie teploty ľudského tela.

Tým, že vlákno s Braggovou mriežkou je teda odolné aj na malé ohyby, môže sa použiť aj implementovaním do rôznych súčiastok. V [22] môžeme pozorovať ako je optické vlákno implementované do puzdra termočlánku. Vlákno je zapustené pomocou ohýbania s malým polomerom v tvare „U“ a spojené s FBG. V tomto prípade na navýšenie odolnosti voči teplote na 250 °C, bol vybraný polyamid ako ochrana pre vlákno s Braggovou mriežkou. Spoj medzi FBG a U-ohybom je zalepený do keramického obalu polyimidovým lepidlom a následne je pripevnený ku keramickej

tyči, ktorá je vyrobená z nitridu bóritého, keďže jeho teplotná vodivosť je vysoká. Toto prevedenie môžeme vidieť na obrázku 2.4 a).

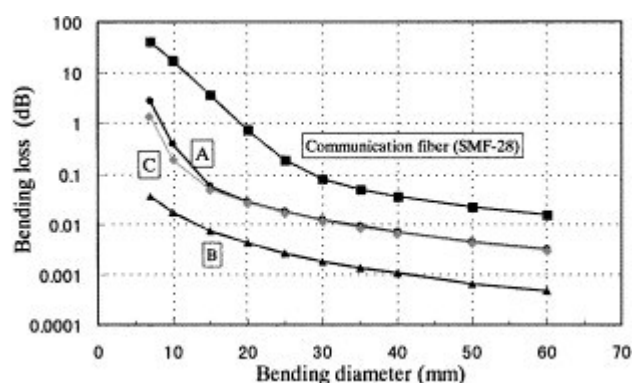


Obrázok 2.4: a) Teplotný snímač FBG, umiestnený v plášti termočlánku, b) Podrobná konštrukcia vrchnej časti puzdra

Pri použití superluminiscenčnej diódy ako zdroja žiarenia, pri zanedbaní prenosovej straty vlákien a pri optimalizácii podmienok na spájanie môžeme dokonca zapojiť sériovo až 12 takýchto senzorov. Vytvoríme si tak distribuovaný systém na meranie teploty. Keďže tu je použitý veľmi malý ohyb, záleží aj aké vlákno sa použije. Preto boli v danom experimente použité na ohyb tri typy vlákien, ktoré boli spojené zvarom k Braggovej mriežke. Podrobná konštrukcia puzdra je znázornená na obrázku 2.4b). Parametre vlákien môžeme vidieť v tabuľke 2.1 a porovnanie straty ohybov medzi jednotlivými vláknami spolu s porovnaním komunikačného vlákna na obrázku 2.5. [22]

	A	B	C
Priemer jadra vlákna (μm)	7.5	6.5	7.8
Priemer vlákna (μm)	80	80	125
Index lomu jadra	1.4618	1.4849	1.452
Index lomu plášťa	1.4529	1.4701	1.452
Index lomu delta	0.6126	1.0000	0.6198
Numerická apertúra	0.17	0.21	0.16

Tabuľka 2.1: Porovnanie parametrov jednotlivých optických vlákien



Obrázok 2.5: Porovnanie ohybových strát jednotlivých typov vlákien

S týmto experimentom vidíme, že Braggova mriežka môže byť vložená do veľmi malých ochranných prvkov a môžu byť spojené so špeciálnymi vláknami, ktoré majú čoraz ďalej menšie útlmy pri malých ohyboch. [22]

V [23] môžeme pozorovať, ďalšiu veľkú výhodu senzorov z Braggových mriežok a to ich elektrickú odolnosť. V tomto meraní bolo treba zaznamenávať teplotu izolácie vysokonapäťového transformátora aby neprekročila teplotnú hranicu udávanú výrobcom. Keďže tieto zariadenia majú napätie desiatky kV, použitie bežných senzorov na meranie teploty s vodivými časťami je nemožné. Malé rozmery, elektrická a magnetická odolnosť, lineárna odozva a veľmi rýchla odozva na zmenu teploty robia zo senzoru s Braggovou mriežkou jasného favorita na takúto použitie. Teplotný senzor s Braggovou mriežkou bol teda upevnený na povrch transformátora a aby bola zaistená presnosť merania, ako ďalší teplotný senzor bol použitý Fabry-Perotov teplotný senzor. Ďalej sa dozvieme, že pri použití mriežky s väčším mriežkovaním nastáva zrýchlenie linearít vlnovej dĺžky, čo spôsobilo chyby merania, ktoré boli potlačené použitím plynových absorbčných liniek. Tieto chyby boli najmä pri veľmi rýchlej zmene teploty. V meraní teplotnom rozsahu od 20°C po 70°C bola výsledná chyba linearít 0,18%, čím sa nám opäť potvrdila presnosť takýchto senzorov. [23]

2.2 Deformačné FBG senzory

Ako sa postupom času všetko mení, tak postupom času sa menia aj vlastnosti materiálu čo zapríčiňuje, že sa menia aj vlastnosti betónových stavieb, oceľových konštrukcií, stien tunelov a mnoho ďalších objektov. Aj keď sú všetky tieto stavby pri plánovaní dôkladne prepočítané tak aby odolali okolitým nepriaznivým podmienkam, je dobré ich pre istotu monitorovať, pretože aj keď sa pri výpočtoch počíta s najhorším, nevieme povedať čo sa v budúcnosti udeje. Môže nastať prírodná katastrofa, vada materiálu a mnoho ďalšieho, čo môže výrazne ovplyvniť tieto stavby a ohroziť zdravie a životy okolitých ľudí. Aj v takýchto prípadoch nám je nápomocná Braggova mriežka, ktorá už pri svojej jemnej deformácii mení svoju odrazenú Braggovu vlnovú dĺžku. Avšak nemôžeme zabudnúť, že Braggova mriežka reaguje aj na zmenu teplôt. Aby sme tomu zabránili používajú sa pri meraní dve vlnové dĺžky – jedna pre teplotu a druhá pre deformáciu.

Tým dostávame hlavný prvok na meranie zmien materiálu, ktorý sa určitým spôsobom deformuje. Záleží už len na fantázií aké puzdro pre Braggovu mriežku navrhne, aby sme vedeli čo najlepšie preniesť predpokladanú pôsobiacu silu (tlak), na Braggovu mriežku, ktorá bude touto silou (tlakom) deformovaná. Takýto senzor sa môže použiť samostatne ako tlakový senzor na meranie akustického tlaku, vody a pod. Najčastejšie sa však používa sériové zapojenie deformačných senzorov, ktoré sú umiestnené po celej oceľovej konštrukcii, betónovej stavbe atď.. Umiestnenie sa líši podľa toho aký materiál alebo tlak chceme pozorovať. V prípade oceľovej konštrukcie sa umiestňuje Braggova mriežka na povrch kritických miest. Ak sa jedná o betónovú konštrukciu býva Braggova mriežka často zaliata priamo do betónu na mieste, ktoré chceme pozorovať, môžeme ju však umiestniť taktiež na povrch. Takto môžeme aplikovať FBG senzory v stavebníctve ako napríklad na konštrukciách mostov, v mrakodrapoch, tuneloch, priehradách a podobne. Názorné príklady takýchto senzorov a ich použitie je bližšie uvedené v nasledujúcich podkapitolách. [23]

Pri určovaní deformácie materiálu nám pomôže Youngov modul, alebo aj modul pružnosti v ťahu, keďže deformujúca sila pôsobí kolmo na povrch telesa. Youngov modul, ktorý označujeme písmenom E , je materiálová konštanta, ktorá závisí od druhu materiálu a od teploty. Určuje nám správanie materiálu zaťaženého ťahovým napätím pomocou rovnice 2.2:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

kde σ predstavuje napätie v ťahu a ε relatívne predĺženie, ktoré vypočítame podľa vzťahu 2.3:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.3)$$

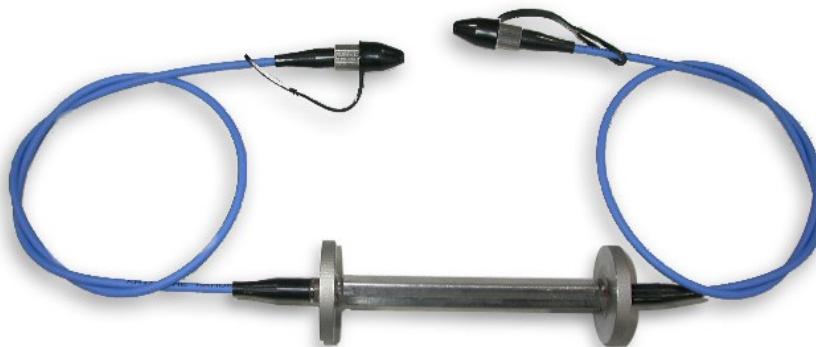
Δl tu predstavuje rozdiel dĺžky pred zaťažením ťahovým napätím od dĺžky po zaťažení ťahovým napätím a l je dĺžka pred zaťažením ťahovým napätím. [24]

2.2.1 Deformačný senzor vkladajú do betónu

V tejto podkapitole si priblížime deformačné senzory, ktoré sa inštalujú do betónových stavieb. Keďže optické vlákno je krehké, môže byť veľmi ľahko poškodené pri zalievaní betónu. Je teda veľké riziko, že vlákno spolu s Braggovou mriežkou sa trvalo poškodia pri nalievaní betónu a nebudú pracovať správne. Týmto vzniká aj určité obmedzenie na aplikáciu do betónových konštrukcií. Preto musíme zvoliť dostatočnú ochranu formou puzdra aby sa Braggova mriežka pri

implementácií do konštrukcie nepoškodila a zostala plne funkčná a citlivá na okolité zmeny. Vzor puzdra, ktoré sa zalieva do betónu môžeme vidieť na obrázku 2.6.

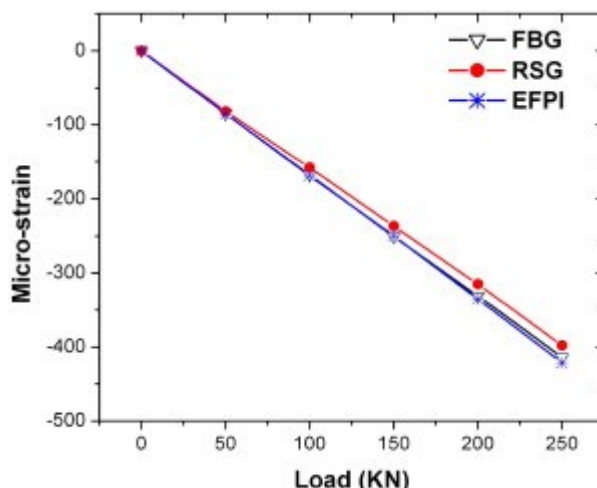
Ako môžeme pozorovať vonkajšie puzdro, ktoré chráni Braggovu mriežku je z ocele. Ďalej si môžeme všimnúť, že na okrajoch je priemer puzdra väčší ako v strede a puzdro vyzerá ako malá činka. Je to preto, aby sila ktorá bude pôsobiť na senzor bola zaznamenávaná čo najlepšie a nedošlo k tomu, aby sa pracujúci betón len nepošmykol v pozdĺžnom smere senzoru. Ako si môžeme všimnúť optické konektory na pripojenie sú na obidvoch stranách aby sme mohli sériovo zapojiť viacero senzorov a pokryť tak čo najväčší priestor, ktorý chceme monitorovať. [25][26]



Obrázok 2.6: *Senzor na meranie napätia v betóne*

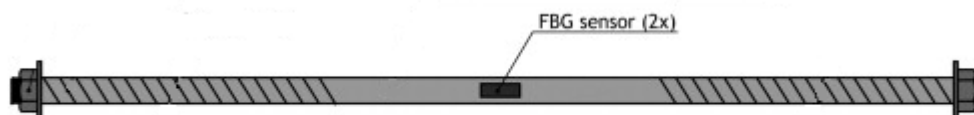
2.2.1.1 Príklad použitia deformačného senzoru vkladaneho do betónu

Aby sme mohli takéto senzory používať, musíme overiť a potvrdiť teóriu praxou. Na názornú ukážku funkčnosti takéhoto senzoru bol podobný senzor ako je na obrázku 2.6 vložený do betónu, na ktorý bolo aplikované tlakové zaťaženie s konštantnou rýchlosťou. Spolu so senzorom bol vložený do betónu optický snímač EFPI a na vonkajšom povrchu boli namontované štyri elektrónové odporové meradlá (ERSG). Keďže senzor bol vložený do tekutého betónu, ktorý následne tvrdol, je treba dávať pozor aby sa senzor pri vkladaní do betónu nepoškodil. Po vytvrdnutí betónu sa zmenila Braggova vlnová dĺžka, keďže už samotný betón pôsobí na senzor určitým tlakom, čím sa prirodzene Braggova vlnová dĺžka zmenila. Po zmeraní sa prešlo na zaťažovanie senzoru, ktoré bolo postupne zvyšované až na hodnotu 250 kN a po kroku 50 kN zaznamenávané. Ako môžeme vidieť na obrázku 2.7, výsledky napätia FBG snímača sú lineárne a veľmi podobné výsledkom z ďalších dvoch senzorov. Posun vlnovej dĺžky tu bol prepočítaný podľa známej hodnoty $1,2 \text{ pm} = \mu\text{strain}$. [27]

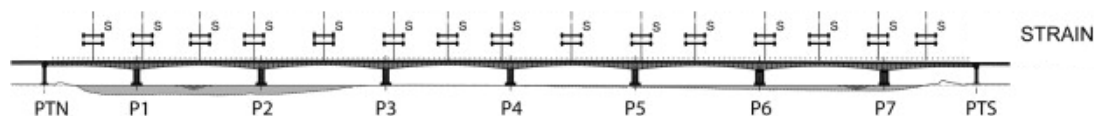


Obrázok 2.7: Odozva napätia na pôsobiacu silu pomocou FBG, RSG a EFPI senzoru

Ďalším príkladom použitia senzoru s Braggovou mriežkou v betóne môže byť [28], kde autori vkladali pri výstavbe mostu Leziria v Portugalsku do betónu senzory s FBG mriežkou. Návrh tohto senzoru môžeme vidieť na obrázku 2.8. Ako môžeme pozorovať jedná sa o oceľovú tyč, ktorá je špirálová na každej strane a na koncoch má ukotvenie. Má priemer 16 mm, dĺžku 1 m a vo vnútri tejto tyče sú pozdĺžne umiestnené dva FBG senzory, ktoré sú prilepené na diametrálne protíľahlé steny tejto tyče. Merané miesta boli vybraté tak, aby sa vedelo včas detekovať vážne poškodenie mostu, takže senzory boli umiestnené v kritických štrukturálnych oblastiach a to v podporných a stredových. Znázornenie umiestnenia senzorov môžeme vidieť na obrázku 2.9.



Obrázok 2.8: Návrh senzoru na meranie vnútorného napätia v betóne použitý pri stavbe mostu



Obrázok 2.9: Znázornenie umiestnenia senzorov v konštrukcii mostu

Tým sme si prakticky ukázali, že Braggova mriežka môže byť použitá ako senzor na meranie vnútorného tlaku, ktorý je vyvíjaný v betónových stavbách. Nesmieme však zabudnúť na vhodný ochranný kryt, ktorý dokáže preniesť pôsobiacu silu na Braggovu mriežku a zároveň ju ochrániť. [28]

2.2.2 Senzor na meranie povrchového napätia

Na rozdiel od predchádzajúceho typu senzoru tento typ sa upevňuje na povrch materiálu k čomu je aj prispôsobené puzdro pre Braggovu mriežku ako môžeme vidieť na obrázku 2.10. Existuje niekoľko variant pre výrobu takýchto puzdiel. Môžu byť polyamidové, kovové, sklolaminátové



Obrázok 2.10: *Senzory na meranie napätia – Z ľavej strany: athermálny, miniatúrny polyimidový, kompozitný, zvaráci, na meranie povrchového napätia*

Senzory sa dajú použiť samostatne ako senzory na meranie povrchového napätia no najčastejšie sa však používa sériovo zapojených niekoľko sensorov na meranie napätia materiálu. Potom pri povrchovom napätí sa počíta Braggova vlnová dĺžka λ_B podľa vzťahu 2.4:

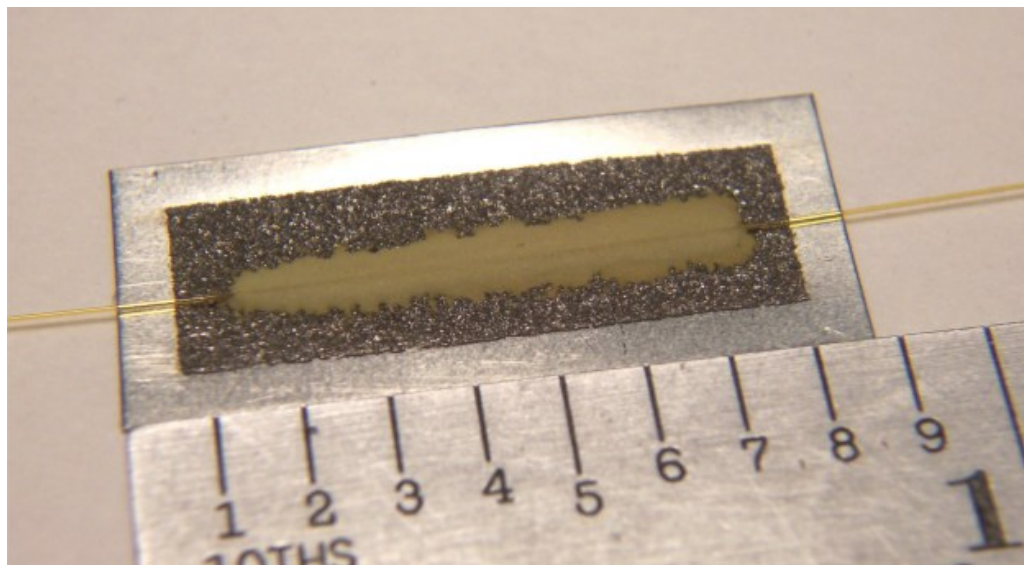
$$\lambda_B = \frac{2n_0 \cdot \Lambda_0}{k}, \quad (2.4)$$

kde n_0 je index lomu jadra, Λ_0 je perióda mriežky a k je poradie mriežky. Nemôžeme zabudnúť, že Braggova mriežka je citlivá aj na meniacu sa teplotu. Toto sa samozrejme platí len pokiaľ sa nejedná o athermálne puzdro, ktoré býva odolné voči teplotám približne v rozsahu cca 0 °C – 70 °C. [29]

2.2.2.1 Príklad použitia deformačného senzoru na meranie povrchového napätia

V nasledujúcej časti, sa zoznámime s testovaním senzoru na meranie povrchového napätia. Autori danej práce majú dlhoročné skúsenosti s manipuláciou a aplikáciu keramických cementov, preto sa rozhodli vyrobiť senzor na meranie materiálového napätia práve s použitím tohto materiálu. Jeden z dôvodov je ten, že keramický cement HP 701 obsahuje vysoký obsah oxidu kremičitého, čo by mohlo zodpovedať tepelnej rozťažnosti samotného optického vlákna. Ďalšia výhoda je, že je teplotne odolný až do rozsahu 700 °C. Daný senzor môžeme vidieť na obrázku 2.11.

Odozva na napätie snímača bola testovaná na lineárnosť, hysteréziu a citlivosť faktora merania. Použilo sa tlakové a ťahové zaťaženie konštantnou rýchlosťou pomocou univerzálneho skúšobného stroja. Vzorky prešli niekoľkými cyklami zaťaženia, aby sa zistilo, či došlo k indukovanému reziduálnemu efektu a posunu pri nulovom namáhaní. Faktor tenzometra bol 1,25 pm/με v rozmedzí od -1000 do + 1000 με. Z výsledkov kde lineárnosť dosahovala hodnotu 0.999 je zrejmé, že odozva FBG senzoru je opakovateľná a lineárna, to nám potvrdzuje praktické použitie Braggovej mriežky na meranie vonkajšieho materiálového napätia. [30]



Obrázok 2.11: *FBG napäťový senzor s keramickým cementom na železnej podložke*

Autori ďalšej práce vybrali pre Braggovu mriežku ako ochranný materiál sklolaminát. Po vytvorení niekoľkých senzorov sa rozhodli okrem iného otestovať meraním aký veľký je rozdiel keď sa napätie materiálu meria povrchovo a keď je do materiálu vložený senzor. Preto si vyrobili betónový valec, do ktorého pri výrobe vložili jeden senzor a následne na povrch prilepili pomocou epoxidového lepidla ďalší senzor. Bolo vykonaných viacero meraní kde boli použité samotné senzory ale aj zapojenie viacerých senzorov pomocou jedného vlákna s použitím metódy frekvenčne modulovanej kontinuálnej vlny (FMCW). Výsledok bol taký, že senzory odhalili v reálnom čase zmenu napätia a pri nízkych intervaloch zaťaženia namerané hodnoty súhlasia. Pri meraní s viacerými senzormi je dôležité správne usporiadanie senzorov, keďže pri poškodení senzoru ostatné senzory za poškodeným sensorom v smere od zdroja žiarenia stratia signál. [31]

2.3 Tlakový senzor

Tlakový senzor je kľúčový senzor pre bezpečnú prevádzku rôznych technických produktov a systémov. Tieto senzory môžeme nájsť v najrôznejších odvetviach, od medicíny až po najrôznejšie technologické a experimentálne pokusy. Tým prirodzene narastá množstvo typov tlakových senzorov, so snahou potlačiť okolité rušivé vplyvy pri meraní. Rozšírené sú inteligentné tlakové senzory, ktoré obsahujú elektronické súčiastky, ktoré pomáhajú pri linearizácii charakteristík, nastavenie rozsahu merania, znižovanie teplotnej závislosti a pod.. Lenže zjavná výhoda elektronických súčiastok použitých v senzorech je nevýhoda pri snahe použiť dané senzory v prostrediach, kde hrozí nebezpečenstvo výbuchu. Preto, v takýchto prostrediach sú extrémne prísne požiadavky na tlakové senzory aby nedošlo k nehode. Najrozšírenejšie sú tlakové senzory, ktorých kľúčový prvok je deformačný člen. Jeho deformácia je priamo lineárna s vyvinutým tlakom naň a táto mechanická deformácia sa prevádza na elektrický digitálny signál. Takýto prevod je založený na piezoelektrickom, induktívnom, kapacitnom, thermo-elektrickom a akustickom princípe. Všetky tieto princípy majú veľký počet technických obmedzení na meranie tlaku v prostredí s elektromagnetickým rušením a vo výbušnom prostredí.

Tieto obmedzenia však neplatia pre optické vláknové senzory, ktoré sú vďaka vlastnostiam optického vlákna odolné voči elektromagnetickému rušeniu. Keďže optické vlákno je založené na princípe šírenia svetla, môžu sa takéto senzory bezpečne používať aj v prostrediach kde je riziko výbuchu. Opäť aj tu sa väčšinou využíva pri meraní deformácia spôsobená tlakom, ktorý meriame. Na meranie tlaku pomocou optických vlákien sa používajú dva princípy. Prvý princíp je založený na Fabry-Perotovom rezonátore a druhý využíva vlastnosti Braggovej mriežky. Obidva princípy merania sú veľmi citlivé a presné na meranie pôsobiaceho tlaku, no aby sme zaručili ich presnosť a citlivosť na tlak, musíme vložiť senzory do vhodných puzdier. Keďže táto práca sa zaoberá problematikou senzorov s Braggovou mriežkou, my sa budeme bližšie zaoberať iba senzorom na meranie tlaku, ktoré sú založené na Braggovej mriežke. S tým aj súvisí relatívny posun Braggovej mriežky $\Delta\lambda_B/\lambda_B$, ktorý súvisí s axiálnym napätím ε aplikovaným na mriežku, čo môžeme vidieť v rovnici 2.5:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\varepsilon, \quad (2.5)$$

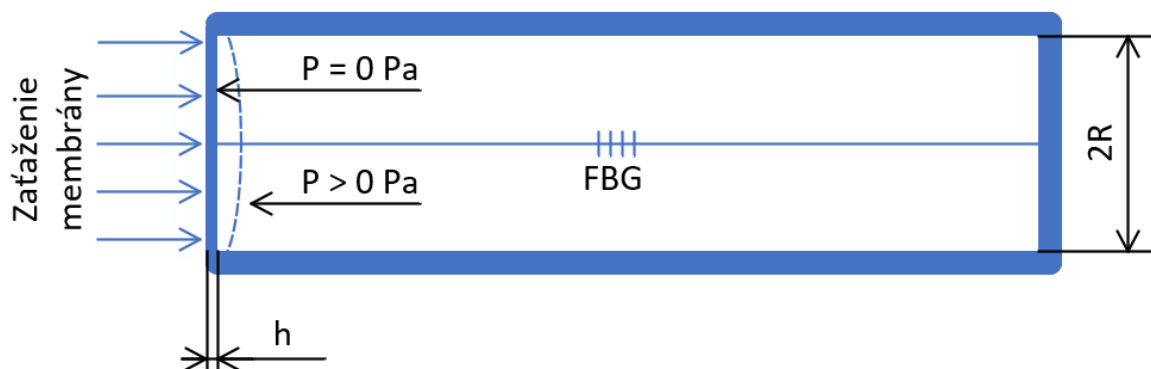
kde P_e je efektívny fotoelastický efekt skla vo vlákne. Ten vypočítame pomocou Poissonovho ratia ν , fotoelastických koeficientov P_{11} a P_{12} a efektívneho indexu lomu n_{eff} , čo môžeme vidieť v rovnici 2.6. Toto platí ak meriame tlak v prostredí kde je konštantná teplota a teda $\Delta T = 0$.

$$P_e = 0.5n_{eff}^2[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \quad (2.6)$$

Pri použití valca ako puzdra pre tlakový senzor, kde na jednej strane je pohyblivá membrána, ku ktorej je pripevnené vlákno, a na druhej strane je vlákno taktiež pevne uchytené sa používa zmena tlaku na deformáciu Braggovej mriežky čo môžeme vidieť na obrázku 2.12. Tlak spôsobujúci deformáciu membrány vypočítame podľa rovnice 2.7:

$$\varepsilon_r = \frac{3P(1 - \nu^2)(R^2 - 3r^2)}{8Eh^2} \quad (2.7)$$

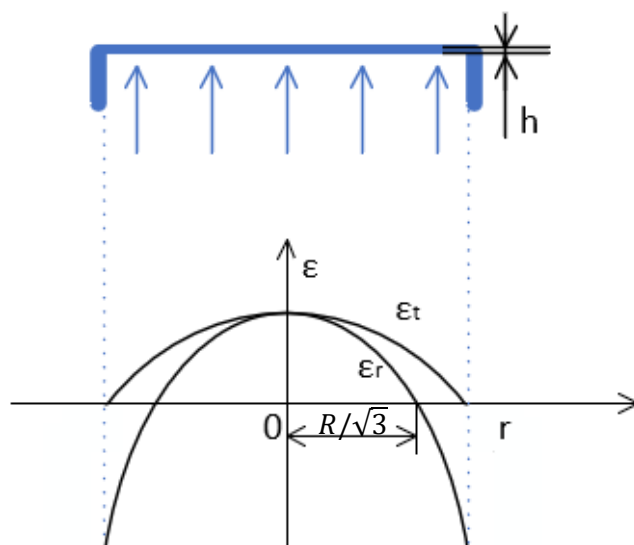
kde E je Youngov model membrány, R je polomer membrány, h je hrúbka membrány, ν je Poissonov pomer materiálu membrány a r je vzdialenosť od stredu membrány smerom k okraju. [32] [33] [34]



Obrázok 2.12: Valcový tlakový senzor s pohyblivou membránou

Ako je znázornené na obrázku 2.13 radiálna ε_r a tangenciálna ε_t deformácia dosahuje maxima v strede membrány. Pre radiálnu deformáciu ε_r je v rozsahu približne 0 až $R/\sqrt{3}$ pozitívne klesanie z maxima do nuly (ťah) a v rozsahu $R/\sqrt{3}$ až r klesanie ostáva, ale deformácia klesá do záporných

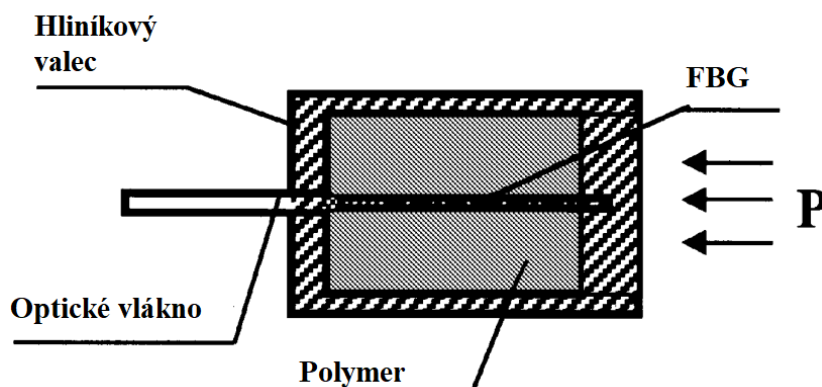
hodnôt (tlak). Tangenciálna deformácia klesá zo z maximálnej hodnoty v strednej časti membrány teda z nuly na nulovú hodnotu na okraji membrány - r . Názorné znázornenie deformácií môžeme vidieť na obrázku 2.13. [35]



Obrázok 2.13: Znázornenie radiálnej a tangenciálnej deformácie

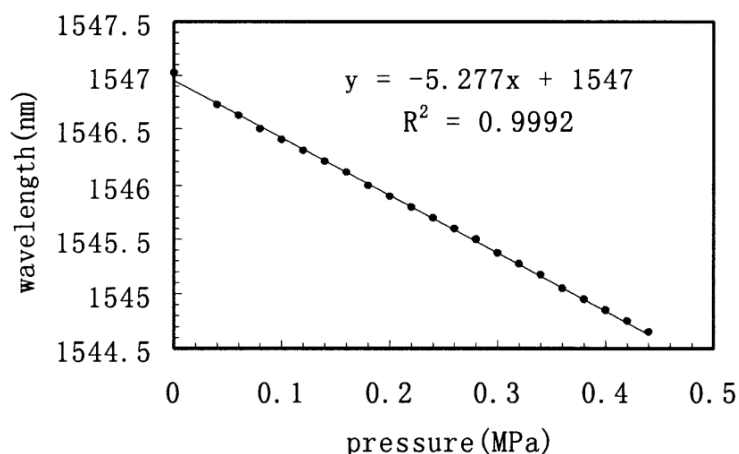
2.3.1 Príklad použitia tlakového senzoru

Aby sme čo najlepšie preniesli a zaznamenali tlak na Braggovu mriežku, musíme ju v puzdre dobre upevniť na miesto, na ktoré bude pôsobiť tlak. Keďže je puzdro často valcového tvaru je dobré, valec vyplniť vhodným materiálom aby sme zabránili tomu, že by sa vlákno pri pôsobiacom tlaku len prehlo. Tým by sa senzor stal takmer nefunkčným, keďže tlak by nespôsobil deformáciu mriežky ale ohyb vlákna. V pokuse, ktorý si uvedieme použili ako puzdro hliníkový valec, do ktorého upevnili optické vlákno s Braggovou mriežkou na pohyblivej strane, na ktorú budú pôsobiť tlakom. Výstup optického vlákna sa nachádza oproti miestu, kde bude tlak pôsobiť. Aby sa vlákno pri pôsobení tlaku neprehlo, bol valec naplnený polymérom, konkrétne silikónovým kaučukom. Názorný obrázok senzoru môžeme vidieť na obrázku 2.14.



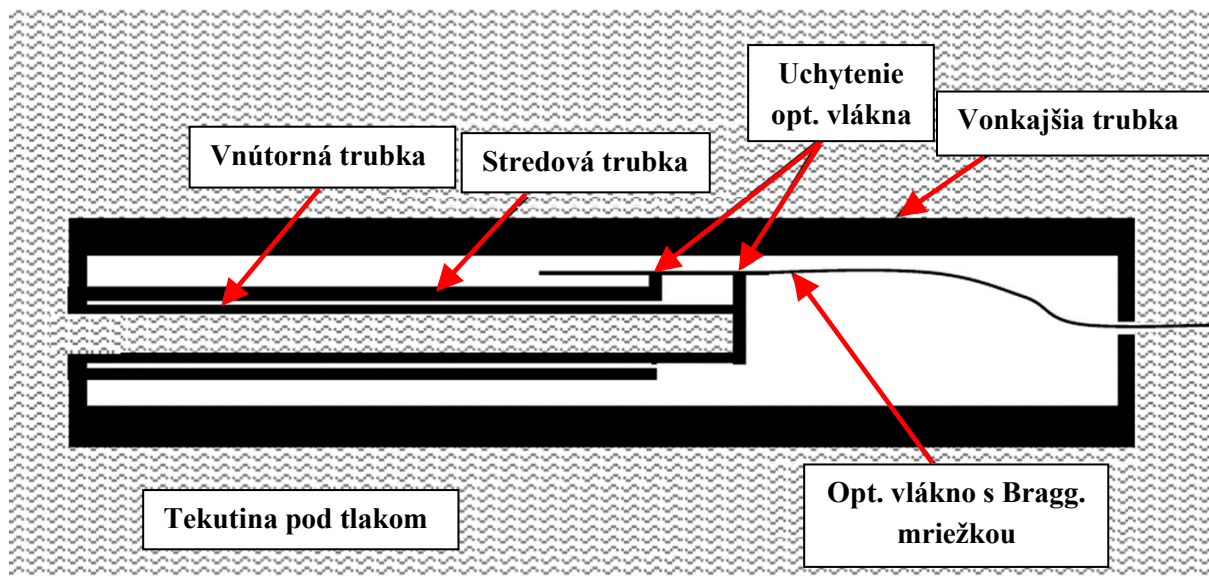
Obrázok 2.14: Tlakový senzor s polymérovou výplňou

Senzor bol umiestnený do hydraulickej tlakovej komory, kde bol pôsobiaci tlak presne meraný. Braggova vlnová dĺžka bola meraná optickým spektrálnym analyzátorom. Graf závislosti pôsobiaceho tlaku a Braggovej vlnovej dĺžky môžeme vidieť na obrázku 2.15. Môžeme pozorovať takmer úplnú lineárnosť nameraných hodnôt vlnovej dĺžky v závislosti na pôsobiacom tlaku. Pri meraní sa dokonca preukázalo, že namerané hodnoty citlivosti na tlak daného senzoru sú mnohonásobne lepšie ako citlivosť na tlak holej Braggovej mriežky. Výsledná citlivosť daného senzoru je -5.28 nm/MPa , čo odpovedá tlakovej citlivosti $-3.41 \times 10^{-3} \text{ MPa}$. [32]



Obrázok 2.15: Odozva FBG tlakového senzoru na pôsobiaci tlak

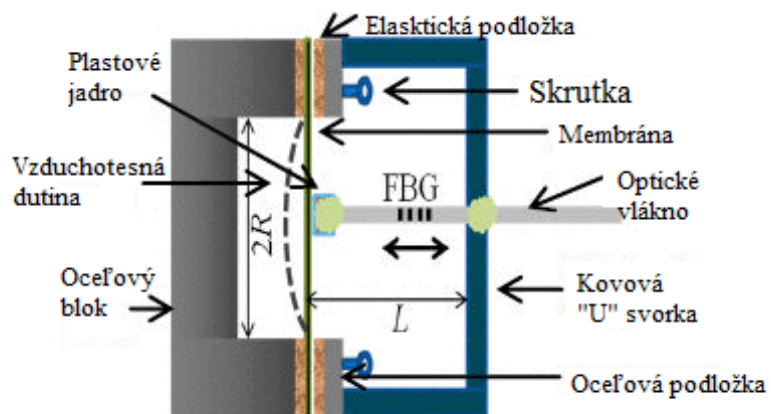
V článku [36] sa dozvieme o trošku inom spôsobe merania tlaku pomocou senzoru s Braggovou mriežkou. Tentokrát sa tlakový senzor používa na meranie tlaku tekutín až po tlak 53.8 MPa. Keďže je Braggova mriežka citlivá aj na teplotu v prostredí kde sa pokus konal bola stála teplota. Tlakový senzor bol vyrobený z troch oceľových rúrok. Jednej hlavnej, v ktorej bola prizvaraná ďalšia rúrka, ktorá nemá ani jeden koniec uzavretý. Táto rúrka slúži ako ochrana a je k nej prichytený jeden koniec vlákna s Braggovou mriežkou. Následne sa ukrýva v tejto rúrke ešte posledná menšia, ktorá má jeden koniec uzavretý a jeden otvorený. Na vonkajšej strane uzavretého konca je prichytené optické vlákno s Braggovou mriežkou a cez otvorený koniec vstupuje kvapalina. Daný senzor môžeme názorne vidieť na obrázku 2.16. Keď sa vnútorná rúrka natlakuje jej dĺžka sa zmení podľa veľkosti pôsobiaceho tlaku, čo budeme pozorovať ako zmenu Braggovej vlnovej dĺžky, keďže sa natiahne vlákno spolu s Braggovou mriežkou. Výsledky testovania ukázal, že takýto senzor má lineárnu citlivosť na tlak.



Obrázok 2.16: Tlakový senzor na kvapaliny

Podobný princíp, kedy pôsobiaci tlak ňaťahuje optické vlákno spolu s Braggovou mriežkou bol použitý aj v [37]. Štruktúru navrhnutého senzora môžeme vidieť na obrázku 2.17. Pozostáva z troch hlavných častí: horná kruhová kovová podložka, spodný kovový blok a tenká kovová membrána. Ako snímač tlaku sa používa tenká kovová membrána z hliníka s hrúbkou 0.32 mm, ktorá vytvára vzduchotesnú dutinu medzi pevnou membránou a kovovým blokom. Membrána je pevne upnutá medzi kovovou podložkou a kovovým blokom pomocou pružných podložiek a skrutiek. Tenká kovová svorka v tvare „U“ je pevne pripevnená na kovovej podložke, aby sa na ňu mohol pripevniť jeden koniec FBG a ďalší koniec FBG je pevne pripojený k stredú membrány pomocou tenkého tvrdého jadra z plastu s priemerom 1,5 mm. Predpäté vlákno s Braggovou mriežkou je tak pevne prilepené medzi membránou a svorkou v tvare „U“.

Meranie sa uskutočnilo tak, že senzor, ktorý bol pripojený na optický spektrálny analyzátor, bol vložený do tlakovej komory. Tá bola meraná pomocou presného digitálneho tlakomeru a v pravidelných krokoch tlakovaná kompresorom po 2 psi v rozsahu 0-30 psi a následne po dosiahnutí tlaku 30 psi, bol tlak opäť uvoľňovaný po krokoch 2psi. Posun Braggovej vlnovej dĺžky pre aplikovaný tlak bol 0,22nm/psi s linearitou 99,9%. Senzor teda vykazuje dobrú linearitu a opakovateľnosť pri meraní tlaku. [37]



Obrázok 2.17: Štruktúra tlakového senzoru

3 Návrh a realizácia teplotného FBG senzoru

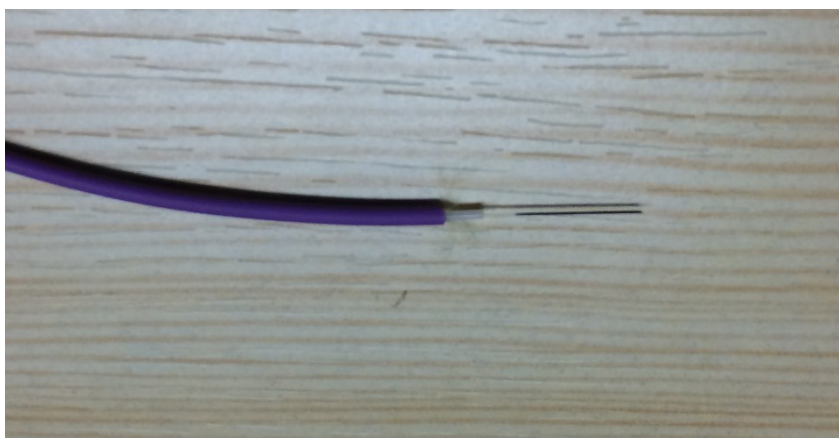
Ako bolo už spomenuté v predchádzajúcej kapitole, Braggove mriežky sú veľmi citlivé na deformáciu, tlak a zmenu teploty. Táto vlastnosť spolu s malými rozmermi, nízkou váhou, elektromagnetickou odolnosťou a ďalšími výhodami robia tieto senzory mimoriadne užitočnými pre implementáciu v civilnom a strojárskom priemysle okrem iného aj na meranie teploty. Vysoká citlivosť na zmenu teploty nám minimalizuje chyby merania a nepresnosti, ktoré sa môžu vyskytnúť pri iných metódach na meranie teploty. Keďže teplotné a deformačné zmeny súvisia so zmenou centrálnej vlnovej dĺžky mriežky, môžeme pri teplotnom senzore určiť koeficient posunu vlnovej dĺžky vzhľadom ku zmene teploty. Výpočet koeficientu môžeme vidieť v rovnici 3.1:

$$k = \frac{\lambda_{Bmax} - \lambda_{Bmin}}{T_{max} - T_{min}} [pm/^{\circ}C]. \quad (3.1)$$

V čitateli odčítame minimálnu nameranú Braggovu vlnovú dĺžku od maximálnej nameranej vlnovej dĺžky a v menovateli odčítame minimálnu nameranú teplotu od maximálnej nameranej teploty. Typicky býva tento koeficient pre holú Braggovu mriežku 10,1 pm/°C. Pre meranie Braggovej vlnovej dĺžky použijeme optický spektrálny analyzátor (OSA) a na meranie teploty čo najpresnejší kalibrovaný teplomer. Pre čo najlepšie určenie koeficientu sa meranie opakuje niekoľko krát. Z nameraných hodnôt určíme priemer a z neho následne určíme koeficient. [11]

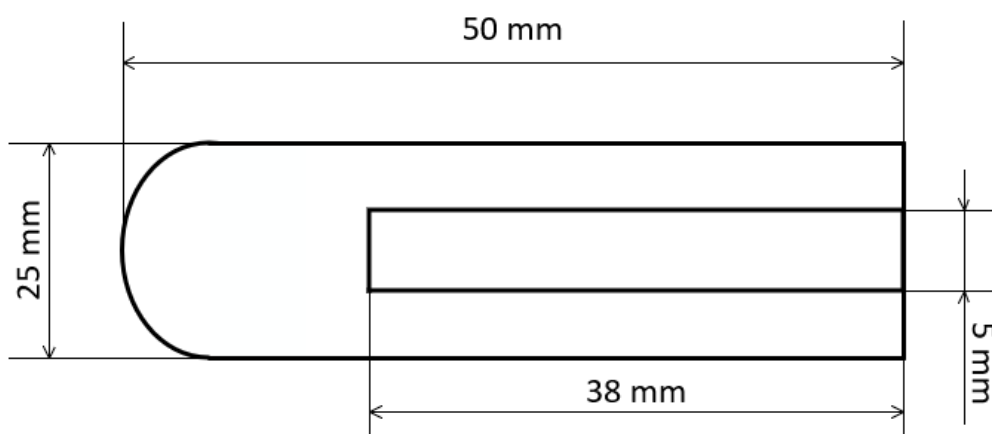
3.1 Návrh a výroba senzora

Po diskusií s vedúcim diplomovej práce som sa rozhodol, že pri návrhu teplotného senzoru sa čiastočne inšpirujem teóriou a praktickou ukážkou, ktorá je uvedená vyššie. Optické vlákno s Braggovou mriežkou vložím do medeného puzdra, ktoré má dobrú tepelnú vodivosť a tým vytvorím senzor na meranie teploty. Aby sa samotné vlákno pri meraní teploty a manipulácií mechanicky nepoškodilo, vložil som ho ešte do ďalšej polymérovej ochrany fialovej farby čo môžeme vidieť na obrázku 3.1. Môžeme si všimnúť, čierny koniec optického vlákna. Túto časť optického vlákna označil výrobca a určuje miesto, v ktorom sa nachádza vláknová Braggova mriežka. Avšak Braggova mriežka sa nachádzala v strede dodaného optického vlákna, preto som musel optické vlákno na jednej strane urezať po čierne vyznačenú časť.



Obrázok 3.1: Braggova mriežka v prídavnej polymérovej ochrane

Následne som Braggovu mriežku vložili do vopred pripraveného medeného puzdra, ktoré bolo z jednej strany uzavreté a z druhej strany bola približne do trištvrte puzdra vyvrtaná diera s priemerom 5mm. Návrh tohto puzdra môžeme vidieť na obrázku 3.2. Pre lepší prenos teploty medzi puzdrom a Braggovou mriežkou, som pred vložením optického vlákna s mriežkou do puzdra, naplnil vyvrtanú diery asi na 90% teplovodivou pastou AKASA 455, ktorá sa používa na prenos tepla medzi procesormi počítačov a ich chladičmi. Po vložení Braggovej mriežky som do voľného kúska diery (asi 10%) a navrch diery naniesol vrstvu dvojzložkového lepidla kvôli fixácii optického vlákna v puzdre. Ako ochranu pred mechanickým poškodením vlákna na začiatku vstupu do medeného puzdra, som na optické vlákno a začiatok medeného puzdra aplikoval ďalšiu ochranu. Túto ochranu si môžeme všimnúť na obrázku už hotového teplotného senzoru 3.3 vpravo. Vľavo môžeme pozorovať senzor bez tejto ochrany. Tu by som poukázal na fixáciu prídavnej polymérovej ochrany fialovej farby prilepením k mednému puzdru aby nedošlo k tomu, že by sa táto ochrana povytiahla.



Obrázok 3.2: *Návrh medeného puzdra pre teplotný FBG senzor*



Obrázok 3.3: *Hotový teplotný senzor*

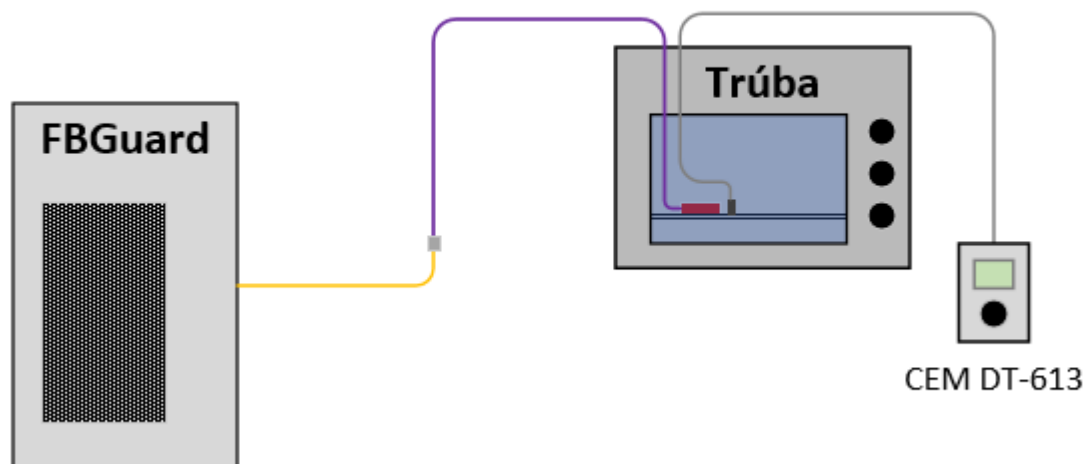
Keďže pri zváraní a pri tuhnutí lepidla mohlo dôjsť k posunu Braggovej vlnovej dĺžky, po každom kroku som ju zmeral pomocou spektrometru FBGuard, od firmy Safibra s.r.o, ktorý som používal pri všetkých meraniach. Po zváraní vlákna a pigtailu som zmeral Braggovu vlnovú dĺžku a po vytvrdnutí lepidla som opäť zaznamenal jej zmenu. Zmeny môžeme vidieť v tabuľke 3.1 a ako si môžeme všimnúť, lepidlo malo vplyv na Braggovu vlnovú dĺžku. Hodnota vlnovej dĺžky pred zváraním je hodnota udávaná výrobcom optického vlákna s Braggovou mriežkou.

	Braggova vlnová dĺžka λ_B [nm]
Pred zváraním	1547.525
Po zváraní	1547.525
Po vytvrdnutí lepidla	1547.535

Tabuľka 3.1: Zmena Braggovej vlnovej dĺžky λ_B

3.2 Kalibrácia a meranie

Teplotný senzor s Braggovou mriežkou bol teda hotový a pripravený na kalibráciu, stačilo už len vložiť vyrobený teplotný senzor, ktorý bol pripojený na FBGuard, do tepelnej trúby s ďalším kalibračným teplomerom. Senzor som teda vložili do trúby na pečenie Concept ET 5050 spolu s teplotnou sondou, ktorá bola pripojená k digitálnemu teplomeru CEM DT-613. Hlavným problémom, s ktorým som sa stretol pri kalibrácii teplotného senzora bolo to, že na trúbe sa nedala presne a digitálne nastaviť jej teplota ale len manuálne na približnú teplotu. Tým trúba nedokázala udržať stálu teplotu, pretože po dosiahnutí približne nastavenej teploty sa vypla, čím sa začala ochladzovať a následne sa opäť zapla až keď teplota klesla pod určitú hodnotu. Tým sa teplotný FBG senzor zahrieval a ochladzoval, čím vplyvom teplotnej hysterézie materiálu, z ktorej bolo puzdro vyrobené, nemeria FBG senzor vždy presne rovnakú teplotu ako digitálny teplomer. Schému kalibrácie môžeme vidieť na obrázku 3.4.



Obrázok 3.4: Schéma kalibrácie teplotného FBG senzoru

Pri kalibrácii som postupoval tak, že po nastavení približnej teploty na trúbe som počkal, kým sa trúba zahreje. Keď sa teplota na digitálnom teplomeri ustálila, poznamenal som si teplotu z teplomera a Braggovu vlnovú dĺžku nameranú pomocou FBGuardu. V tabuľke 3.2 vidíme hodnoty z kalibrácie, kde λ_B predstavuje aktuálnu nameranú Braggovu vlnovú dĺžku, $\Delta\lambda_B$ predstavuje posun nameranej Braggovej vlnovej dĺžky oproti pôvodnej Braggovej vlnovej dĺžke a T_{FBG} nám ukazuje

vypočítanú teplotu nameranú pomocou FBG senzoru. Aby sme však mohli vypočítať nameranú teplotu pomocou FBG senzoru, musíme poznať teplotný koeficient kT . Ten dostaneme, ak preložíme posun Braggovej vlnovej dĺžky lineárnou priamkou a vypočítame rovnicu linearity, čo môžeme vidieť na obrázku 3.5. Hodnota koeficientu nám teda vyšla $12.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, čo následne dosadíme do rovnice 3.2:

$$T_{\text{FBG}} = \frac{\Delta\lambda_B}{kT} \cdot 1000 + T, \quad (3.2)$$

kde T je nameraná počiatočná teplota pomocou teplomeru, čo bolo pri kalibrácii $24.4 \text{ }^\circ\text{C}$. Keďže teplotný koeficient sa udáva v $\text{pm}/^\circ\text{C}$ a hodnoty vlnovej dĺžky sú v nm , musíme pridať násobok tisíciky čím dostaneme výslednú hodnotu teploty v $^\circ\text{C}$. Ďalej som vypočítal absolútnu a relatívnu chybu merania. Absolútnu chybu merania som počítal podľa rovnice 3.3:

$$\Delta X = X_n - X_s, \quad (3.3)$$

kde X_n je nameraná hodnota a X_s je skutočná hodnota. Relatívnu chybu merania som vypočítal podľa rovnice 3.4:

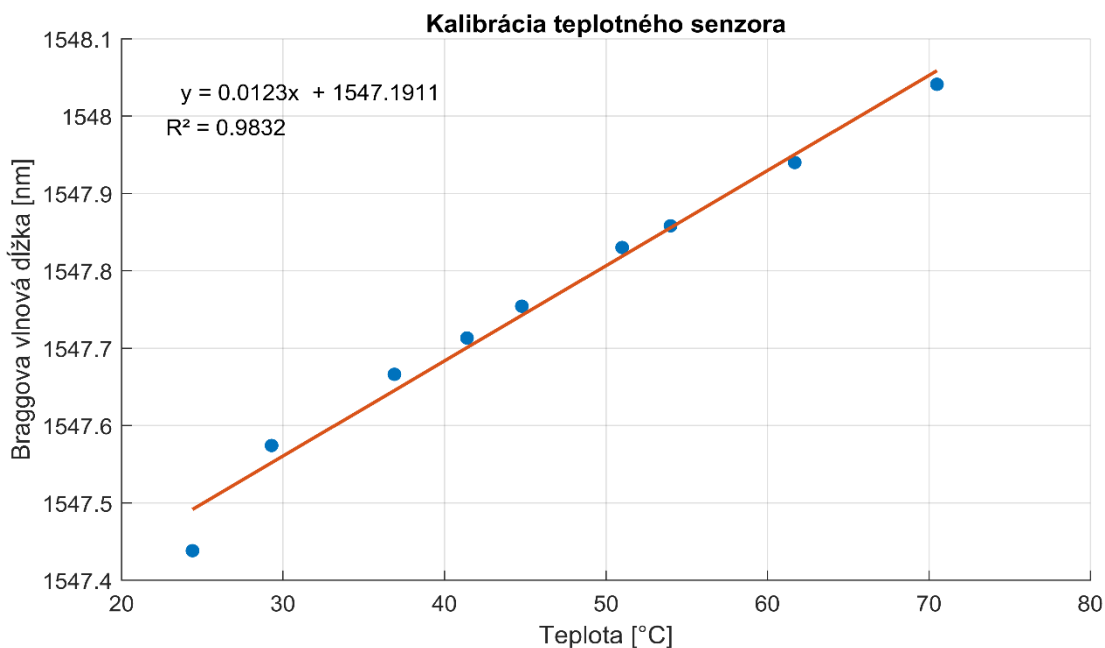
$$\delta r = \frac{\Delta X}{X_s} \cdot 100, \quad (3.4)$$

čím som dostal hodnoty v percentách, keďže som výsledok vynásobil stovkou.

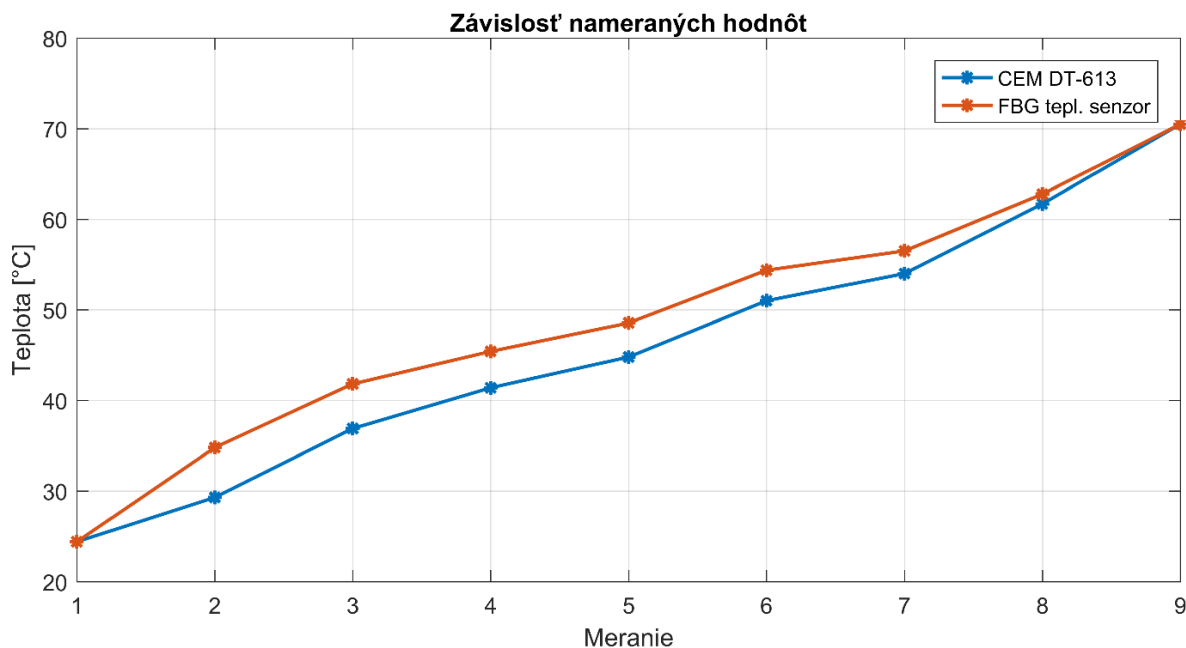
Meranie	Teplomer [$^\circ\text{C}$]	λ_B [nm]	$\Delta\lambda_B$ [nm]	T_{FBG} [$^\circ\text{C}$]	Absolútna chyba [$^\circ\text{C}$]	Relatívna chyba [%]
1	24.4	1547.438	0.000	24.40	0.00	0.00
2	29.3	1547.574	0.136	35.46	6.16	21.01
3	36.9	1547.666	0.228	42.94	6.04	16.36
4	41.4	1547.713	0.275	46.76	5.36	12.94
5	44.8	1547.754	0.316	50.09	5.29	11.81
6	51	1547.83	0.392	56.27	5.27	10.33
7	54	1547.858	0.420	58.55	4.55	8.42
8	61.7	1547.94	0.502	65.21	3.51	5.69
9	70.5	1548.041	0.603	73.42	2.92	4.15

Tabuľka 3.2: Kalibrácia FBG senzoru

Na obrázku 3.5, ako už bolo spomenuté vyššie, môžeme pozorovať závislosť jednotlivých teplôt, pri ktorých som zaznamenával údaje vlnovej dĺžky FBG teplotného senzoru. Z rovnice v obrázku zistíme že citlivosť teplotného senzoru je približne $12.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. Následne na obrázku 3.6 vidíme závislosť nameranej teploty pomocou digitálneho teplomeru a vypočítanej teploty, ktorú sme namerali pomocou FBG teplotného senzoru.



Obrázok 3.5: Teplotné body namerané pomocou digitálneho teplomeru a zaznamenaná vlnová dĺžka z FBG teplotného senzoru

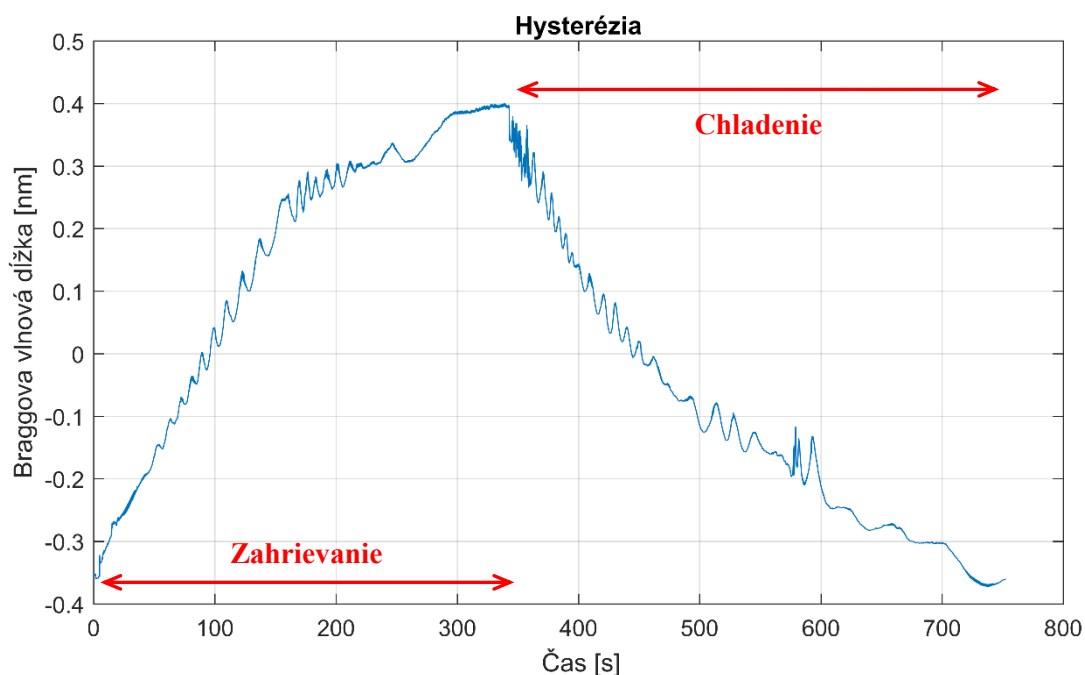


Obrázok 3.6: Závislosť teplôt nameraných pomocou digitálneho teplomeru a FBG teplotného senzoru

Na koniec merania som otestoval hystereziu môjho teplotného senzoru. Tento priebeh môžeme vidieť na obrázku 3.7. Počiatočná teplota, na ktorej som začal zaznamenávať priebeh bola 25 °C a najvyššia teplota bola 60 °C. Môžeme pozorovať, že senzor sa na začiatku veľmi rýchlo ohrieval, keďže krivka rýchlo stúpala. Neskôr sa jej stúpanie spomalilo a následne môžeme vidieť pomerne strmé stúpanie až na koncovú teplotu. Tento jav nerovnomerného zohrievania a teda

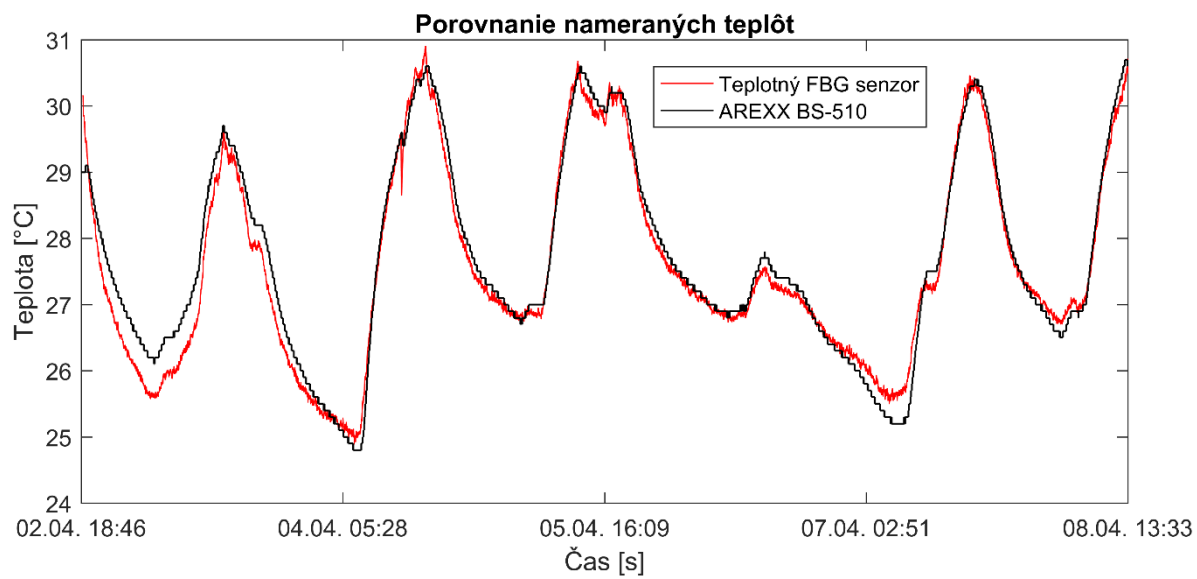
nelineárne stúpanie krivky spôsobilo to, že trúba v ktorej sme meranie robili je určená na pečenie a jej ohrev sa vypne, keď dosiahne určitú teplotu, na ktorú je orientačne nastavená. Ohrev sa zapne až keď teplota klesne pod určitú hodnotu, tým pádom si táto trúba nedokáže udržať konštantnú teplotu, čo by sme potrebovali pre najpresnejšie zmeranie hysterezie. Orientačne však môžeme z grafu povedať, že ak senzor vložíme do prostredia s teplotou 60 °C potrebuje na dosiahnutie tejto teploty asi 4 minúty.

Následne po dosiahnutí teploty 60 °C som otvoril trúbu a nechal senzor vychladnúť čím začal chladnúť pri okolitej teplote približne 25 °C. Z grafu vidíme, že z počiatku bolo chladnutie senzoru rýchlejšie no postupne sa spomaľovalo. Celková doba chladnutia na pôvodnú teplotu 25 °C bola približne 6,5 minúty.



Obrázok 3.7: Priebeh Braggovej vlnovej dĺžky pri teplotnej hysterezii

Aby som otestoval teplotný FBG senzor aj z dlhodobého hľadiska, umiestnil som ho do miestnosti spolu s meračom teploty Arexx BS-510 na šesť dní. Tento merač sa skladá z prijímacej stanice a z bezdrôtového teplotného meracieho senzoru, ktorý bol položený vedľa teplotného FBG senzoru. Teplotný FBG senzor bol pripojený na FBGuard, ktorý zaznamenával dáta každých desať sekúnd a merač teploty Arexx BS-510 zaznamenával dáta približne každých 65 sekúnd. Táto hodnota zapisovania dát zo senzoru AREXX sa nedá nijak ovplyvniť, keďže je továrne nastavená. Priebeh zaznamenaných teplôt môžeme vidieť na obrázku 3.8. Môžeme si všimnúť, že priebeh oboch záznamov má približne rovnaký priebeh, s priemernou chybou merania 0,21 °C. Táto chyba môže byť zapríčinená ako nepresnosťou meracieho teplotného senzoru tak aj možnosťou poškodenia teplotného FBG senzoru v predchádzajúcom meraní.

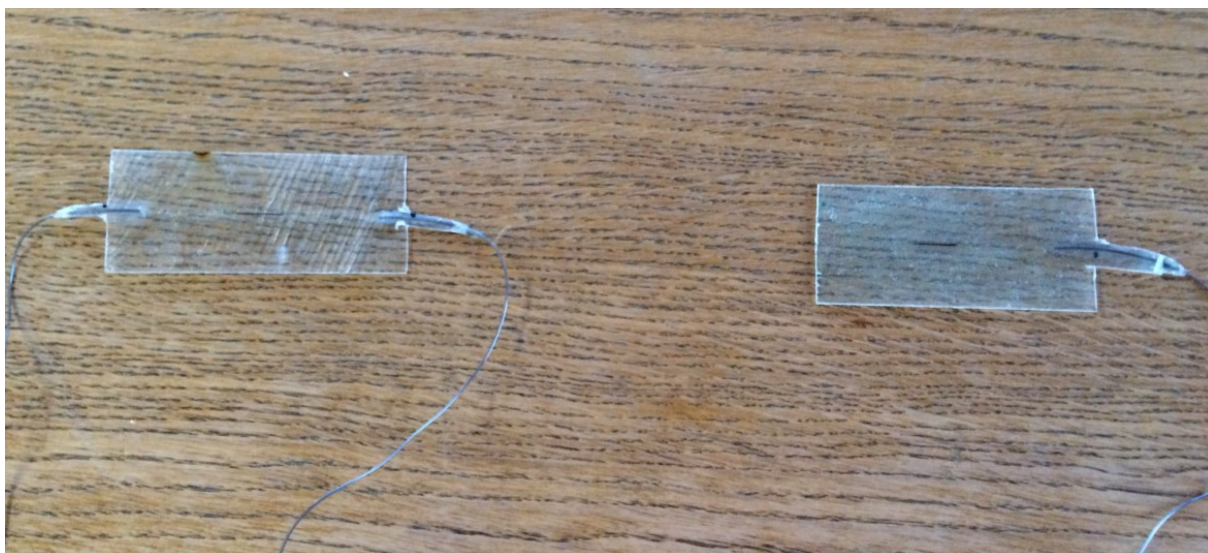


Obrázok 3.8: *Priebeh zaznamenatej teploty pomocou FBG senzoru a merača teploty AREXX*

4 Návrh a realizácia sklolaminátového FBG senzoru na meranie deformácií

4.1 Výroba

Pri návrhu sklolaminátového senzoru som sa čiastočne inšpiroval Braggovými vláknovými senzormi, ktoré sa používajú na meranie napätia. V týchto senzoroch sa používa vysoká citlivosť Braggovej mriežky na deformáciu a teda už aj pri najmenších otrasoch dokáže Braggova mriežka vo vhodnom puzdre tieto otrasy zaznamenať. Preto som si vytvoril optické vlákno s dvoma Braggovými mriežkami, ktoré som následne zvlášť zalial do sklolaminátu. Tieto senzory môžeme vidieť na obrázku 4.1. Prvý senzor, ktorý je prechodový (označovaný ako FBG 1), bol vyrobený tak, že Braggova mriežka bola vložená do stredu medzi štyri vrstvy sklolaminátu. Teda zospodu a z vrchu mala 2 vrstvy. Druhá Braggova mriežka, ktorá tvorí koncový senzor (označovaný ako FBG 2), bola vložená medzi osem vrstiev sklolaminátu, takže zospodu a z vrchu mala štyri vrstvy.



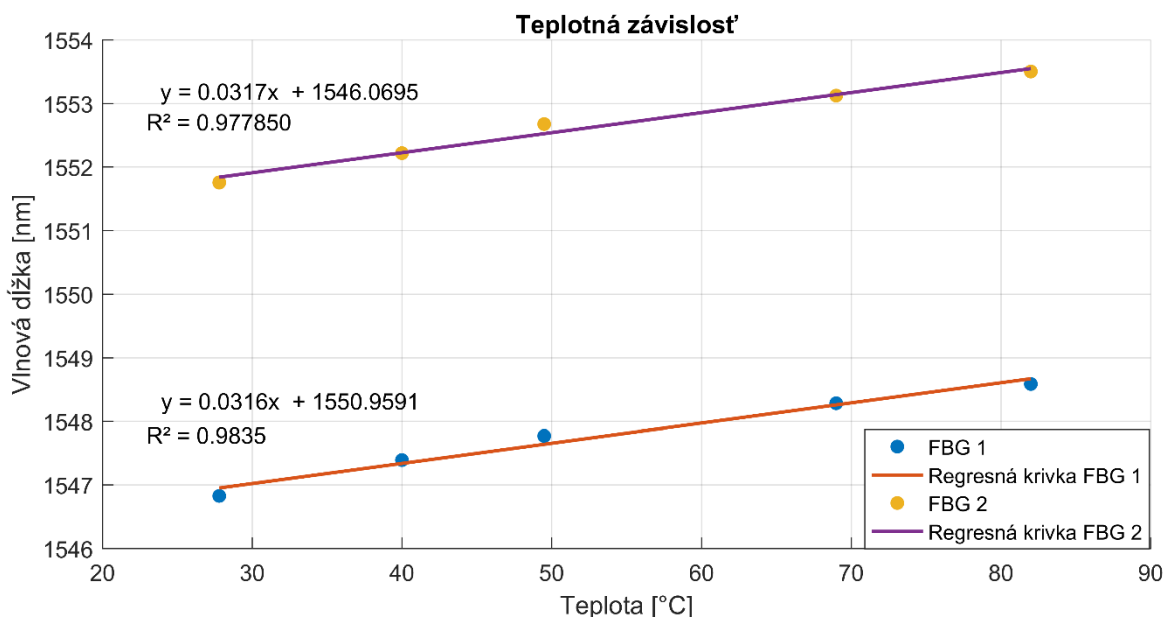
Obrázok 4.1: FBG senzory zo sklolaminátu, naľavo je prechodový a napravo je koncový senzor

4.2 Meranie teplotnej závislosti

Keďže citlivosť Braggovej mriežky na deformáciu nie je jediná vlastnosť, otestovali sme tieto senzory aj na teplotu a zmerali závislosť zmeny Braggovej vlnovej dĺžky týchto senzorov na teplote. Meranie som robil v rovnakej trúbe ako pri meraní s teplotným senzorom a teda teplota sa nedala presne digitálne nastaviť ale len orientačne. Tým aj odstupy teplôt nie sú rovnomerné ale skôr približné. Priebeh závislosti môžeme vidieť v tabuľke 4.1 a graficky na obrázku 4.2. Z nameraných údajov a vypočítaných rovníc lineariry v grafe zistíme teplotný koeficient, ktorý bol pre oba senzory takmer rovnaký. Pre FBG 1 -prechodový senzor bol tento koeficient $31.6\text{pm}/^\circ\text{C}$ a pre FBG2 - koncový senzor bol koeficient $31.7\text{pm}/^\circ\text{C}$.

Teplota [°C]	$\lambda_{\text{FBG 1}}$ [nm]	$\lambda_{\text{FBG 2}}$ [nm]
27.8	1546.825	1551.756
40	1547.39	1552.216
49.5	1547.77	1552.674
69	1548.282	1553.123
82	1548.585	1553.503

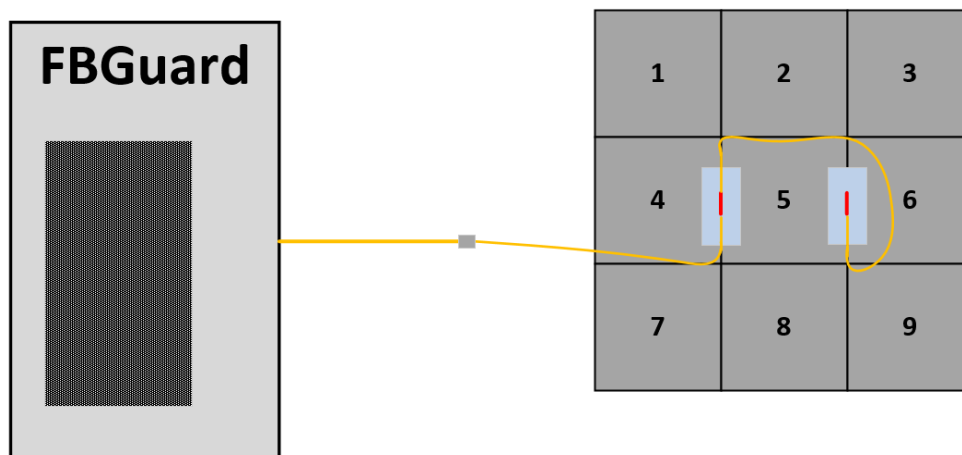
Tabuľka 4.1: Tabuľka teplotnej závislosti sklolaminátových senzorov



Obrázok 4.2: Graf teplotnej závislosti sklolaminátových senzorov

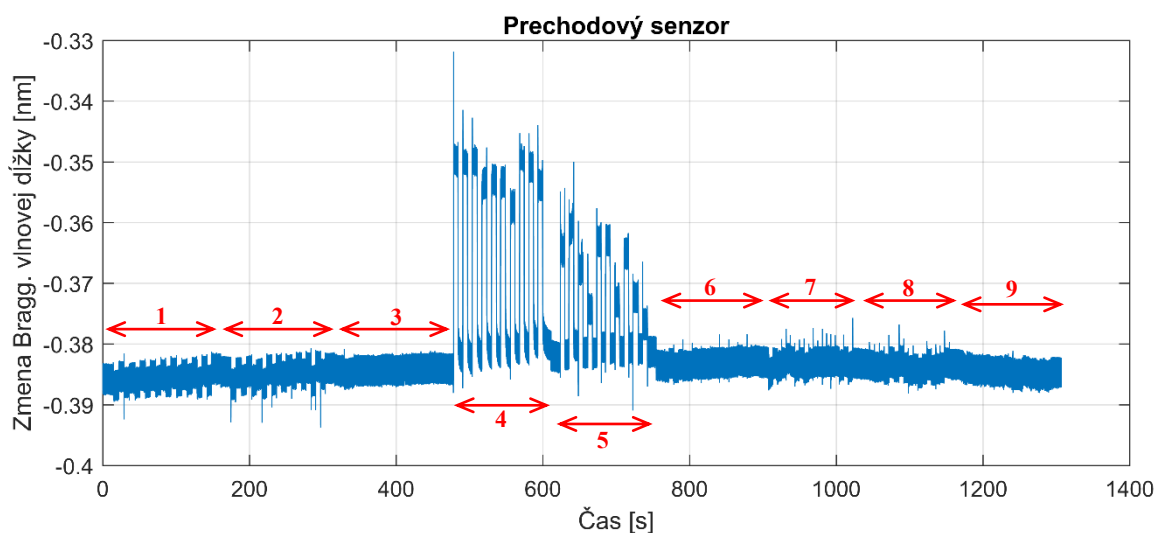
4.3 Meranie zaťažovaním na PMD podložke

Po otestovaní teplotnej závislosti som chcel vyskúšať reakciu senzorov na vzniknutý tlak a ich citlivosť, keďže mali byť použité na zaznamenanie prechodov po schodoch a určenie smeru prechodov. Preto som senzory pripevnil na PMD podložku, čo je hrubšia gumová podložka a prikryl som ju podložkou s rovnakým rozmerom, ktorú som si rozdelil na 9 rovnakých častí s rozmerom 20x20 cm. Tieto časti som zaťažoval približne 10 kg závažím desaťkrát po sebe v päť sekundových intervaloch. Takže som na päť sekúnd dané miesto zaťažil a potom na päť sekúnd nechal miesto bez zaťaženia. Toto som opakoval 10 krát pre jedno miesto a následne som prešiel na druhé a tak ďalej až kým som nevykonal zaťažovanie pre všetky časti. Náčrt rozdelenia PMD podložky a umiestnenia sklolaminátových senzorov je na obrázku 4.3. Môžeme vidieť, že červenou farbou sú znázornené Braggove mriežky umiestnené v sklolaminátových puzdrách, ktoré sú pripojené na FBGuard, pomocou ktorého som meral zmenu Braggovej vlnovej dĺžky.



Obrázok 4.3: Znáznornenie umiestnenia mriežok pri meraní na PMD podložke

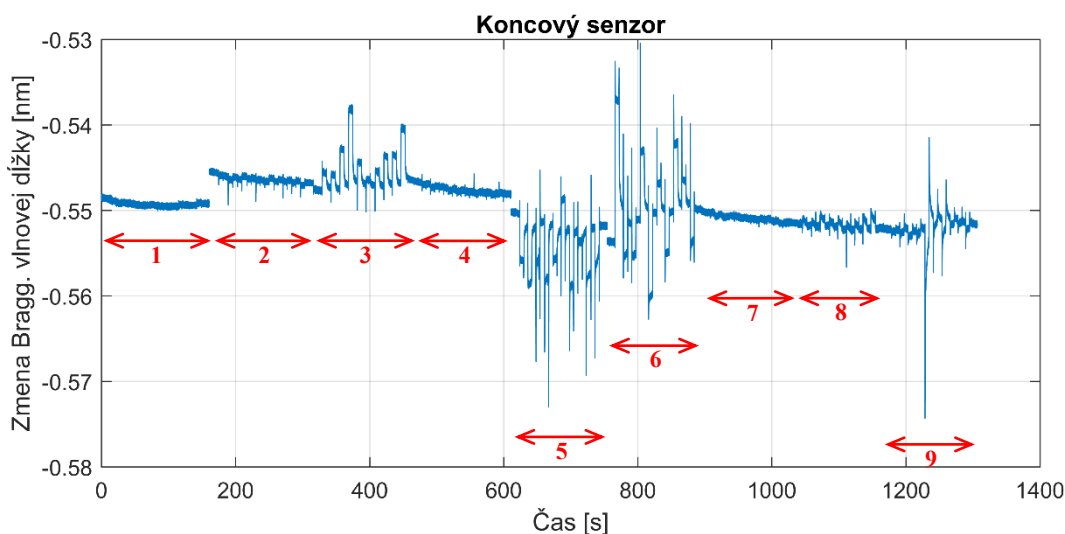
Namerané hodnoty Braggovej vlnovej dĺžky spolu so znázorneným priradením k zaťažovanej oblasti z obrázku 4.3 môžeme vidieť na obrázkoch 4.4 a 4.5. Na obrázku 4.4 sú hodnoty z prechodového sklolaminátového senzoru a môžeme pozorovať, že najvýraznejšie namerané hodnoty sú z meraných miest 4 a 5, medzi ktorými bol umiestnený senzor. Viditeľnú zmenu vlnovej dĺžky vidíme aj pri zaťažovaní miest 1 a 2, kde môžeme pozorovať ešte jasné striedanie kedy bola podložka zaťažená a kedy podložka zaťažená nebola. Pri zaťažovaní miest 7, 8 môžeme pozorovať ešte drobné zmeny vlnovej dĺžky, minimálne zmeny sú na tlakovom mieste s číslom 6 no na tlakových miestach 3 a 9 nevidno žiadne viditeľné zmeny Braggovej vlnovej dĺžky.



Obrázok 4.4: Zmena Braggovej vlnovej dĺžky prechodového senzoru v závislosti na zaťažovaní PMD podložky

Pri koncovom sklolaminátovom senzore môžeme logicky opäť vidieť najvýraznejšie zmeny Braggovej vlnovej dĺžky na zaťažovaných miestach 5 a 6, medzi ktorými bol senzor umiestnený. Ďalšie viditeľné, no už menej výrazné zmeny nastali pri zaťažovaní miest 3 a 9. Na tlakovom mieste 8 je zmena Braggovej vlnovej dĺžky dosť výrazná no na mieste 2 už je iba náznak zmien vlnovej

dĺžky. Opäť najmenšie alebo takmer nulové zmeny vlnovej dĺžky sú na miestach najďalej od umiestnenia sklolaminátového senzoru, teda na miestach 1, 4 a 7.



Obrázok 4.5: Zmena Braggovej vlnovej dĺžky koncového senzoru v závislosti na zaťažovaní PMD podložky

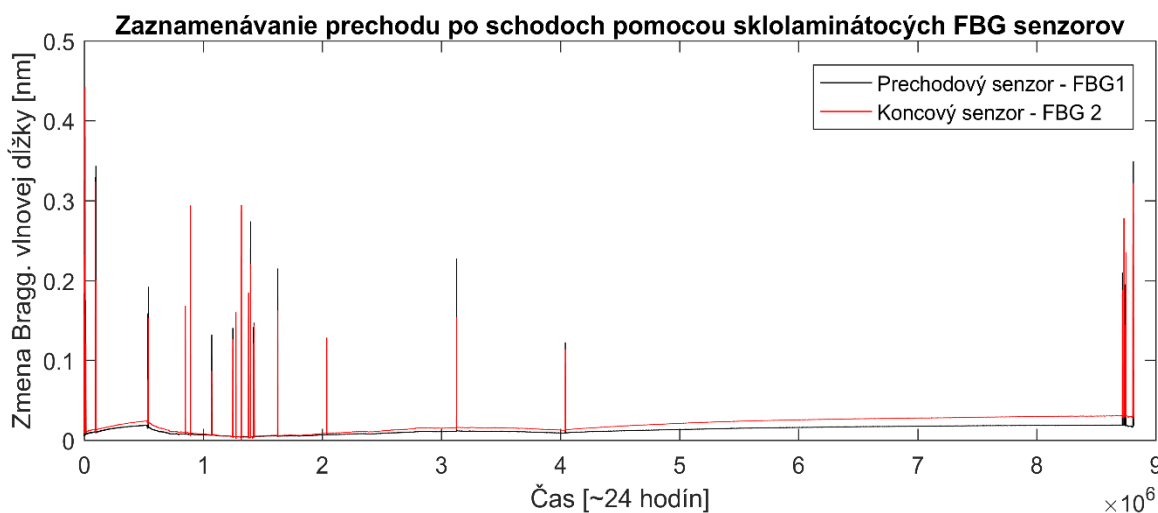
V porovnaní koncového senzoru, ktorý má spolu 8 vrstiev, s prechodovým sensorom, ktorý má 4 vrstvy, je priebeh najvýraznejších zmien vlnovej dĺžky horšie čitateľný pri koncovom senzore čo mohlo byť zapríčinené práve väčším počtom vrstiev sklolaminátu. Z priebehov pre oba senzory môžeme povedať, že zaťažovanie najvzdialenejších miest od senzoru vyvolalo len minimálnu alebo žiadnu zmenu vlnovej dĺžky čo nie je viditeľné. Pre prechodový senzor sú to miesta 3, 6 a 9 a pre koncový senzor sú to miesta 1, 4 a 7.

4.4 Meranie prechodu po schodoch

Po overení, že moje sériovo zapojené sklolaminátové FBG senzory sú schopné zaznamenať tlakové záťaže vo svojom okolí, rozhodli sme sa s vedúcim práce, že ich upevníme na drevené schody a tak skúsime zaznamenávať prechod ľudí po týchto schodoch. Na obrázku 4.6 môžeme vidieť spomínané schodisko, na ktorom bolo meranie uskutočnené. Prechodový sklolaminátový FBG senzor (FBG 1), sa umiestnil zosponu na druhý schod čo je znázornené čiernou farbou a koncový sklolaminátový FBG senzor (FBG 2) sa umiestnil zosponu na tretí schod, ktorý je znázornený na červeno. Po umiestnení senzorov na schody a zapojení na FBGuard sa po schodisku vykonali testovacie prechody ako na začiatku tak aj na konci merania, ktoré trvalo približne 24 hodín. Na poschodí by malo pracovať asi 5 ľudí, preto by sme mali minimálne namerať naše testovacie prechody a ich príchod a odchod z práce. Vždy keď bolo meranie spustené a ukončené sa v kancelárii nikto nenachádzal. Priebeh zmeny Braggovej vlnovej dĺžky z obidvoch FBG senzorov počas merania môžeme pozorovať na obrázku 4.7. Môžeme vidieť, že ako náhle niekto prešiel po schodoch, zmena vlnovej dĺžky je veľmi dobre viditeľná. Môžeme si všimnúť, že na začiatku a na konci merania je zmena Braggovej vlnovej dĺžky veľmi častá, čo je zapríčinené, ako už bolo vyššie spomenuté, našimi testovacími prechodmi po schodoch.



Obrázok 4.6: Schodisko kde boli umiestnené sklolaminátové FBG senzory



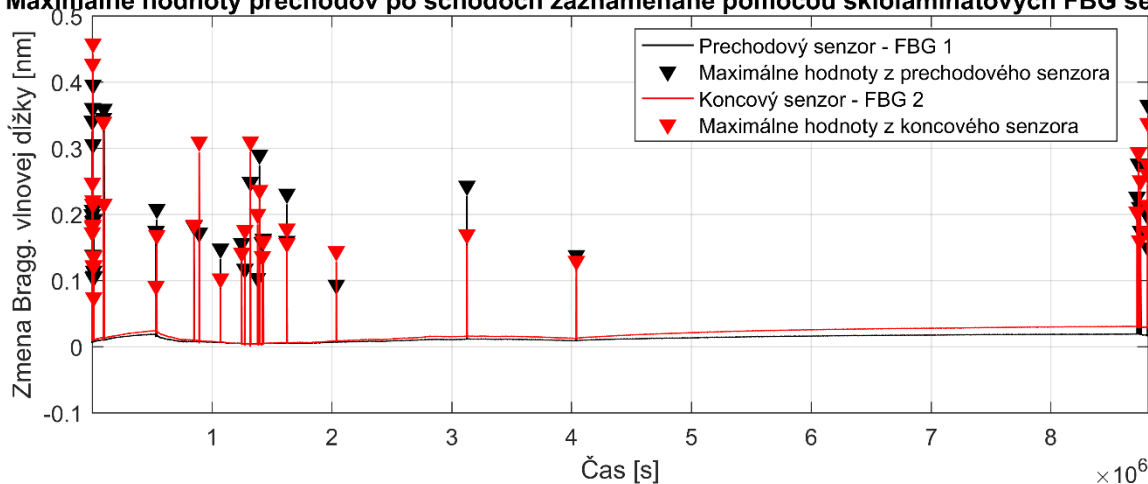
Obrázok 4.7: Zaznamenávanie prechodu po schodoch v ~24 hodinách

Keďže je zmena Braggových vlnových dĺžok zaznamenávaná pre obidva senzory v rovnakom čase, môžeme teda určiť či bol prechod po schodoch vykonaný smerom hore alebo dole. Musíme si však byť istý aby bolo pri prechode stupené na obidva schody, na ktorých sú umiestnené sklolaminátové FBG senzory. Ak je táto podmienka splnená, stačí nám už len určiť maximá pre jednotlivé zmeny vlnových dĺžok a ich priradené časové hodnoty. Maximálne hodnoty pre senzory musíme určiť tak, aby počet hodnôt bol pre každý senzor rovnaký. Ja som získaval maximálne hodnoty a ich priradené časové hodnoty v programe Matlab pomocou nasledujúceho príkazu:

```
[max,time]=findpeaks(S1_avg,'MinPeakDistance',500,'MinPeakHeight',0.05)
```

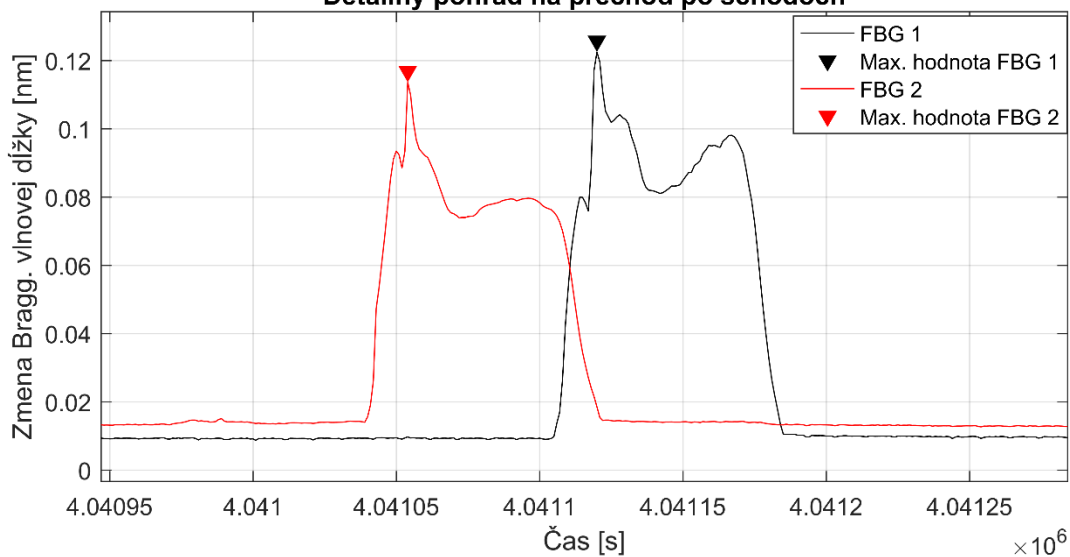
V príkaze môžeme vidieť, že sa mi vytvárajú dve polia *max* a *time*, kde do pola *max* sa ukladajú maximálne hodnoty vlnových dĺžok a do pola *time* sa ukladajú im priradené časové hodnoty z premennej *SI_avg*, čo sú namerané hodnoty vlnovej dĺžky pre prechodový senzor. Následne nastavíme minimálnu vzdialenosť medzi maximálnymi hodnotami a ich minimálnu výšku. Minimálna výška je dôležité správne nastaviť aby nám neurčovalo ako maximálne hodnoty šum. Namerané maximálne hodnoty z môjho merania môžeme vidieť na obrázku 4.8 a detailný pohľad na jeden zaznamenaný prechod sa nachádza na obrázku 4.9. z obrázku vidíme, prechod bol v smere z hora nadol, keďže prvá hodnota je z koncového FBG senzora. Z detailu vidíme ako sa mení zaťaženie na daný schod. Kde prvotné šliapnutie na schod je s najväčším zaťažením, ktoré sa zmenší so šliapnutím na spodnejší schod, kde bol senzor FBG 1. Nakoniec zaťaženie na schod zanikne, keďže už prešľapujeme nohou na ďalší schod.

Maximálne hodnoty prechodov po schodoch zaznamenané pomocou sklolaminátových FBG senzorov



Obrázok 4.8: Maximálne hodnoty získané pomocou sklolaminátových FBG senzorov z ~ 24 hodinového merania

Detailný pohľad na prechod po schodoch



Obrázok 4.9: Detailný pohľad na zaznamenaný prechod po schodoch

Po získaní časových hodnôt v poli *time* pre každý FBG senzor som si vytvoril jednoduchý kód na prechádzanie polom a porovnávanie jednotlivých hodnôt aby som zistil či bol prechod po schodisku vykonaný smerom nahor alebo nadol.

```
L = length(time);  
i = 1; h = 0; d = 0;  
while i ~= (L + 1)  
    if time(i) < time1(i)  
        h = h + 1;  
        disp('Prechod smerom hore');  
    elseif time1(i) < time(i)  
        d = d + 1;  
        disp('Prechod smerom dole');  
    else  
        disp('Stupili ste na schod v rovnakom čase');  
    end  
    i = i+1;  
end
```

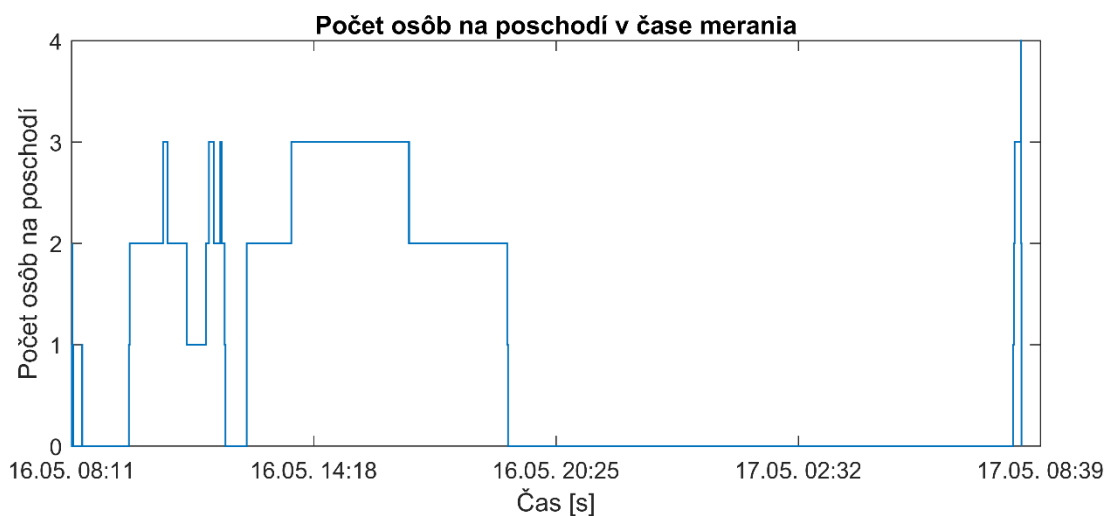
Na začiatku kódu som si určil veľkosť pola L a definoval premenné. Tým, že na rozdiel od programovacích jazykov pole v Matlabe začína s indexom 1 a nie 0, som definoval premennú i s hodnotou 1. Nasleduje cyklus, v ktorom sa opakuje porovnávanie jednotlivých hodnôt. Aby som porovnal všetky hodnoty v poli a teda aj poslednú, cyklus sa bude vykonávať kým index pola nebude mať hodnotu väčšiu ako veľkosť pola.

Ako už bolo na začiatku spomenuté, na začiatku a na konci merania sme vykonali testovacie prechody po schodoch. Smer týchto prechodov môžeme vidieť v tabuľke 4.2 vľavo. Ako si môžeme všimnúť testovali sme aj to či senzor zaznamená prechod po schode, ak sa vykoná po kraji a nie po strede schodu. Smer prechodov zo zaznamenaných a spracovaných dát z celého merania nájdeme v tabuľke 4.2 vpravo. Grafické znázornenie počtu osôb, ktoré sa nachádzali na poschodí nájdeme na obrázku 4.10.

Smer prechodu		Číslo prechodu	Smer prechodu	Číslo prechodu	Smer prechodu
Začiatok merania	Koniec merania	1	Hore	21	Hore
Hore	Hore	2	Dole	22	Dole
Dole	Hore	3	Hore	23	Hore
Hore	Hore	4	Dole	24	Dole
Dole	Hore	5	Hore	25	Dole
Hore	Dole	6	Hore	26	Dole
Hore	Dole	7	Dole	27	Hore
Dole	Dole	8	Dole	28	Hore
Dole	Dole	9	Hore	29	Hore
Hore vpravo		10	Dole	30	Dole
Dole vpravo		11	Hore	31	Dole
Hore vľavo		12	Dole	32	Dole
Dole vľavo		13	Hore	33	Hore
		14	Dole	34	Hore
		15	Hore	35	Hore
		16	Hore	36	Hore
		17	Hore	37	Dole
		18	Dole	38	Dole
		19	Dole	39	Dole
		20	Hore	40	Dole

Tabuľka 4.2: *Vľavo: Testovacie prechody, vpravo: namerané prechody*

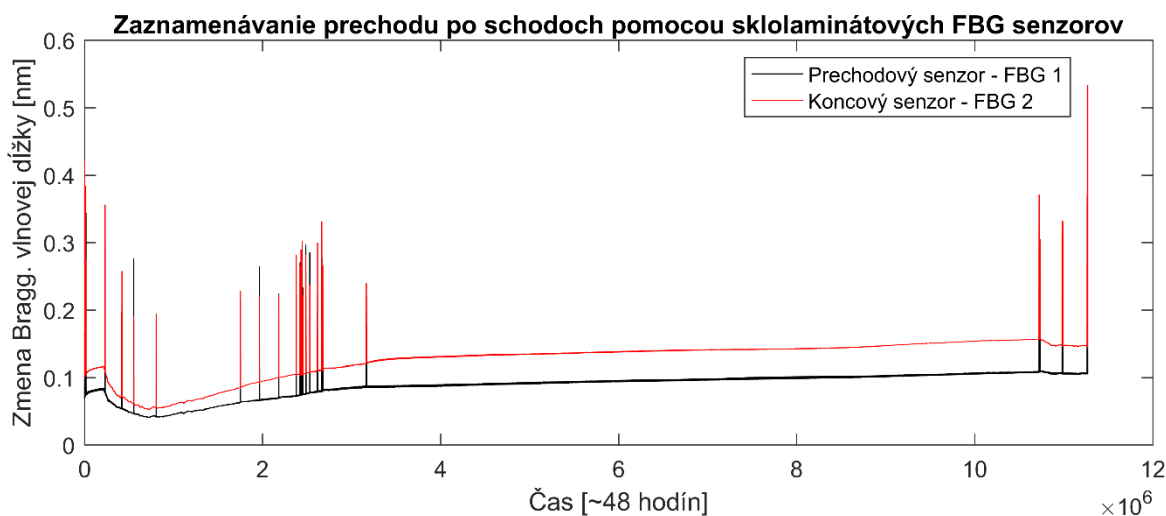
Môžeme si všimnúť, že začiatok a koniec nameraných dát sa zhoduje s našimi testovacími prechodmi, dokonca aj s tými ktoré sme vykonali po stranách schodov. Môžem teda povedať, že sklolaminátové FBG senzory sú citlivé na prechody po daných schodoch a nezáleží či je to prechod po strane schodov alebo po strede chodov.



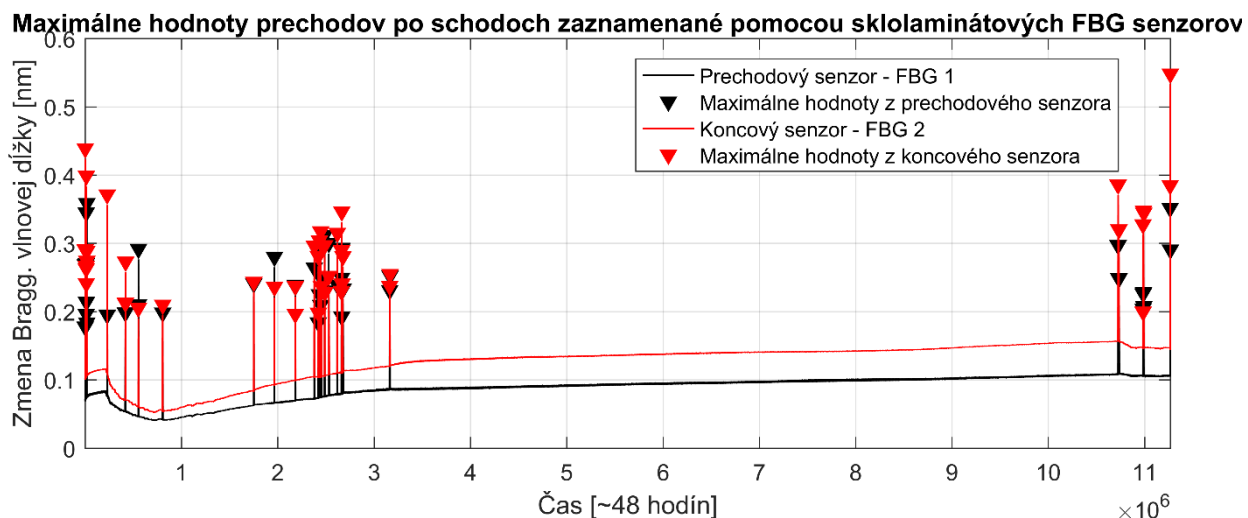
Obrázok 4.10: *Znázornenie počtu osôb nachádzajúcich sa na poschodí*

Po ukončení 24 hodinového merania sme senzory nechali pripevnené tak ako boli a spustili sme zaznamenávanie dát. Tento krát sme nerobili žiadne testovacie prechody, ale spoliehali sme sa na prechody ľudí, ktorý na poschodí pracujú. Dáta sa zaznamenávali približne 48 hodín. Zaznamenané dáta môžeme vidieť na obrázku 4.11 a maximá týchto dát sú na obrázku 4.12.

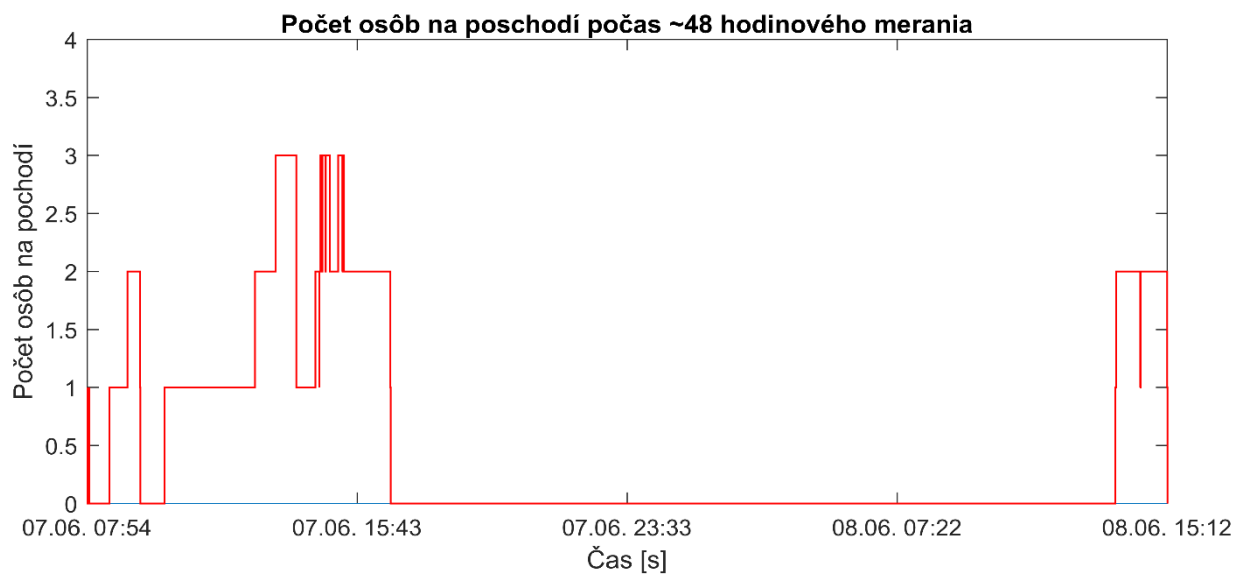
Pri tomto meraní mi vyšiel počet prechodov 42 a teda 21 prechodov smerom nahor a 21 prechodov smerom nadol. Graficky tieto prechody môžeme vidieť na obrázku 4.13. Môžem si všimnúť, že oproti prvému meraniu sa šum pre koncový senzor zvýšil. Preto je veľmi dôležité nastaviť pri určovaní maxim minimálnu hodnotu maxima, aby sa nestalo, že ako maximum určí práve túto hodnotu šumu, ktorá je pre daný okamih maximum avšak pre naše meranie nie.



Obrázok 4.11: Zaznamenávanie prechodu po schodoch v ~ 48 hodinách



Obrázok 4.12: Maximálne hodnoty získané pomocou sklolaminátových FBG senzorov z ~ 48 hodinového merania

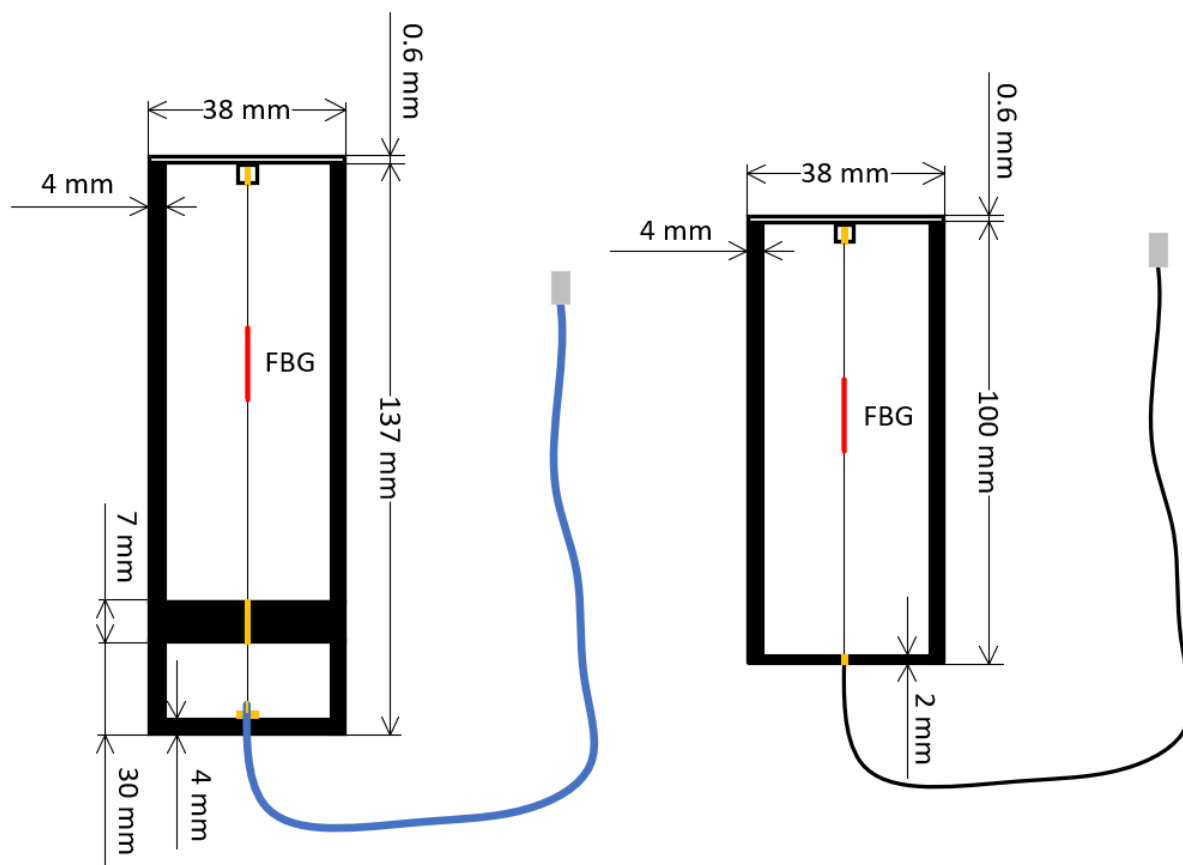


Obrázok 4.13: Znáznornenie počtu ľudí na poschodí počas ~48 hodinového merania

5 Návrh a realizácia tlakového FBG senzoru pomocou 3D tlačiarne

5.1 Návrh a výroba senzora

Aby som mohol úspešne zmerať tlak pomocou Braggovej optickej mriežky a teda pomocou optického vlákna, musím zaistiť aby mi meraný tlak buď optické vlákno naťahoval silou akou tlak pôsobí alebo naopak silou natiahnuté vlákno mi musí uvoľňovať, čím sa zmenší sila v závislosti na pôsobiacom tlaku, ktorá pôsobí na natiahnutie vlákna. Keďže sme sa s vedúcim práce snažili pri návrhu vytvoriť senzor, ktorý by bol z dostupného materiálu a konštrukčne jednoduchý rozhodli sme sa pre druhú variantu merania tlaku a to, že natiahneme vlákno a pôsobiaci tlak na meraciu membránu bude silu natiahnutia znižovať. Puzdro, v ktorom bude natiahnuté vlákno a membránu, na ktorú bude pôsobiť tlak som si navrhol a nechal vytlačiť na 3D tlačiarňi. Náčrt tlakového senzoru môžeme vidieť a obrázku 5.1, kde na pravej strane sa nachádza prvá verzia a na ľavej strane sa nachádza finálna verzia, s ktorou bolo meranie uskutočnené. Hlavný nedostatok prvej verzie je vysvetlený nižšie.



Obrázok 5.1: Náčrt tlakového senzoru: vpravo je prvá verzia a vľavo je finálna verzia

Na obrázku 5.1 si môžeme všimnúť, že na membráne je malý výstupok vysoký 4 mm, s vonkajším priemerom 5 mm, v ktorom je malá dierka s priemerom 2 mm, do ktorej som vložil vlákno a zalial ho dvojzložkovým lepidlom. Po vytvrdnutí lepidla som vlákno prevliekol cez dierku

na spodnej strane plastového puzdra, prilepil som membránu k puzdru a po vytvrdnutí lepidla som vlákno natiahol a zafixoval tak aby vlnová dĺžka bola oproti pôvodnej hodnote značne posunutá a naniesol som lepidlo do dierky čím som chcel zafixovať natiahnutie v puzdre. V prvej verzii návrhu tlakového senzora som po vytvrdnutí lepidla, uvoľnení fixácie vlákna a napojení senzora na FBGuard zistil, že lepidlo, ktorým som sa snažil zafixovať vlákno k puzdru jemne pruží. Toto pruženie spôsobilo to, že posun Braggovej vlnovej dĺžky, ktorý som spravil sa takmer vynuloval. Keďže však to isté lepidlo bolo použité na fixáciu vlákna k membráne a tam vlákno nepružilo, rozhodol som sa navrhnuť ďalšie puzdro tak aby som mohol lepidlo na uchytenie vlákna použiť na väčšej ploche. Preto malo ďalšie puzdro hrubšie dno, čo mi dovolilo dostatočnú fixáciu vlákna. Ako ochranu pred prípadným poškodením vlákna a v snahe zabrániť zmene Braggovej vlnovej dĺžky pri manipulácii s vláknom, som pripevnil na dno tlakového senzoru ďalšie dno s výškou 3 cm, čo môžeme vidieť na obrázku 5.1, alebo na obrázku 5.2 je toto dno zelenej farby. Vlákno som následne vložil do sekundárnej ochrany, ktorú som k vláknu prilepil a následne som ešte vlákno vložil do polyuretánovej trubičky modrej farby, ku ktorej som vlákno opäť prilepil, čo je znázornené na obrázku 5.2. Nakoniec som prizváral pigtail a zvar vložil do ďalšej ochrannej polyuretánovej trubičky. Hotový tlakový FBG senzor môžeme vidieť na obrázku 5.2. Hodnoty Braggovej vlnovej dĺžky pred natiahnutím, po natiahnutí a vyschnutí lepidla (fixácií) a po dokončení nájdeme v tabuľke 5.1. Neskôr pri meraní tlaku, ktoré bolo o deň neskôr sa dozvieme, že toto natiahnutie, sa aj napriek snahe zabrániť zmenšeniu, aj tak zmenšilo.



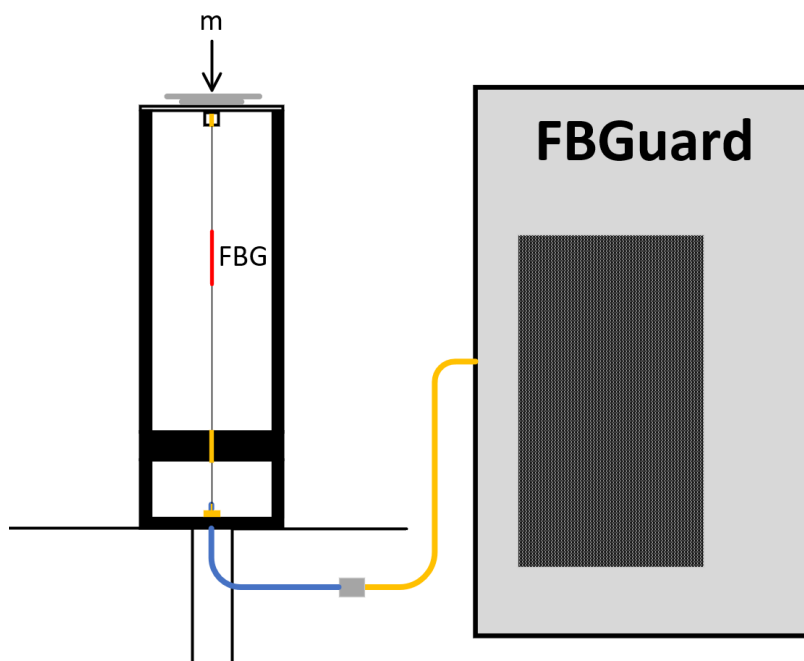
Obrázok 5.2: *Môj tlakový FBG senzor*

	Bragg. vlnová dĺžka [nm]	Posun [nm]
Pred natiahnutím	1543.847	0
Po natiahnutí	1544.876	1.029
Výsledný	1544.571	0.724

Tabuľka 5.1: *Prehľad meniacej sa Braggovej vlnovej dĺžky tlakového senzora*

5.2 Meranie zaťažovaním

Keď som už mal vyrobený senzor, stačilo už len otestovať jeho funkčnosť. Keďže sme nepoznali citlivosť, ako prvé sme sa rozhodli zaťažovať membránu postupne váhami od 8 gramov až po 223 gramov. Aby sme zaťažovali membránu stále s rovnakou plochou, ako podstavec pod závažia sme použili kovovú podložku, na ktorú sme umiestňovali závažia. FBG senzor sme pripojili na FBGuard a začali sme zaťažovať membránu umiestňovaním skrutiek a matiek na podložku. Schému merania môžeme vidieť na obrázku 5.3, kde sme senzor umiestnili kolmo na okraje dvoch stolov aby sme predišli poškodeniu optického vlákna veľkým ohybom.

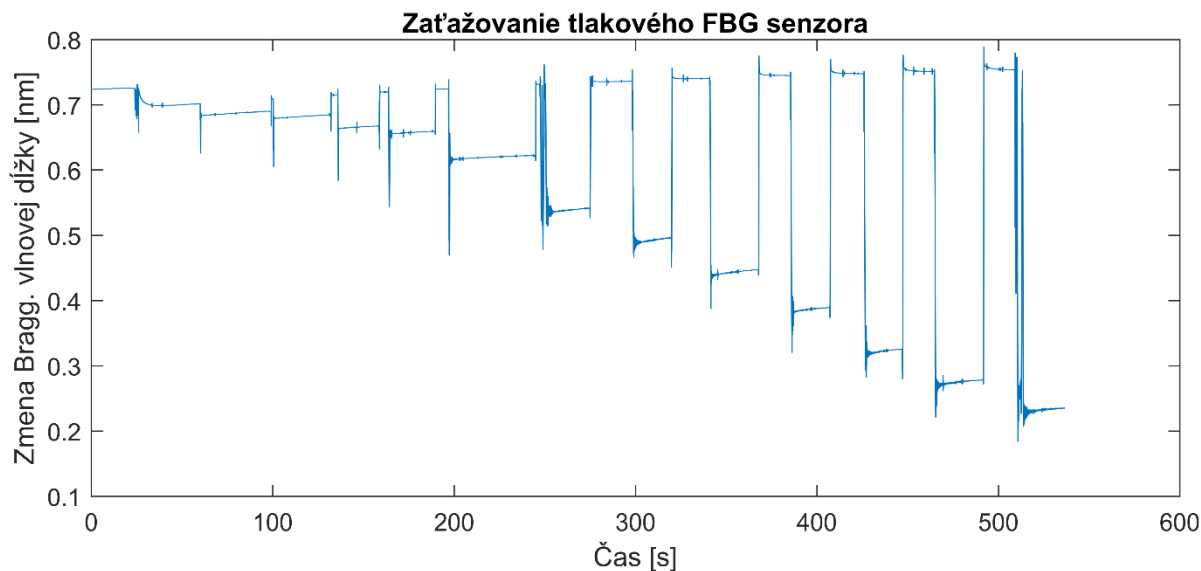


Obrázok 5.3: *Schéma zaťažovania tlakového FBG senzora*

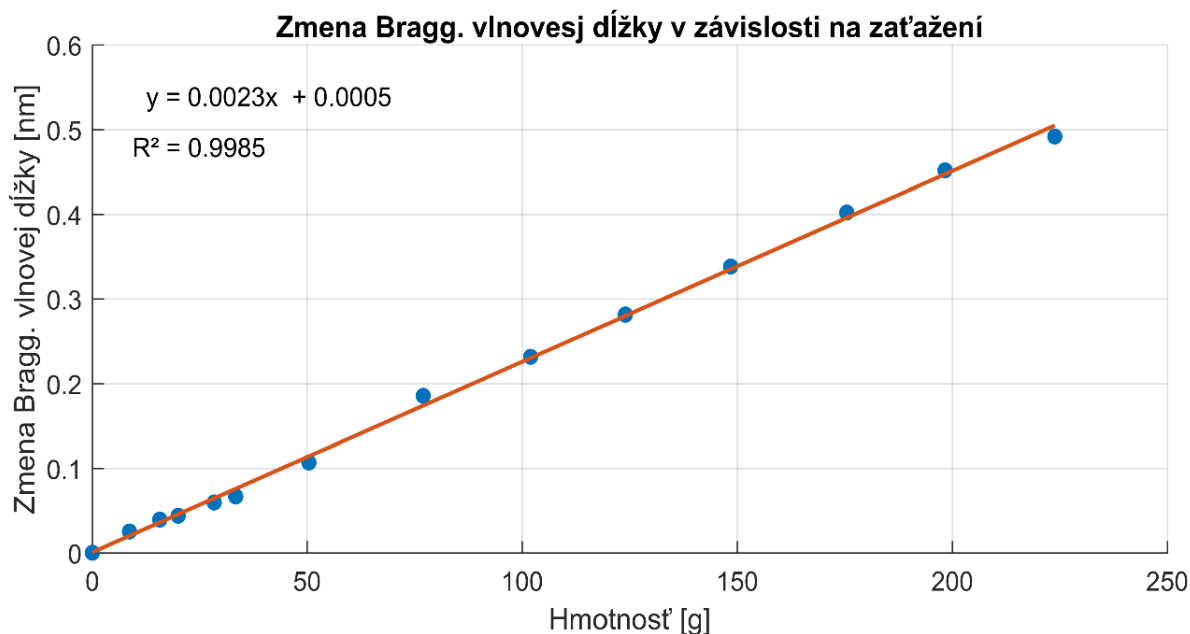
Priebeh zmeny Braggovej vlnovej dĺžky je na obrázku 5.4 a 5.5. Môžeme vidieť, že zaťažovanie prebiehalo tak, že sme začali s nezaťaženou membránou, následne sme ju zaťažili počkali kým sa zmena Braggovej vlnovej dĺžky ustáli a následne sme vymenili závažie.

Na obrázku 5.4 môžeme pozorovať, že po zaťažení membrány má Braggova vlnová dĺžka jemne stúpavý priebeh. Preto som pre vytvorenie grafu 5.5 použil hodnoty, ktoré nastali 5 sekúnd po približnom ustálení Braggovej vlnovej dĺžky pri zaťažení. V grafe 5.5 vidíme, že hodnoty začínajú od 0, to preto, lebo som posun Braggovej vlnovej dĺžky upravil tak, že počiatočnú Braggovu vlnovú dĺžku som pri meraní zvolil ako 0 a následné zmeny Braggovej vlnovej dĺžky pri zaťažení som zvolil

ako hodnoty posunu. Z rovnice v obrázku 5.5 potom dostaneme, že citlivosť tlakového senzora na zaťaženie je 2.3 pm/g. Výsledný priebeh zmien Braggovej vlnovej dĺžky v závislosti na zaťažení je takmer lineárny, čo len potvrdzuje linearitu Braggových mriežok.



Obrázok 5.4: Priebeh zmeny Braggovej vlnovej dĺžky pri zaťažovaní



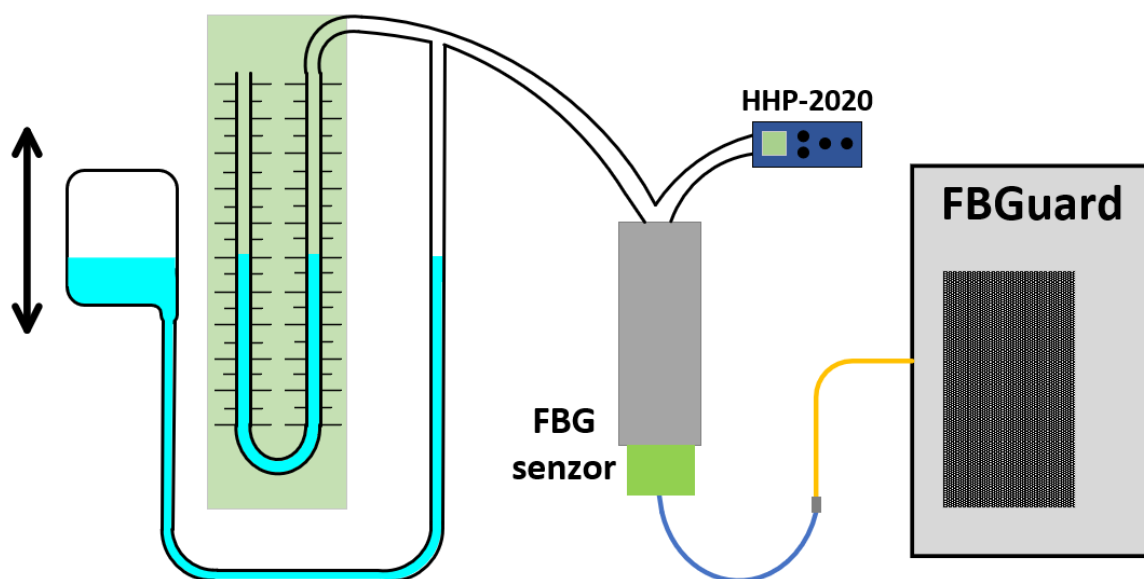
Obrázok 5.5: Priebeh posunu Braggovej vlnovej dĺžky v závislosti na zaťažovaní

5.3 Meranie tlaku

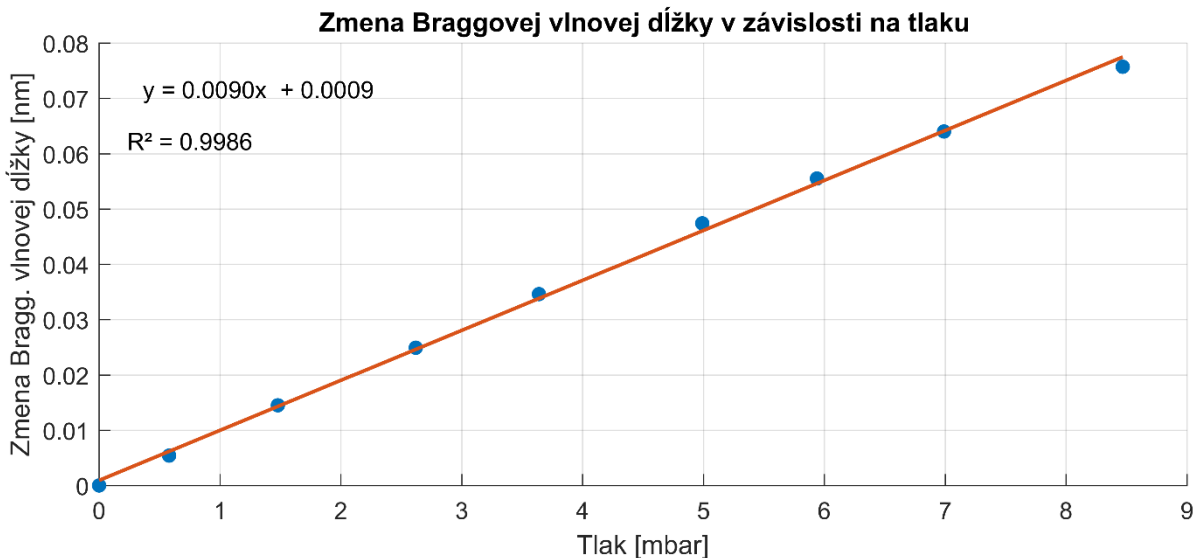
Po úspešnom otestovaní tlakového FBG senzora, bolo potrebné otestovať senzor na tlak, ktorý bude stály a zároveň bude meraný manometrom. Keďže sme nemali vhodné prostriedky ani prístroje na takúto meranie, požiadali sme o pomoc profesora Dudáčka, z fakulty bezpečnostného inžinierstva.

Ten nám vytvoril zapojenie na meranie tlaku s nástavcom na môj FBG senzor. Ako nástavec použil plastovú rúru, kde z jednej strany boli len otvory pre prívod a vývod vzduchu a z druhej strany bol otvor s tesnením na vloženie tlakového FBG senzoru. Táto rúra bola pripojená pomocou trubičky k manometru OMEGA HHP-2020, odtiaľ opäť pomocou trubičky na stĺpcový milimetrový merač tlaku a bandasku s vodou. Tú som na začiatku položil tak aby bola hladina vody v jednej rovine so stĺpcovým milimetrovým tlakomerom a s vodou v hadičke čo viedla od bandasky. Toto východzie nastavenie môžeme vidieť na obrázku 5.6. Ako bolo spomenuté vyššie, posun Braggovej mriežky sa opäť zmenšil, čo bolo pravdepodobne spôsobené jemným pružením lepidla. Na začiatku merania bol tento posun 0.430 nm a teda Braggova vlnová dĺžka bola 1544.277 nm.

Po nastavení hladiny, sme prešli ku kalibrácii senzora. Tá prebiehala tak, že som bandasku s vodou postupne zdvíhal do bodu, kedy hladina vody v hadičke bola kúsok od spoja s ostatnými hadičkami. Po každom zodvihnutí bandasky sme počkali, kým sa hodnota na manometri ustáli a následne sme ju odpísali. Namerané hodnoty tlaku z manometra a posun vlnovej dĺžky k týmto hodnotám tlaku namerané pomocou FBGuardu sú na obrázku 5.7. Z rovnice v grafe si môžeme všimnúť, že koeficient pre FBG vyšiel 9 pm/mbar. Túto hodnotu som následne použil pri vypočítaní nameraného tlaku pomocou FBG senzoru.



Obrázok 5.6: Schéma východzieho nastavenia pre meranie tlaku



Obrázok 5.7: Kalibrácia tlakového FBG senzora

Po kalibrácii senzora, sme začali s meraním, pri ktorom sme merali zvyšujúci a následne znižujúci sa tlak. Na začiatku sme opäť sústavu nastavili do východzieho nastavenia z obrázku 5.6 a začal som pohybovať bandaskou smerom nahor. Ako pri kalibrácii tak aj teraz som postupoval tak, že som ju o kúsok zodvihol, počkali sme kým sa ustáli tlak, odpísali sme hodnoty z manometru a tentokrát už aj čo najpresnejší rozdiel z milimetrového tlakomeru. Následne som bandasku zase o kúsok zodvihol Keď som dosiahol maximum aké sme mohli merať, čiže aby sa voda nepreliala do manometra, rovnakým spôsobom som postupoval s bandaskou smerom dole. Tento celý postup merania som zaznamenával pomocou FBGuardu, ktorý bol pripojený na tlakový FBG senzor. Namerané hodnoty z manometru, FBG senzoru a z milimetrového tlakomeru môžeme vidieť v tabuľke 5.2 a graficky na obrázku 5.8. V tabuľke 5.2 môžeme vidieť aj prepočet rozdielu milimetrov z milimetrového tlakomeru na milibary, ktorý som robil podľa rovnice prepočtu 5.1:

$$1 \text{ mm} = 0.0098 \text{ mbar}. \quad (5.1)$$

Ďalej si môžeme všimnúť vypočítaný tlak nameraný pomocou FBG tlakového senzoru. Tento tlak som vypočítal pomocou rovnice 5.2:

$$p_{\text{FBG}} = \frac{\Delta\lambda_B}{kp} \cdot 1000 + p, \quad (5.2)$$

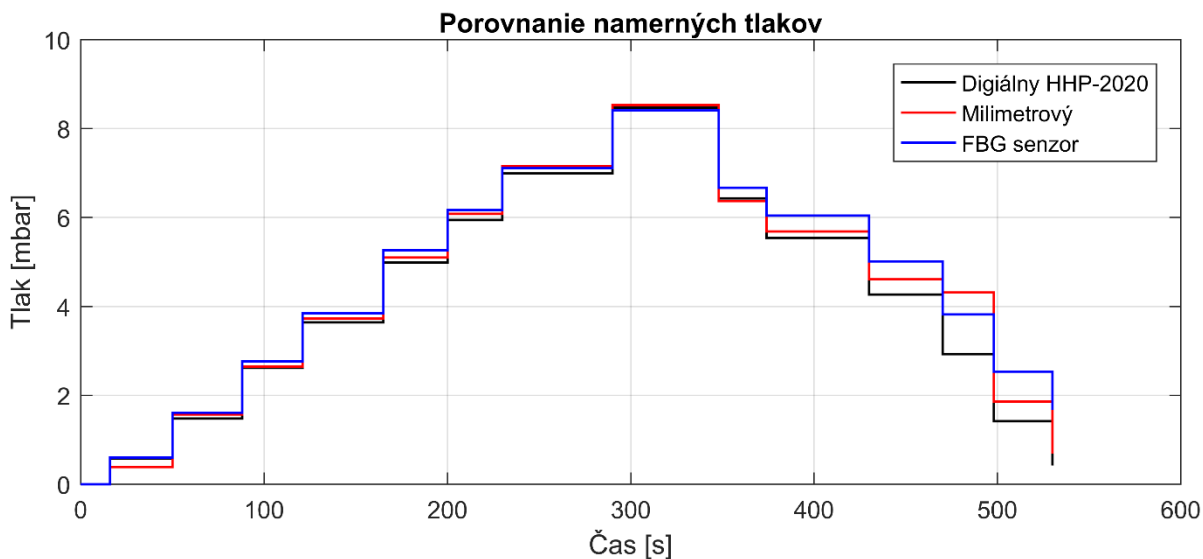
kde p_{FBG} je vypočítaný tlak FBG senzoru, $\Delta\lambda_B$ je rozdiel počiatkovej Braggovej vlnovej dĺžky od nameranej Braggovej dĺžky, kp je koeficient a p je počiatkový nameraný tlak. Keďže sme začínali s tlakom 0 mbar môžeme túto rovnicu upraviť na tvar 5.3:

$$p_{\text{FBG}} = \frac{\Delta\lambda_B}{kp} \cdot 1000. \quad (5.3)$$

Na záver som vypočítal hodnoty absolútnej a relatívnej chyby merania podľa rovníc 3.3 a 3.4. Ako nameranú hodnotu som pri počítaní použil hodnoty z manometra, keďže z použitých prístrojov bol najpresnejší.

Digitálny [mbar]	Milimetrový [mm]	Milimetrový [mbar]	$\Delta\lambda$ [nm]	p_{FBG} [mbar]	Absol. chyba [mbar]	Relat. chyba [%]
0	0	0	0	0	0	0
0.58	4	0.392	0.005	0.600	0.020	3.448
1.48	16	1.569	0.015	1.611	0.131	8.859
2.62	27	2.648	0.025	2.767	0.147	5.598
3.64	38	3.727	0.035	3.844	0.204	5.617
4.99	52	5.099	0.047	5.267	0.277	5.544
5.94	62	6.080	0.056	6.167	0.227	3.816
6.99	73	7.159	0.064	7.111	0.121	1.733
8.47	87	8.532	0.076	8.411	-0.059	-0.695
6.43	65	6.374	0.060	6.667	0.237	3.681
5.54	58	5.688	0.054	6.044	0.504	9.105
4.27	47	4.609	0.045	5.011	0.741	17.356
2.93	44	4.315	0.034	3.822	0.892	30.451
1.42	19	1.863	0.023	2.533	1.113	78.404
0.42	7	0.686	0.015	1.678	1.258	299.471
-0.36	0	0.000	0.009	1.044	1.404	-390.123
-1.47	-10	-0.981	0.002	0.167	1.637	-111.338
-2.27	-18	-1.765	-0.004	-0.422	1.848	-81.400

Tabuľka 5.2: Tabuľka nameraných a vypočítaných hodnôt z tlakového merania



Obrázok 5.8: Namerané hodnoty pomocou digitálneho, milimetrového a FBG tlakomeru

Z obrázku 5.8 vidíme, že pri zvyšovaní tlaku sa hodnoty všetkých troch tlakomerov približne zhodujú rovnako aj pri najvyššom meraní tlaku. Priemerná absolútna chyba pri zvyšovaní tlaku vrátane najvyššej hodnoty je 0.132 mbar. No pri klesaní tlaku z maximálnej hodnoty na minimálnu, sa začínajú hodnoty z FBG senzoru postupne viac a viac líšiť oproti ostatným hodnotám. No najmä oproti digitálnemu manometru, čo môžeme vidieť aj v tabuľke 5.2 pri absolútnej chybe a relatívnej chybe, že posledný meraný tlak má najvyššiu chybu. Priemerná relatívna chyba je v tomto prípade 0.507 mbar, vrátane hodnoty z najvyššieho nameraného tlaku.

6 Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo zoznámiť sa s možnosťami zapúzdrenia Braggových mriežok, aby som bol schopný zmerať rôzne fyzikálne veličiny. Následne po zoznámení sa s prevedeniami, ktoré sa bežne používajú alebo boli použité v nejakom experimentálnom vyhotovení, som si mal navrhnuť a zostrojiť vlastné senzory na meranie rôznych fyzikálnych veličín, s ktorými by boli následne vykonané kalibračné merania a následne podrobenie experimentálnym meraniam.

Preto môžem túto diplomovú prácu rozdeliť na dve hlavné časti. Prvú teoretickú, kde som splnil prvý bod zadania a druhú praktickú kde som splnil ostávajúce tri body zadania.

V prvej teoretickej časti sme sa dozvedeli čo to Braggove mriežky sú, na akom princípe dokážu merať fyzikálne veličiny a najmä ich výhody použitia oproti iným komerčným meracím prístrojom. V prvej časti druhej kapitoly sme sa dozvedeli, že pre dobrý teplotný senzor nie je dôležité len dobré teplovodivé puzdro ale najmä teplotne odolné optické vlákno. Následne sme sa dozvedeli informácie z experimentálnych meraní, ktoré boli užitočné najmä pri návrhu a výrobe môjho vlastného teplotného senzora. Druhá časť sa zaoberá deformačnými senzormi, ktoré sa používajú najmä v stavebníctve. Dozvedeli sme sa ich dôležitosť pri monitorovaní statických vlastností stavieb a v praktických ukážkach sme si potvrdili to, čo by malo podľa teórie platiť. Opäť aj tu platí, že prevedenie puzdra je veľmi dôležité aby sa pôsobiaca sila čo najlepšie preniesla na FBG senzor. Posledná časť druhej kapitoly sa zaoberá tlakovými FBG senzormi, ich princípom a praktickou ukážkou. Dozvieme sa, že tlak sa dá pomocou mriežky merať dvoma spôsobmi, kde sa vlákno môže vplyvom tlaku ťahať alebo už natiahnuté vlákno sa vplyvom tlaku uvoľňuje. Aby sme však mohli tlak úspešne merať musí byť optické vlákno dobre zafixované.

Ďalšia časť práce je praktická, kde som si navrhol a zostrojil rôzne FBG senzory na meranie fyzikálnych veličín. V tretej kapitole to bol teplotný FBG senzor, ktorý som po návrhu a zostrojení nakalibroval pomocou teplotnej trúby. V spracovaní nakalibrovaných dát môžeme pozorovať veľmi dobrú linearitu zmien Braggovej vlnovej dĺžky v závislosti na meniacej sa teplote. Po kalibrácii som vykonal testovacie 6-dňové meranie v miestnosti s ďalším teplotným senzorom. V spracovaných dátach môžeme pozorovať, že mnou vyrobený senzor reaguje na zmeny teploty a priebeh zmien má podobný priebeh ako komerčný teplotný senzor s pomerne malou priemernou chybou merania.

Štvrtá kapitola sa zaoberá návrhom a výrobou sklolaminátového FBG senzoru. Tento senzor mal za úlohu merať prechody po schodoch a určovať aj smer prechodu. Pri testovacích meraniach na PMD podložke vykazoval opakovane veľmi dobrú odozvu na zaťažovanie miest okolo senzoru. Vykonal som aj teplotné meranie, kde vykazovali sklolaminátové FBG senzory taktiež dobrú odozvu na meniacu sa teplotu. Po inštalácii na testovacie schodisko zaznamenal prechody ľudí so 100% úspešnosťou v rámci testovacieho merania aj v rámci normálneho merania a s rovnakou úspešnosťou zaznamenal aj smer prechodu, čo môžeme vidieť v spracovaných meraniach.

V poslednej kapitole sme videli návrh tlakového FBG senzoru, ktorého puzdro a membrána bola vyrobená pomocou 3D tlače. Dozvedeli sme sa, že som optické vlákno s Braggovou mriežkou natiahol a lepidlom zafixoval aby následný pôsobiaci tlak uvoľňoval napätie. Najskôr som spravil testovacie meranie zaťažovaním membrány malými váhami. Kde zo spracovaných dát vidíme veľmi dobrú linearitu meniacej sa Braggovej vlnovej dĺžky v závislosti na zaťažení. Veľmi dobrú linearitu

sme dosiahli z kalibračného merania, kde FBG senzor dokázal zachytiť zmenu veľmi nízkeho tlaku, ktorý sa pohyboval v jednotkách milibaru. Ako môžeme vidieť zo spracovaných dát, pri meraní si FBG senzor viedol dobre a pri zvyšujúcom tlaku má rovnaký priebeh ako ďalšie dva tlakomery. Pri znižovaní tlaku je odozva na znižujúci tlak dobrá avšak nastáva tu už mierna chyba merania.

Môžem teda zhodnotiť, že sa mi podarilo vyrobiť tri FBG senzory na meranie fyzikálnych veličín, kde každý reaguje na zmenu danej meranej veličiny.

Použitá literatura

- [1] KERSEY D. Alan. Fiber-Optic Sensing: Leveraging three decades of fiber Bragg grating sensing technology [online] [cit. 2018-11-14]. Dostupné online z: <https://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-54/issue-08/features/fiber-optic-sensing-leveraging-three-decades-of-fiber-bragg-grating-sensing-technology.html>
- [2] GRATAN K.T.V, SUN T. Fiber optic sensor technology: an overview: Sensors and Actuators Vol. 82 [online] [cit. 2018-11-14]. Dostupné online z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424799003684>
- [3] KASHYAP Raman, Fiber Bragg Gratings, London: Academic Press, 1999, 458 s. ISBN 0-12-400560-8
- [4] JANSSEN Dale. Fiber Bragg Grating (FBG) [online] [cit. 2018-11-14]. Dostupné online z: <https://www.fbgs.com/technology/fbg-principle/>
- [5] YOTSNA Rani Mahapatra, MANISHA Chattopadhyay. Spectral characteristic of uniform fiber bragg grating using couple mode theory [online] [cit. 2018-11-17]. Dostupné online z: http://www.iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/1-5-139024410740-44.pdf
- [6] TOSI Daniele. Review of Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG) Fiber-Optic Sensors and Their Applications [online] [cit. 2018-11-18]. Dostupné online z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/7/2147/pdf>
- [7] XIAN Lunlun. Study of a linearly chirped fiber bragg grating and its applications to the measurements of temperature and strain [online] [cit.2019-03-28]. Dostupné online z: https://shizuoka.repo.nii.ac.jp/?action=repository_action_common_download&item_id=7037&item_no=1&attribute_id=31&file_no=1
- [8] DONG Xiaoyi, ZHANG Hao, LIU Bo, MIAO Yinying. Tilted Fiber Bragg Gratings: Principle and Sensing Applications [online] [cit. 2018-11-23]. Dostupné online z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs13320-010-0016-x.pdf>
- [9] ZHAO Yong, WANG Qi, HUANG He. Characteristics and applications of tilted fiber Bragg gratings [online] [cit. 2018-11-23] Dostupné online z: <http://joam.inoe.ro/download.php?idu=2658>
- [10] LIBISH T.M. Design and Development of Fiber Grating Based Chemical and Bio-Sensors [online] [cit. 2018-12-06]. Dostupné online z: http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/71897/1/01_title.pdf
- [11] KASHYAP Raman, Fiber Bragg Gratings, Second Edition, London: Academic Press, 2010, 481 s. ISBN 978-0-12-372579-0
- [12] Fiber Bragg Grating Manufacturing Workstation [online] [cit. 2018-12-21]. Dostupné online z: <https://www.newport.com/f/fiber-bragg-grating-workstation>
- [13] COOK K., CANNING J., BANDYOPADHYAY S., LANCRY M., MARTELLI C., JIN T., CSIPKES A..Technologies for High Temperature Fibre Bragg Grating (FBG) Sensors [online]

- [cit. 2019-02-05]. Dostupné online z: <https://technicasa.com/technologies-high-temperature-fiber-bragg-grating-fbg-sensors/>
- [14] WERNECK M.M., REGINA C., ALLIL S.B., RIBEIRO A.B., DE NAZARE F.. Current Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings [online] [cit. 2019-02-05]. Dostupné online z: <https://www.intechopen.com/books/current-trends-in-short-and-long-period-fiber-gratings/a-guide-to-fiber-bragg-grating-sensors>
- [15] LINDNER Eric, CANNING John, CHOJETZKI Christoph, BRÜCKER Sven, BECKER Martin, ROTHHARDT Manfred, BARTELT Hartmunt. Thermal regenerated type IIa fiber Bragg gratings for ultra-high temperature operation [online] [cit. 2019-04-06]. Dostupné online z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401810009387?via%3Dihub#bb0010>
- [16] Polymer Coatings for Silica Optical Fiber [online] [cit. 2019-04-06]. Dostupné online z: https://www.molex.com/mx_upload/superfamily/polymicro/pdfs/Polymer_Coatings_for_Silica_Optical_Fiber_Nov_2009.pdf
- [17] Coating materials for optical fibre cables [online] [cit. 2019-04-06]. Dostupné online z: <https://www.acalbf.com/uk/articles/articlesContentPage/Coating-materials-for-optical-fibre-cables/NA-000149/TECH-001/techsolutions>
- [18] HSU Kevin, CSIPKES Andrei, JIN Tommy. Gold and Steel Protected FBGs Enable Robust Sensing in Harsh and High Temperature Environments [online] [cit. 2018-12-21]. Dostupné online z: https://www.rp-photonics.com/bg/promotions/technica_optical_components/Gold_FBG_Sensors.pdf
- [19] FBG Temperature Sensors [online] [cit. 2018-12-21]. Dostupné online z: https://fibergratings.com/sensors_temperature.html
- [20] DAUD S., JALIL M.A., NAJMEE S., SAKTIOTO J., ALI J., YUPAPIN, P.P.. Development of FBG Sensing System for Outdoor Temperature Environment [online] [cit. 2018-12-22]. Dostupné online z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811000853>
- [21] QIAN Yu, HUACAI Chen. Characterization of an optical fiber thermometer with cladding mode suppression fiber [online] [cit. 2018-12-22]. Dostupné online z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6013292?section=abstract&part=1>
- [22] HIRAYAMA Noritomo, SANO Yasukazu. Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use [online] [cit. 2018-12-22]. Dostupné online z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057800000124>
- [23] PARK Hyoung-Jun, SONG Minho. Linear FBG Temperature Sensor Interrogation with Fabry-Perot ITU Multi-wavelength Reference [online] [cit. 2019-02-07]. Dostupné online z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3707479/>
- [24] HOCKICKO PETER. Vyšetrovanie pružnej derformácie [online] [cit. 2019-04-16]. Dostupné online z: http://hockicko.uniza.sk/Vyuka/Labaky/moduly_pruznosti.pdf
- [25] LENG J.S.. Structural health monitoring of smart civil structures using fibre optic sensors [online] [cit. 2018-12-23]. Dostupné online z: <https://www.ndt.net/article/icem2004/papers/57/57.htm>

- [26] FBG Embedded Strain Sensor [online] [cit. 2018-12-25]. Dostupné online z: <http://www.tricombj.com/english/products/sensors/fbgse.htm>
- [27] BISWAS P, BANDYOPADHYAY S., KESAVAN K., PARAVALLAL S., ARUM SUNDARAM B., RAVISANKAR K., DAGUPTA K.. Investigation on packages of fiber Bragg grating for use as embeddable strain sensor in concrete structure [online] [cit. 2018-12-29]. Dostupné online z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424709004580>
- [28] RODRIGUEAZ Carlos, FÉLIX Carlos, LAGE Armindo, FIGUEIRAS Joaquim. Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges [online] [cit. 2019-02-08]. Dostupné online z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029610000866>
- [29] EPAARACHCHI A. Jayantha, RATHNAWEERA Gayan, CANNING John, STEVENSON Michael. Response Fibre Bragg Grating (FBG) strain sensors embedded at different locations through the thickness around a delamination in a composite laminate [online] [cit. 2018-12-25]. Dostupné online z: https://www.researchgate.net/publication/260302845_Response_Fibre_Bragg_Grating_FBG_strain_sensors_embedded_at_different_locations_through_the_thickness_around_a_delamination_in_a_composite_laminate
- [30] WNUK P. Vincent, MÉNDEZ Alexis, FERGUSON Steve, GRAVER Tom. Process for Mounting and Packaging of Fiber Bragg Grating Strain Sensors for use in Harsh Environment Applications [online] [cit. 2018-12-29]. Dostupné online z: <http://www.micronoptics.ru/uploads/library/documents/MountpackageFBGsensors.pdf>
- [31] LAU Kin-tak, CHAN Chi-chiu, ZHOU Li-min, JIN Wei. Strain monitoring in composite-strengthened concrete structures using optical fibre sensors [online] [cit. 2019-02-08]. Dostupné online z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836800000445>
- [32] URBAN František, KADLEC Jaroslav, VLACH Radek, KUČHTA Radek. Design of a Pressure Sensor Based on Optical Fiber Bragg Grating Lateral Deformation [online] [cit. 2018-12-30]. Dostupné online z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/10/12/11212/pdf>
- [33] ZHANG Ying, FENG Dejun, LIU Zhiguo, GUO Zhuanyun, DONG Xiaoyi, CHIANG K. S., CHU B. C. B.. High-sensitivity pressure sensor using a shielded polymer-coated fiber Bragg grating [online] [cit. 2018-12-30]. Dostupné online z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/924043>
- [34] PACHAVA Rao Vengal, KAMINENI Srimannarayana, MADHUVARASU Sai Shankar, PUTHA Kishore, MIMIDI Venkata Reddy. FBG based high sensitive pressure sensor and its low-cost interrogation system with enhanced resolution [online] [cit. 2018-12-30]. Dostupné online z: https://www.researchgate.net/publication/281288165_FBG_based_high_sensitive_pressure_sensor_and_its_low-cost_interrogation_system_with_enhanced_resolution
- [35] HUANG Jun, ZHOU Zude, WEN Xiaoyan, ZHANG Dongsheng. A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation [online] [cit. 2019-04.17]. Dostupné online z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026322411200382X>

- [36] AREF S. H., LATIFI H., ZIBAI M.I., AFSHARI M.. Fiber optic Fabry–Perot pressure sensor with low sensitivity to temperature changes for downhole application [online] [cit. 2019-02-08]. Dostupné online z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003040180600842X>
- [37] VENGAL RAO P., SRIMMANARAYANA K., SAI SHANKAR M., KISHORE P., RAVI PRASAD S..Enhanced sensitivity of FBG pressure sensor using thin metal diaphragm [online] [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6545723>