

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

**Návrh a realizace opto-vláknového senzoru pro současné měření
teploty a mechanického napětí založeného na Braggovských
mřížkách**

**Design and Realization of Fiber-optic Sensor for Simultaneous
Measurement of Temperature and Mechanical Stress Based on
Bragg's Gratings**

2016

Jan Průša

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Průša**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Návrh a realizace opto-vláknového senzoru pro současné měření teploty a mechanického napětí založeného na Braggovských mřížkách**
Design and Realization of Fiber-optic Sensor for Simultaneous Measurement of Temperature and Mechanical Stress Based on Bragg's Gratings

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis teorie Braggovských mřížek.
2. Návrh metod současného měření teploty a mechanického napětí s Braggovskou mřížkou.
3. Experimentální ověření a vyhodnocení současného měření teploty a mechanického napětí s Braggovskou mřížkou.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] OTHONOS, Andreas a Kyriacos KALLI. Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. Artech House, 1999. ISBN 978-0890063446
- [2] YIN, Shízhúo, Paul B. RUFFIN a Francis T.S. YU. Fiber Optic Sensors, Second Edition. 2. vyd. CRC Press, 2008. ISBN 978-1420053654

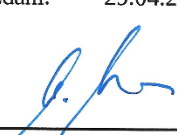
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marcel Fajkus**


Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 29.04.2016





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

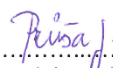


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 26. dubna 2016


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Marcelu Fajkusovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato práce pojednává o Braggovských mřížkách, popisu základních typů a funkce, následné použití dvou Braggovských mřížek jako opto-vláknový senzor pro současné měření teploty a mechanického napětí. Ve druhé části práce následuje návrh senzoru za použití softwaru OptiSystem a simulování jednotlivých bodů křížové citlivosti. V následující části je provedeno reálné měření teploty, deformace a měření obou současně se dvěma rozdílnými Braggovskými mřížkami.

Klíčová slova

Braggovské mřížky, OptiSystem, teplotní senzor, senzor deformace

Abstract

This work is focused on fiber Bragg grating, their description of basic types and function, follow use two fiber Bragg's gratings like sensor for simultaneous measurement of temperature and mechanical stress. The second part of this work follows design of sensor using software OptiSystem and simulation each points of cross sensitivity. In the next part is real measurement of temperature, deformation and measurement of both at once with two different fiber Bragg's gratings.

Key words

Fiber Bragg's gratings, OptiSystem, temperature sensor, deformation sensor

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	9
Seznam použitých zkratek.....	10
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	11
Úvod.....	13
1 Braggovské mřížky	14
1.1 Princip Braggovské mřížky.....	14
1.2 Křížová citlivost.....	16
1.3 Mechanická zátěž a teplotní citlivost FBG	16
1.4 Výroba Braggovských mřížek.....	17
1.4.1 Vnitřní zapisování	17
1.4.2 Interferometrická metoda	18
1.4.3 Fázová maska	19
1.4.4 Bod po bodu	19
1.5 Typy Braggovských mřížek	20
1.5.1 Uniformní Braggovská mřížka	20
1.5.2 Blazeované Braggovské mřížky	20
1.5.3 Chirpované Braggovské mřížky	20
1.5.4 Apodizované Braggovské mřížky	21
2 Simulace v softwaru OptiSystem	22
2.1 Simulace dvou FBG odděleně.....	23
2.1.1 Teplotní senzor	23
2.1.2 Deformační senzor	25
2.2 Simulace dvou FBG různě zatížené	27
3 Měření	31
3.1 Teplotní senzor.....	31
3.1.1 Schéma zapojení a popis pracoviště.....	31
3.1.2 Měření časového zpoždění průchodu tepla do senzoru	32
3.1.3 Teplotní měření	33
3.2 Senzor deformace.....	34
3.2.1 Schéma zapojení a popis pracoviště.....	34
3.2.2 Měření deformace.....	35

3.3	Současné měření teploty a deformace	36
3.3.1	Schéma zapojení a popis pracoviště	37
3.3.2	Současné měření teploty a deformace	37
	Závěr	44
	Použitá literatura	45

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
\mathbf{K}	–	mřížkový vektor
S	pm/°C	teplotní citlivost
S	pm/ μ strain	deformační citlivost
T	°C	teplota
ν	–	Poissonův koeficient
K_T	pm/°C	koeficient teplotní citlivosti
K_f	–	vektor rozptýleného záření
K_i	–	vektor dopadající vlny
K_ε	pm/ μ strain	koeficient def. citlivosti
n_c	–	index lomu jádra vlákna
n_{eff}	–	efektivní index lomu
p_{11}	–	komponenty napětově
p_{12}	–	optického tenzoru
p_e	–	efektivní zátěžová konstant
Λ	m	perioda
λ	nm	vlnová délka
λ_B	nm	braggovská vlnová délka
ΔT	°C	rozdíl teplot
$\Delta\lambda_B$	nm	rozdíl brag. vlnových délek
$\Delta\varepsilon$	μ strain	rozdíl deformace

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
FBG	Fiber Bragg's Grating
LED	Light-emitting diode
OSA	Optical Spectral Analyzer

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Braggovská mřížka	14
1.2	Špičková vlnová délka z FBG (a) při zatížení deformací (b) při zatížení teplotou	17
1.3	Schéma metody Vnitřního zapisování	18
1.4	Schéma Interferometrická metoda	18
1.5	Schéma metody Fázová maska	19
1.6	Schéma metody Bod po bodu	19
1.7	Blokové schéma Blazed mřížky a) Vektorový diagram pro Braggovskou podmínku Blazeované FBG b)	20
1.8	Blokové schéma chirpované mřížky s periodickou intenzitou a), Blokové schéma sestavené z několika mřížek s rostoucí periodou b)	21
1.9	Odraživé spektrum Braggovské mřížky s uniformní difrakční fázovou maskou a fázovou maskou s Gaussovým profilem	21
2.1	Schéma zapojení obvodu pro simulování	22
2.2	Navrhnutý blok	22
2.3	Detail parametrů bloku	23
2.4	Průběh simulace teplotního senzoru	24
2.5	Závislost braggovské vlnové délky na teplotě	25
2.6	Průběh simulace deformačního senzoru	26
2.7	Závislost braggovské vlnové délky na deformaci	27
2.8	Průběh simulace dvou mřížek T a T+ ϵ	29
2.9	Závislost posunu braggovské vlnové délky na počtu kroků	29
2.10	Závislost teploty na posunu braggovské vlnové délky	30
2.11	Závislost deformace na posunu braggovské vlnové délky	30
3.1	Schéma zapojení	31
3.2	Fotografie pracoviště	31
3.3	Závislost braggovské vlnové délky na čase	33

Seznam ilustrací a seznam tabulek

3.4	Závislost braggovské vlnové délky na teplotě + lineární regrese	34
3.5	Schéma zapojení	34
3.6	Závislost braggovské vlnové délky na deformaci	35
3.7	Schéma zapojení	37
3.8	Fotografie napínáku	37
3.9	Fotografie pracoviště	40
3.10	Detail umístění mřížek pod zdrojem tepla	40
3.11	Závislost braggovské vlnové délky na počtu kroků	41
3.12	Průběh měření teploty	41
3.13	Průběh měření deformace	42
3.14	Chyba teploty	42
3.15	Chyba deformace	43

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
2.1	Hodnoty k simulaci teplotního senzoru	24
2.2	Hodnoty k simulaci deformačnímu senzoru	26
2.3	Hodnoty k simulaci dvou FBG různě zatížené	28
3.1	Hodnoty k měření časového zpoždění tepla do senzoru	32
3.2	Hodnoty k měření teplotnímu měření	33
3.3	Zprůměrované hodnoty deformačního měření	36
3.4	Tabulka naměřených hodnot	38

Úvod

Tato bakalářská práce pojednává o návržení a realizaci optovláknového senzoru pro současné měření teploty a mechanické zátěže založeného na Braggovských mřížkách. Její tři úkoly jsou popis teorie FBG, který je uveden v první kapitole, dále návrh metod pro současné měření teploty a mechanického napětí s Braggovskou mřížkou, což odpovídá druhé kapitole a nakonec poslední úkol, experimentální ověření a vyhodnocení současného měření teploty a mechanického napětí s Braggovskou mřížkou.

První kapitola bude teoreticky zaměřena na princip funkce Braggovských mřížek. Budou uvedeny výrobní metody FBG jako jsou, vnitřní zapisování, interferometrická metoda, fázová maska a v poslední řadě bod po bodu. Vysvětlení pojmu křížová citlivost a uvedení případů, které mohou nastat. Závěrem kapitoly bude vypsáno několik základních typů Braggovských mřížek, ať už úplně základní uniformní FBG, blazeované mřížky i chirpované, nebo apodizované.

Druhá kapitola bude zaměřena na simulace. Simulovat jednotlivé případy budu v programu Optisystém, kde jsem navrhl vlastní bloky s Braggovskými mřížkami. V jednotlivých blocích se nastavují parametry na základě požadované simulace. Mezi proměnné parametry patří teplota, deformace a vlnová délka. Ostatní parametry v bloku jsou nastaveny napevno. Simulovány budou celkem tři případy, od samostatného teplotního nebo deformačního senzoru, až po měření dvou FBG, kde jedna bude zatížena oběma veličinami a druhá jen jednou veličinou.

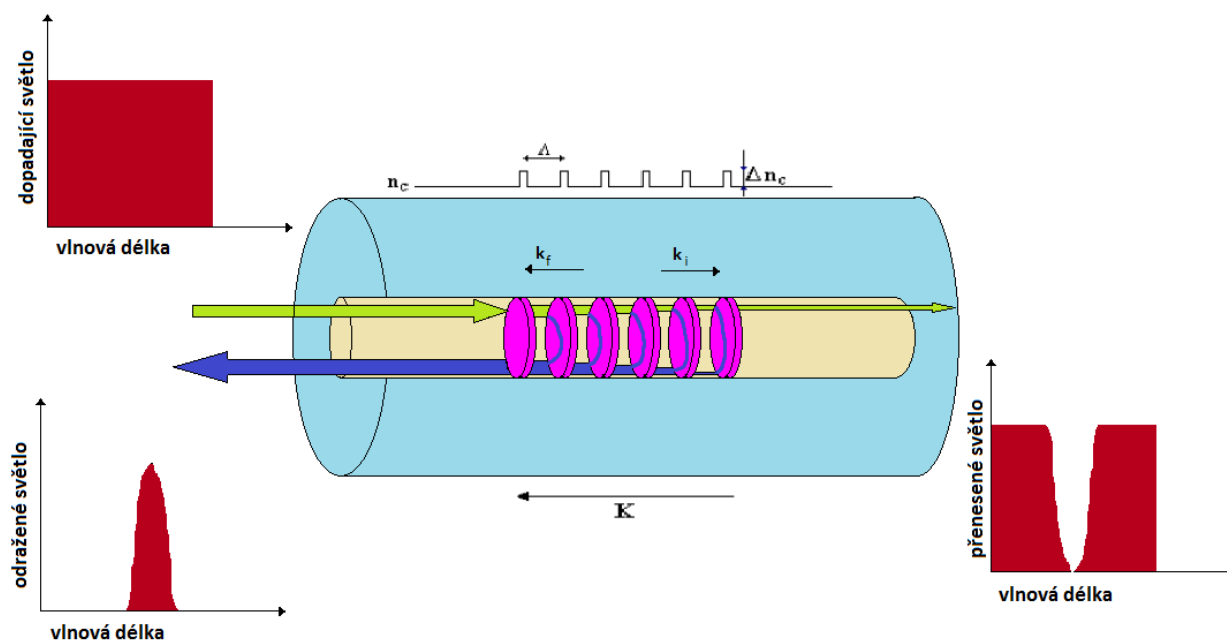
Jako třetí kapitola je reálné měření s Braggovskými mřížkami. První měření z kapitoly se zaměří čistě na teplotu, kde se využije FBG jako teplotního senzoru, jako zdroj tepla bude použita horkovzdušná trouba, do které se vloží FBG a čidlo teploměru, z naměřených hodnot se určí teplotní citlivost měřené mřížky. Ve druhém měření se bude pomocí napínáku a FBG zjišťovat deformační citlivost, tudíž se Braggovská mřížka použije jako deformační senzor. V předchozích dvou měřeních, byly obě Braggovské mřížky měřeny jednotlivě, a v posledním reálném měření bude provedeno současné měření teploty a deformace, kde bude jedna FBG zatížena jen teplotou, a na druhou Braggovskou mřížku bude působit jak teplota, tak i deformace. K tomuto měření se využije žehlička, která bude v zapojení figurovat jako zdroj tepla, jelikož by se napínák nedokázal umístit do horkovzdušné trouby, kvůli své velikosti.

1 Braggovské mřížky

Vláknová Braggovská mřížka je poměrně jednoduché zařízení, ve své základní formě nejde o nic jiného než o opakující se modulaci indexu lomu jádra jednomódového vlákna. Toto zařízení může provádět mnoho primárních funkcí, jako odraz a filtrování ve vysoce efektivním nízkoztrátovém způsobu. Braggovské mřížky jsou ideálními senzory pro měření řady veličin jako teplota, deformace, vibrace, tlak, síla apod.. Typické vlákno s FBG může poskytnout prakticky až 100% odrazivost se šířkou odraženého spektra $< 0,5$ nm. Délka mřížky se pohybuje v rozmezí od desetin až stovky mikrometrů, chirpovaná FBG může být až několik cm. Nejčastěji se u senzorů užívá rozmezí vlnové délky 1510 až 1590 nm, existují však i senzory, které jsou používány v pásmu 850 nm. [1][3]

1.1 Princip Braggovské mřížky

FBG lze chápat jako vlnově závislé zrcadlo, které odráží specifickou vlnovou délku, která se nazývá Braggovská vlnová délka a značí se λ_B , ostatní vlnové délky propouští. Braggovská vlnová délka se vypočítá pomocí vztahu 1.3. Struktura FBG je tvořena periodickou změnou indexu lomu s periodou Λ v jádře optického vlákna. Aby Braggovská mřížka plnila správnou funkci, musí být splněna Braggova podmínka. Pokud tato podmínka není splněna, tak odražené světlo od každé mřížkové plochy se fázově posune a úplně vyruší. V místech, kde je Braggova podmínka splněna, tam se části odraženého světla se od mřížkové struktury sčítají ve zpětném směru a následně vytvářejí vrchol zpětného odrazu, viz **obrázek 1.1**.



Obrázek 1.1: Braggovská mřížka

Braggova podmínka je jednoduchý požadavek, který splňuje zákony zachování energie a zachování hybnosti. Zákon zachování energie potřebuje, aby frekvence dopadajícího záření a frekvence odraženého záření byly stejné. Zákon zachování hybnosti vyžaduje, aby vlnový vektor dopadající vlny \mathbf{K}_i přičtený k mřížkovému vektoru \mathbf{K} se rovnal vlnovému vektoru z rozptýleného záření \mathbf{K}_f : [1]

$$\mathbf{K}_i + \mathbf{K} = \mathbf{K}_f \quad (1.1)$$

kde:

\mathbf{K}_i - vlnový vektor dopadající vlny,

\mathbf{K}_f - vlnový vektor rozptýleného záření,

\mathbf{K} - mřížkový vektor + další výskyty

Zákon zachování hybnosti vyjádřený vztahem:

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (1.2)$$

který se dá zjednodušit na první řád Braggovy podmínky

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.3)$$

kde:

λ_B - Braggovská vlnová délka,

n_{eff} - efektivní index lomu,

Λ - perioda změn indexu lomu v jádře.

Braggovská rezonance, což je střední vlnová délka zpětně odraženého světla od Braggovské mřížky se odvíjí nejen od efektivního indexu lomu jádra, ale také podle rozestupů mezi jednotlivými ploškami mřížky. Pravidelné rozestupy plošek v Braggovské mřížce a s nimi i efektivní index lomu je ovlivňován změnami teploty a mechanického napětí.

1.2 Křížová citlivost

Braggovské mřížky jsou citlivé jak na deformaci, tak i na teplotu. Vlivem této citlivosti není možné určit velikost působící teploty a deformace jedinou mřížkou a nazývá se křížová citlivost. Dynamické měření deformace není ovlivněno teplotou, protože teplotní fluktuační jsou výrazně pomalejší než působící dynamická deformace. Problém nastává u statických měření. Pro jednoznačné určení působící velikosti deformace a teploty musí být použity dvě Braggovské mřížky zároveň. Tuto soustavu lze popsat **vztahem 1.4**.

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{1\varepsilon} & K_{1T} \\ K_{2\varepsilon} & K_{2T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ T \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

kde K jsou teplotní a deformační koeficienty dvou mřížek. Při této konfiguraci mohou nastat tyto tři případy

1. Každá mřížka má jeden koeficient nulový (jedna teplotní a druhá deformační nebo naopak). Při této podmínce jedna mřížka měří teplotu (resp. deformaci) a druhá deformaci (resp. teplotu).
2. Alespoň jeden koeficient matice je nulový. V takovém případě jednou mřížkou změříme velikost jedné veličiny, druhou mřížkou změříme celkové působení obou veličin. Jednoduchým odečtením pak zjistíme působení druhé veličiny.
3. Koeficienty jsou nenulové, ale různé. V tomto případě je nutné, aby obě mřížky měly různou teplotní a deformační citlivost. Pak determinant matice je nenulový a jednotlivé působení teploty a deformace lze získat výpočtem.

V praxi je tedy nutné využít pro měření dvě Braggovské mřížky. Nejjednodušším případem je užití dvou identických mřížek, kde jedna mřížka je nainstalována na měřenou strukturu tak, aby byla ovlivněna pouze jednou veličinou. Tato koncepce odpovídá druhému bodu výše.

Druhou možností je použití dvou různých FBG, které mají různou odezvu na deformaci a teplotu. Nejjednodušeji toho lze docílit použitím dvou mřížek s dvěma různými Braggovskými vlnovými délkami, protože citlivost na teplotu a deformaci je dána Braggovskou vlnovou délkou mřížky. Tato konfigurace odpovídá výše zmíněnému třetímu bodu. [6]

1.3 Mechanická zátěž a teplotní citlivost FBG

Rezonance Braggovské mřížky, což je středová vlnová délka odraženého světla od Braggovské mřížky, závisí na efektivním indexu lomu jádra mřížky a také na periodicitě mřížky. Efektivní index lomu jádra a také i periodické rozestupy mřížky budou ovlivněny změnami mechanického zatížení a teploty. Při užití již zmíněného **vzorce 1.3** se posune středová vlnová délka v mřížce, a to kvůli změnám teploty a mechanického zatížení podle **vzorce 1.5**

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (1.5)$$

První člen představuje efekt mechanického napětí působící na optické vlákno. To odpovídá změně rozestupu v mřížce a mechanickému napětí opticky indukované změny v indexu lomu.

Účinek deformace popsany výše může být vyjádřen takto:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_z \quad (1.6)$$

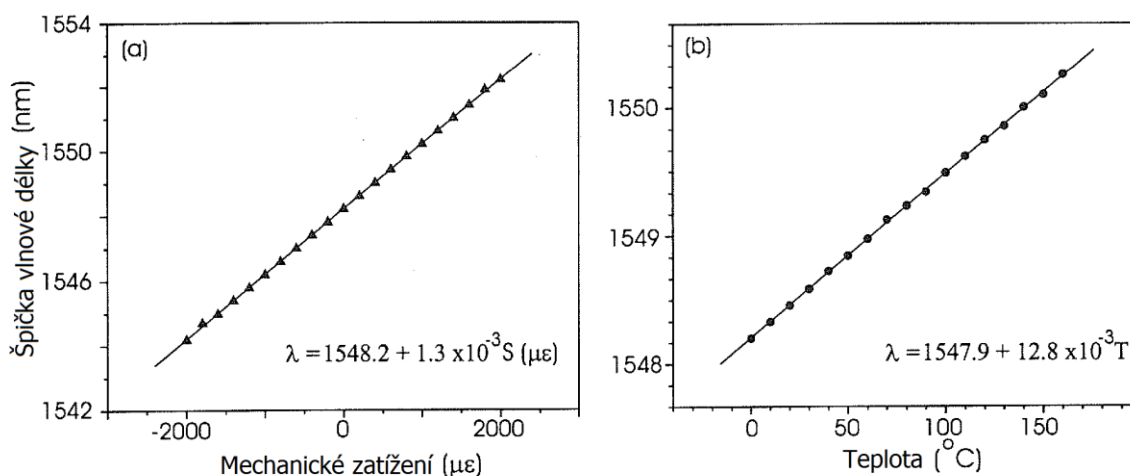
kde p_e je efektivní opticky zátěžová konstanta definovaná jako:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (1.7)$$

kde, p_{11} a p_{12} jsou komponenty napěťově optického tenzoru a ν je Poissonův koeficient.

Pro germanio-křemičité optické vlákno jsou typické hodnoty $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ a $n_{eff} = 1,482$.

Při daných parametrech dosahuje FBG citlivost na deformaci 1,2 pm/1 μ strain při Braggovské vlnové délce 1550 nm. Při této délce způsobí deformace o velikosti 1 μ strain posun Braggovské vlnové délky o 1,2 pm. [1][4]



Obrázek 1.2: Špičková vlnová délka z FBG (a) při zatížení deformací (b) při zatížení teplotou

1.4 Výroba Braggovských mřížek

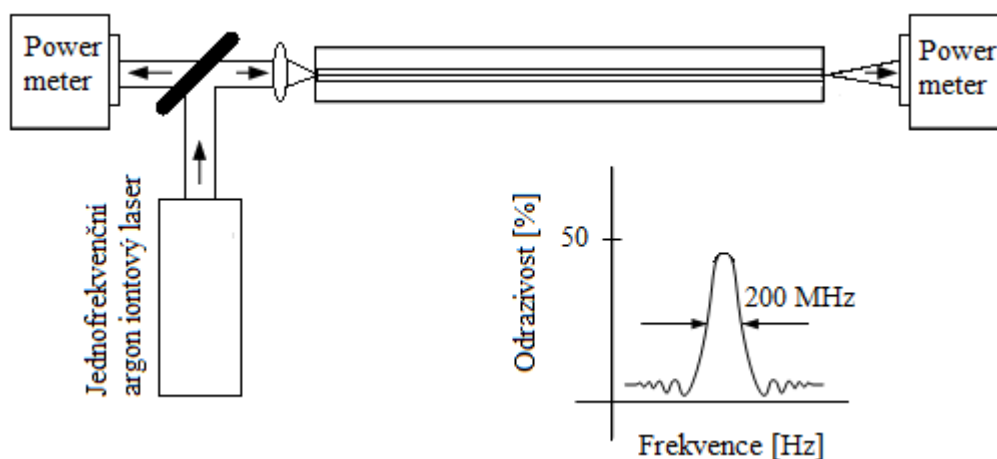
Braggovské mřížky se zapisují do optického vlákna několika technikami. Použitím jednotlivých technik je možné vyrobit různé typy Braggovských mřížek. První Braggovskou mřížku zapsal Ken Hill již v roce 1978 metodou vnitřního zapisování. Dále byly demonstrovány další metody jako interferenční výroba, výroba fázovou maskou nebo metoda bod po bodu.

1.4.1 Vnitřní zapisování

Tato technika vyžaduje jednofrekvenční laser s vlnovou délkou v UV oblasti. Toto záření způsobuje změnu indexu lomu ve fotosenzitivním optickém vlákne. Touto metodou se mřížky vyrábějí

velmi jednoduše. Nevýhodou však je omezená Braggovská vlnová délka mřížky, která je dána vlnovou délkou argon-iontového laseru, který vyzařuje na 514,5 nebo 480 nm.

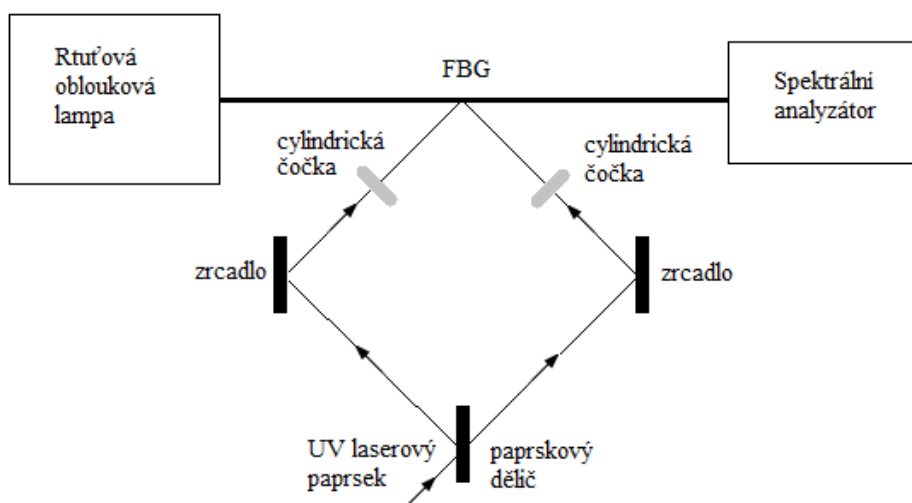
Záření laseru interferuje s Fresnelovými odrazy, díky čemuž vzniká stojaté vlnění a v místech interferenčních maxim dochází k permanentní změně indexu lomu viz. **obrázek 1.3**. [6]



Obrázek 1.3: Schéma metody Vnitřního zapisování [6]

1.4.2 Interferometrická metoda

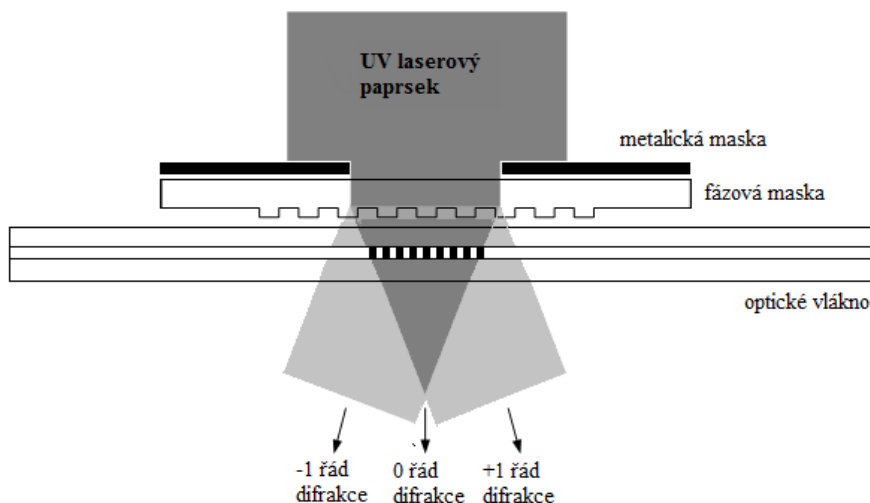
Interferometrická metoda je založena na bočním osvětlení fotocitlivého optického vlákna. UV paprsek je rozdělen na dva, které dopadají na optické vlákno pod vzájemným úhlem a vytvářejí tak interferenční obrazce. V těchto místech opět dochází k permanentní změně indexu lomu, jak je zobrazeno na **obrázku 1.4**. [6]



Obrázek 1.4: Schéma Interferometrické metody [6]

1.4.3 Fázová maska

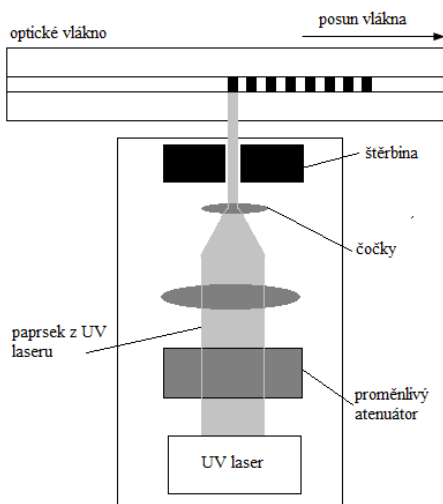
Tato technika využívá difrakční mřížkový element, který prostorově moduluje UV paprsek. Tento paprsek je rozdělen do dvou řádů, označovaných jako -1 a +1. Perioda Braggovské mřížky je dána polovinou periody fázové masky, viz. **obrázek 1.5**. [6]



Obrázek 1.5: Schéma metody Fázová maska [6]

1.4.4 Bod po bodu

Jedná se o nejdokonalejší metody výroby FBG různých typů mřížkových struktur. Světelné pulzy z UV laseru prostupují úzkou štěrbinou a dopadají na fotocitlivé optické vlákno, kde způsobí permanentní změnu indexu lomu. Posunem optického vlákna se vyrábí struktura mřížky. Změnou rychlosti posunu je možné vyrobit chirpované mřížky, změnou intenzity laseru je možné měnit apodizaci mřížky, znázorněno na **obrázku 1.6**. [6]



Obrázek 1.6: Schéma metody Bod po bodu [6]

1.5 Typy Braggovských mřížek

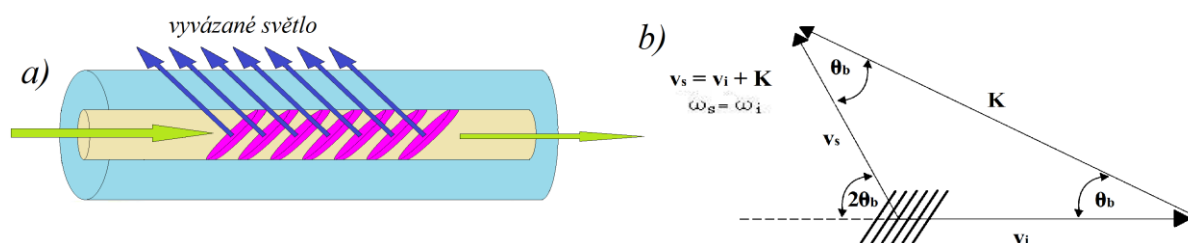
Tato část bude zaměřena na odlišné druhy Braggovských mřížek, kterých existuje několik typů, které rozlišujeme podle závislosti na profilu změny indexu lomu. Mohou být uniformní, chirpované, apodizované a blazeované. Uniformní Braggovská mřížka neboli Braggovské zrcadlo má konstantní periodu mřížky. Blazeované mřížky mají skloněnou rovinu modulace indexu lomu. Chirped FBG má periodickou intenzitu zobrazující monotónní zvýšení v rozestupu mezi mřížkou. [1][2]

1.5.1 Uniformní Braggovská mřížka

Uniformní FBG je nejjednodušší, a také nejvíce používaná Braggovská mřížka znázorněna na **obrázku 1.1**. V závislosti na parametrech jako délka mřížky a velikost změny indukovaného indexu lomu, může uniformní Braggovská mřížka fungovat jako úzkopásmový přenosový nebo odrazový filtr nebo širokopásmové zrcadlo. V kombinaci s ostatními FBG mohou tato zařízení pracovat jako pásmové propusti. Braggovské mřížky jsou považovány za výborné senzory teploty a mechanického zatížení. Uniformní Braggovská mřížka je tvořena konstantní periodou změny indexu lomu s konstantní velikostí indukované změny indexu lomu.

1.5.2 Blazeované Braggovské mřížky

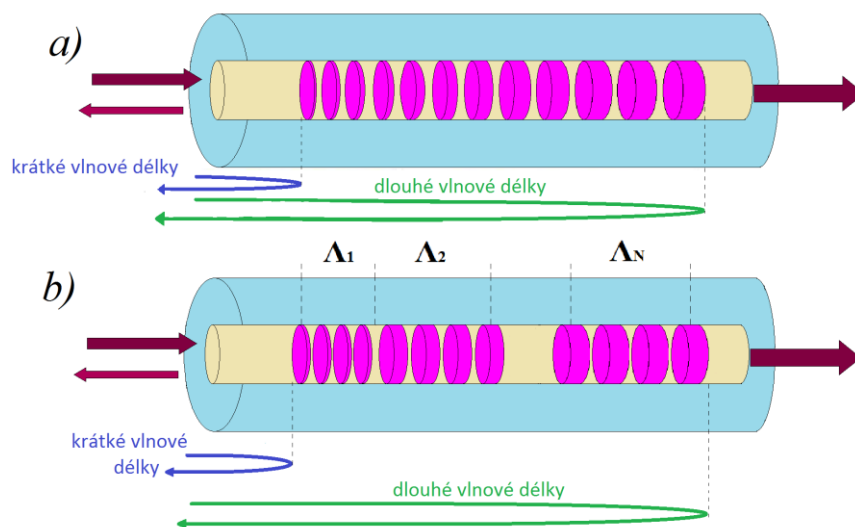
Blazeovaná Braggovská mřížka má skloněnou rovinu modulace indexu lomu, což má za následek, že světlo, které je řízené v jádru vlákna, je ztrátově vyvedeno do pláště vlákna nebo vyzářeno, jak je vyobrazeno na **obrázku 1.6 a)**. Náklony mřížky a výkon indexové modulace určí efektivitu a šířku pásma světla. Kritérium splňující Braggovskou podmínku mřížky je podobné jako s uniformní FBG.



Obrázek 1.7: Blokové schéma Blazed mřížky a) Vektorový diagram pro Braggovskou podmínku Blazeované FBG b)

1.5.3 Chirpované Braggovské mřížky

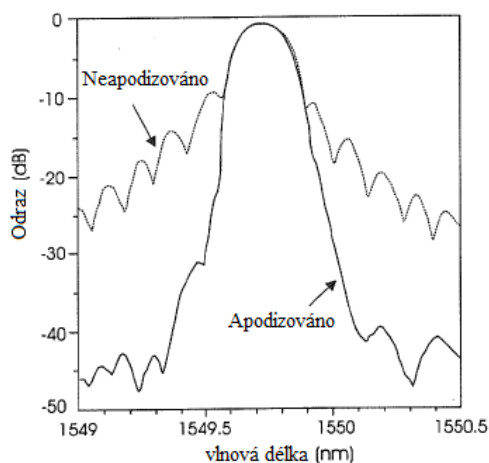
Jedna z nejzajímavějších struktur Braggovských mřížek, kde kromě amplitudy indukovaného indexu lomu můžeme měnit také periodu změny. Chirpované FBG mají proměnlivou periodu změny indexu lomu, jak je ukázáno na **obrázku 1.7**. Tato změna může být lineární, kvadratická apod. Výsledkem tohoto rozmítání periody je rozšíření odrazného spektra FBG. Tato charakteristická vlastnost je považována za výhodu pro konkrétní použití v telekomunikacích a senzorové technologii, jako kompenzace disperze [1][7]



Obrázek 1.8: Blokové schéma chirpované mřížky s periodickou a) Blokové schéma sestavené z několika mřížek s rostoucí periodou b)

1.5.4 Apodizované Braggovské mřížky

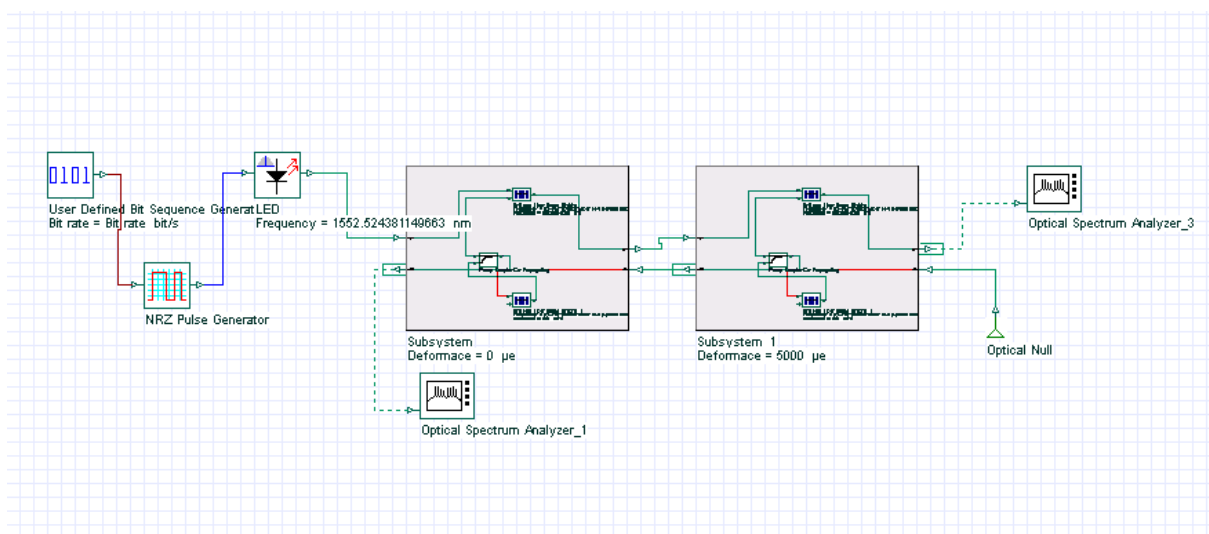
Výsledkem uniformní mřížky je spektrum s hlavním vrcholem, které je doprovázeno spousty postranních laloků. Postranní laloky jsou způsobeny odrazy protějších konců mřížky. V některých aplikacích je nutné tyto postranní laloky eliminovat, neboli apodizovat odražené spektrum. Apodizace znamená postupné zmenšování změny indexu lomu na krajích mřížky. Apodizace je realizována proměnlivou velikostí indukovaného indexu lomu, která může být dána gaussovskou nebo hyperbolicou funkcí. [2]



Obrázek 1.9: Odráživé spektrum Braggovské mřížky s uniformní difrakční fázovou maskou a fázovou maskou s Gaussovým profilem [1]

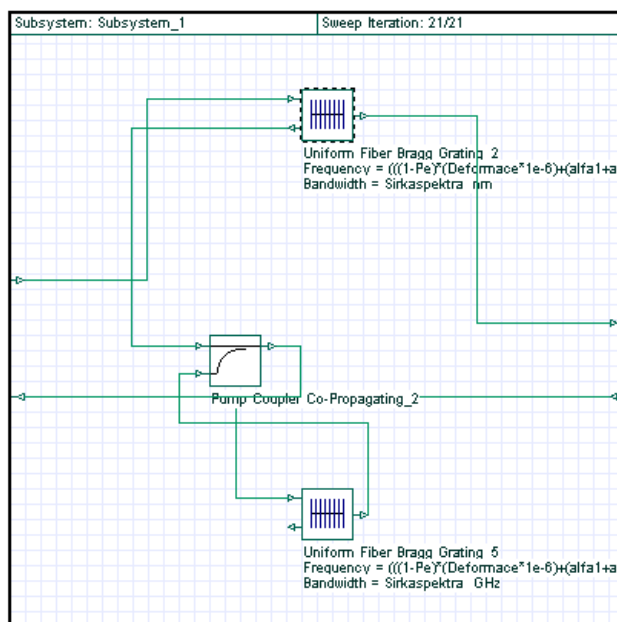
2 Simulace v softwaru Optisystem

Tato část práce je zaměřena na simulace měření teploty a deformace v programu Optisystem. V každé simulaci budeme měřit 21 kroků. Prováděny budou celkem tři simulace. Jako první bude provedena simulace dvou Braggovských mřížek odděleně a to jako teplotní senzor a deformační senzor. Další simulace, kdy jedna z mřížek je zatížena jen jednou veličinou v tomto případě teplotou a druhá mřížka oběma veličinami, čili teplotou i deformací. Na **obrázku 2.1** je zobrazeno schéma zapojení z programu OptiSystém pro simulování. [5]



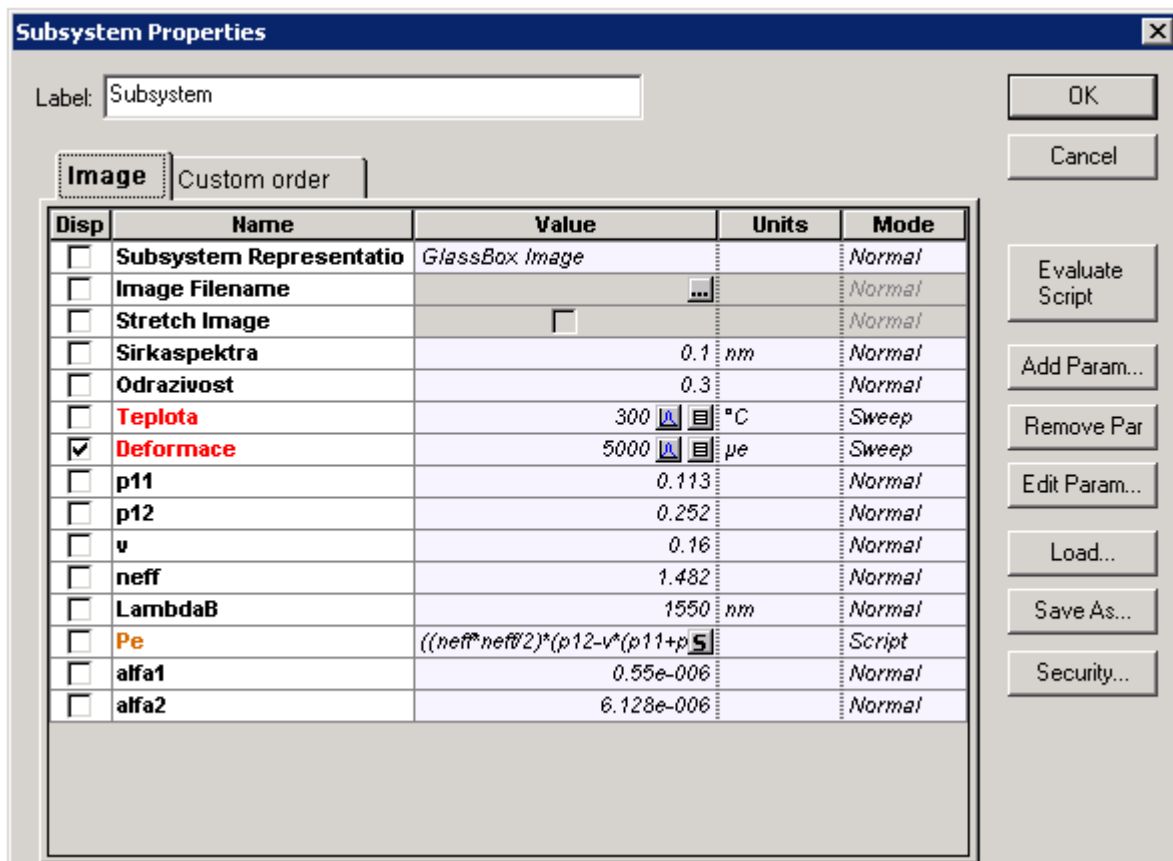
Obrázek 2.1: Schéma zapojení obvodu pro simulování

Pro sestavení tohoto obvodu bylo potřeba navrhnout vlastní blok, který je znázorněn na **obrázku 2.2**. Blok se skládá ze dvou uniformních Braggovských mřížek a coupleru.



Obrázek 2.2: Navržený blok

Blok byl navržen kvůli spojení, ale hlavně kvůli nastavitelnosti potřebných parametrů. V bloku bylo nutné vytvořit potřebné veličiny pro nastavování měřících rozsahů. Parametry bloku jsou vidět na **obrázku 2.3**, kde hlavní mezi nastavovanými jsou teplota, deformace a braggovská vlnová délka a koeficienty.



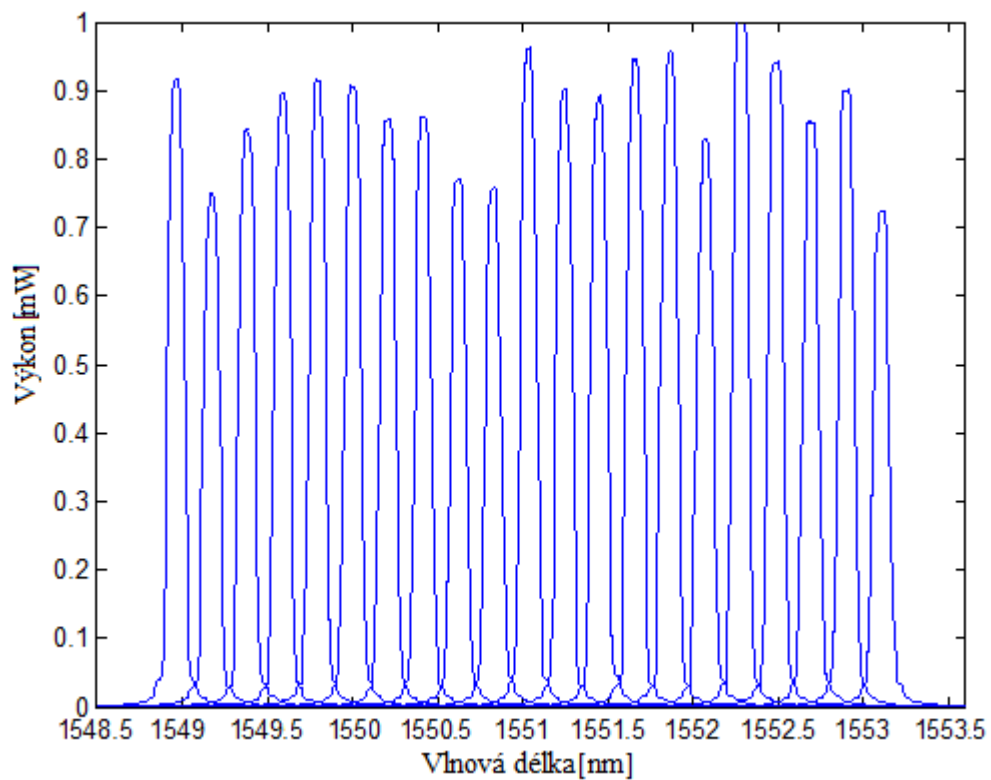
Obrázek 2.3: Detail parametrů bloku

2.1 Simulace dvou FGB odděleně

Tato část bude rozdělena na dvě menší části, jelikož každá z mřížek je simulována samostatně. První bude teplotní senzor, kdy jedna z mřížek bude zatížena čistě jen teplotou a druhá nezatížena. V druhé podčásti nazvané deformační senzor, kdy oproti prvnímu případu bude první FBG bez zátěže a druhá FBG s nastavenou deformací.

2.1.1 Teplotní senzor

Pro tuto simulaci je použit měřící rozsah teploty od -100 do 300 °C. Braggovská vlnová délka λ_B nastavena na 1550 nm a deformace 0 µstrain. Na **obrázku 2.4** je znázorněn průběh simulace teplotního senzoru. Ke každému průběhu byla vyhledána centrální braggovská vlnová délka a zapsána do **tabulky 2.1** k odpovídajícím teplotám.



Obrázek 2.4: Průběh simulace teplotního senzoru

Tabulka 2.1: Hodnoty k simulaci teplotního senzoru

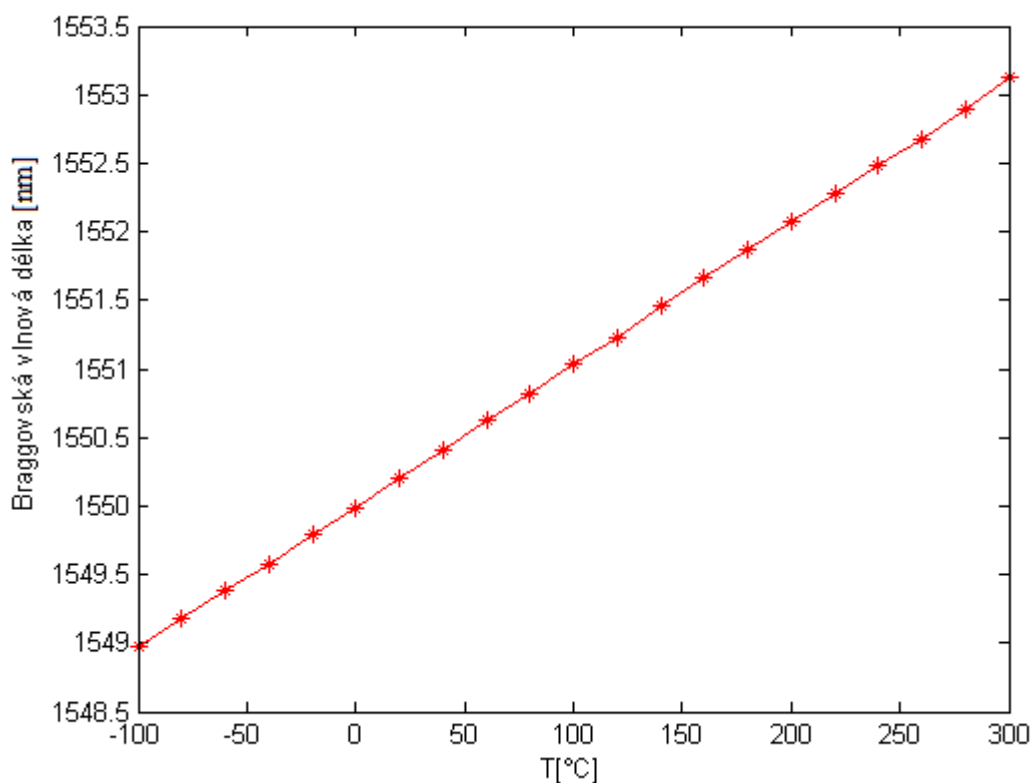
T [°C]	λ [nm]	T [°C]	λ [nm]
-100	1548,97	120	1551,23
-80	1549,18	140	1551,46
-60	1549,39	160	1551,67
-40	1549,58	180	1551,87
-20	1549,79	200	1552,08
0	1549,99	220	1552,28
20	1550,21	240	1552,49
40	1550,41	260	1552,68
60	1550,62	280	1552,89
80	1550,82	300	1553,12
100	1551,03		

Z hodnot tabulky byl vykreslen graf závislosti braggovské vlnové délky na teplotě znázorněn na **obrázku 2.5**, a následně vypočítána teplotní citlivost simulované FBG dle **vztahu 2.1**,

$$S = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} \quad (2.1)$$

Kde teplotní citlivost simulované mřížky je:

$$S = 10,375 \text{ pm/}^\circ\text{C}$$

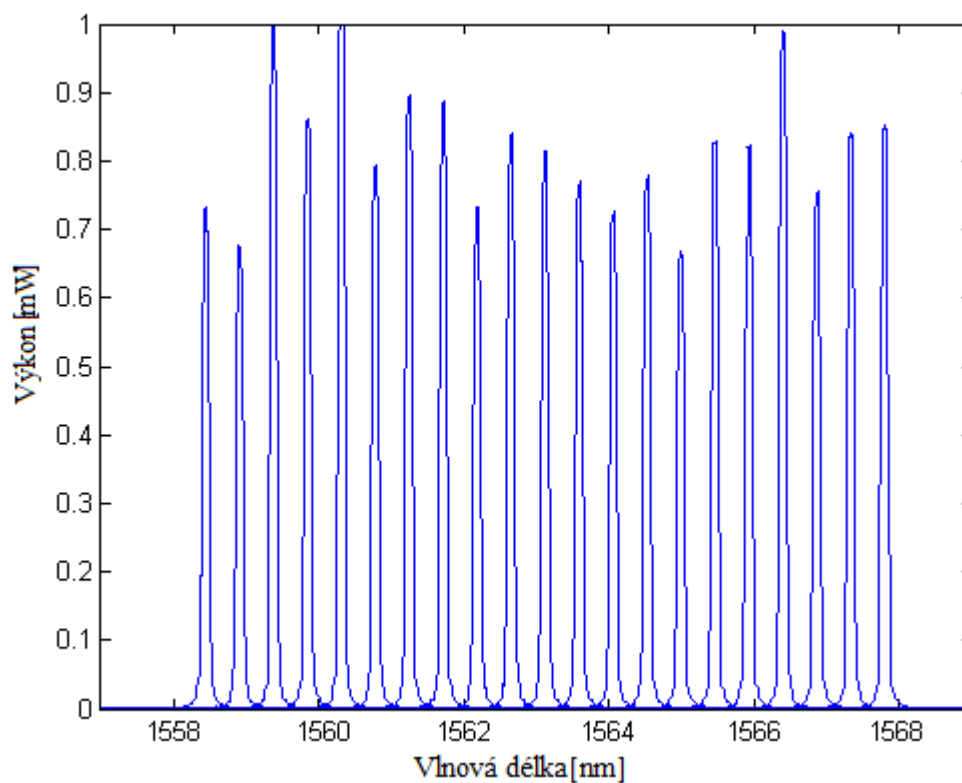


Obrázek 2.5: Závislost braggovské vlnové délky na teplotě

2.1.2 Deformační senzor

V této simulaci bude oproti předchozí zatížena druhá FBG, a to tak, že zvolený měřící rozsah deformace je od -1000 až do 5000 μstrain , a braggovská vlnová délka λ_B mřížky 1560 nm, teplotní zátěž u této simulace bude 0 $^\circ\text{C}$. Průběh simulace deformačního senzoru je na **obrázku 2.6**. Opět u této simulace byla určena centrální braggovská vlnová délka a zapsána k odpovídajícím hodnotám deformace do **tabulky 2.2**.

Z hodnot tabulky byl zpracován graf závislosti braggovské vlnové délky na deformaci, znázorněn na **obrázku 2.7**. Pomocí **vztahu 2.2** byla určena deformační citlivost simulované braggovské mřížky.



Obrázek 2.6: Průběh simulace deformačního senzoru

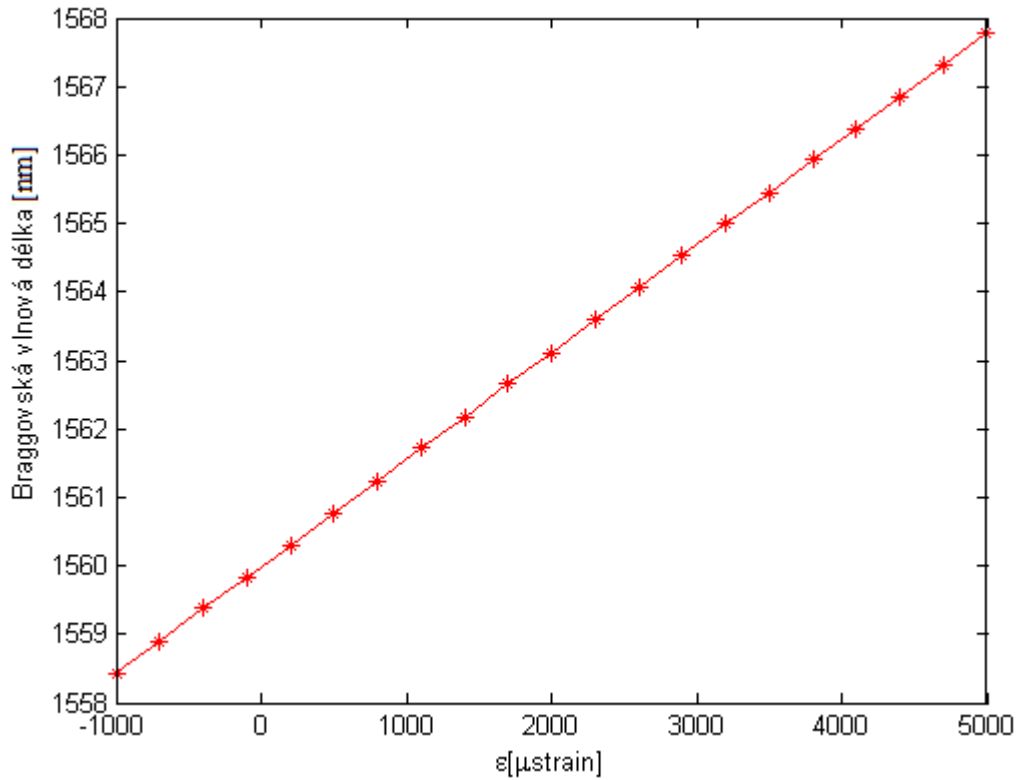
Tabulka 2.2: Hodnoty k simulaci deformačního senzoru

ϵ [μ strain]	λ [nm]	ϵ [μ strain]	λ [nm]
-1000	1558,43	2300	1563,60
-700	1558,89	2600	1564,07
-400	1559,39	2900	1564,54
-100	1559,84	3200	1564,99
200	1560,30	3500	1565,45
500	1560,77	3800	1565,95
800	1561,24	4100	1566,39
1100	1561,73	4400	1566,85
1400	1562,18	4700	1567,32
1700	1562,66	5000	1567,79
2000	1563,11		

$$S = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} \quad (2.2)$$

Deformační citlivost simulované mřížky je:

$$S = 1,56 \text{ pm}/\mu\text{strain}$$



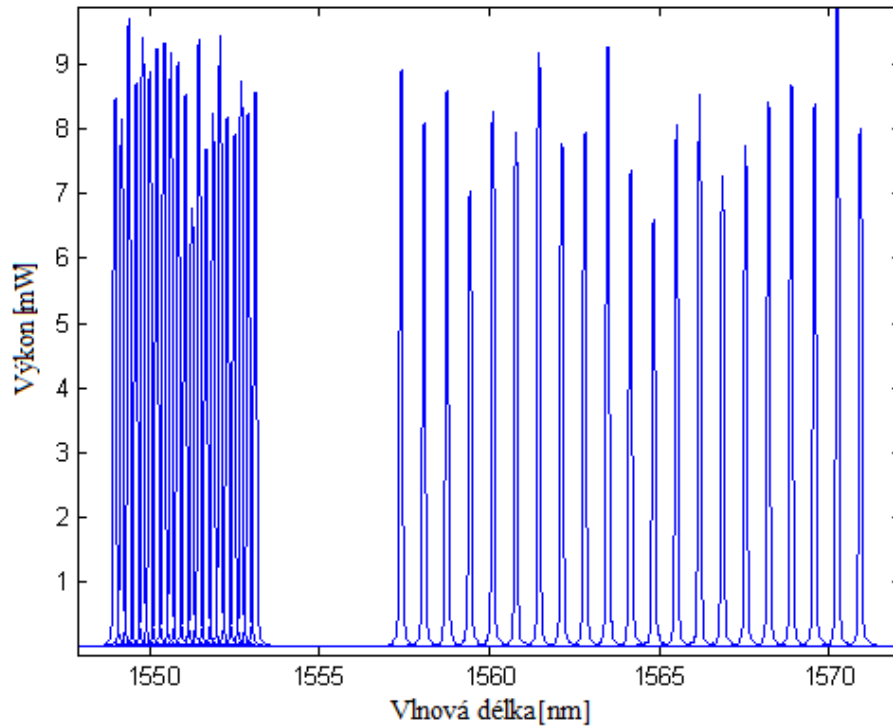
Obrázek 2.7: Závislost braggovské vlnové délky na deformaci

2.2 Simulace dvou FBG různě zatížené

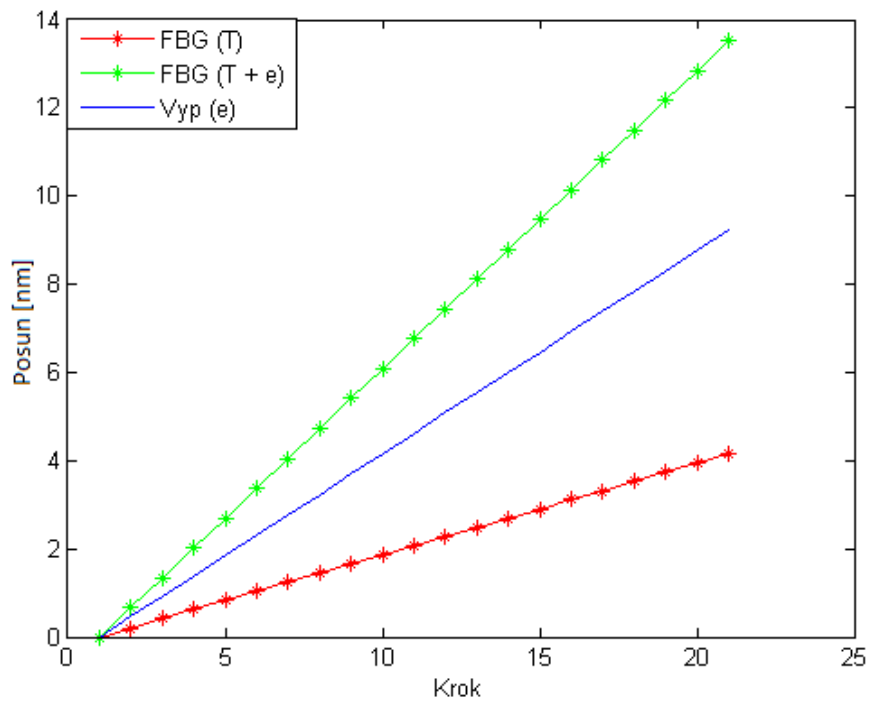
Ve třetí simulaci bude první FBG zatížena jen teplotou a druhá mřížka teplotou i deformací. U první FBG je nastaven pouze měřicí rozsah teploty od -100 do 300 °C, a braggovská vlnová délka λ_B 1550. Druhá mřížka má stejný měřicí rozsah teploty, ale k tomu ještě rozsah deformace od -1000 do 5000 μstrain . Braggovská vlnová délka druhé mřížky je nastavena na 1560 nm. Průběh simulace je na **obrázku 2.8**. Hodnoty k této simulaci jsou uvedeny v **tabulce 2.3**

Tabulka 2.3: Hodnoty k simulaci dvou FBG různě zatížené

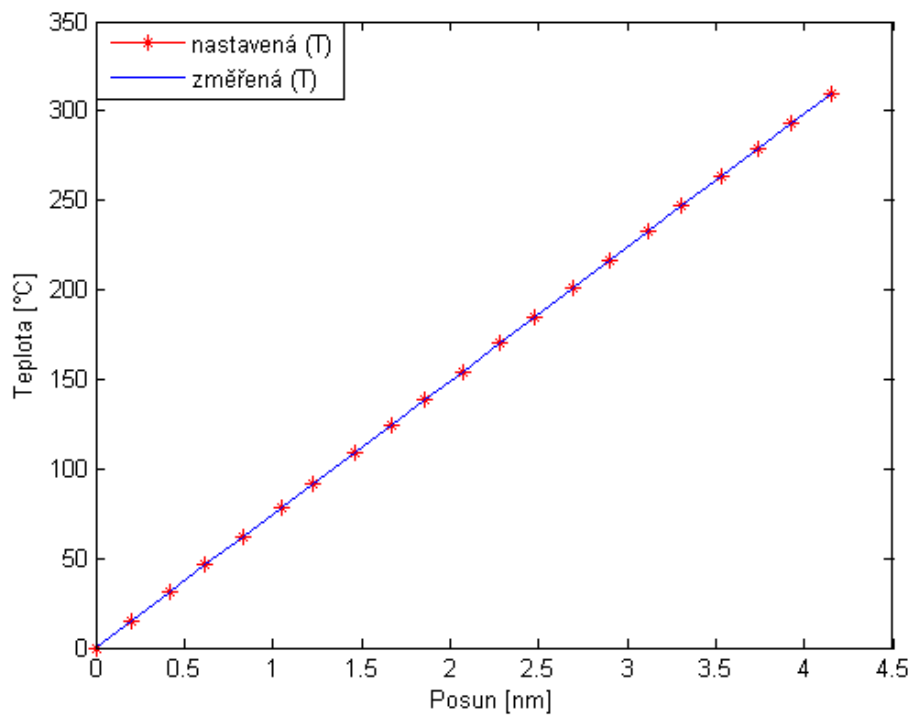
Vlnová délka FBG1 [nm]	Vlnová délka FBG2 [nm]	Teplota [°C]	Deformace [μstrain]
1548,96	1557,41	-100	-1000
1549,16	1558,08	-80	-700
1549,38	1558,76	-60	-400
1549,58	1559,43	-40	-100
1549,79	1560,09	-20	200
1550,01	1560,77	0	500
1550,19	1561,46	20	800
1550,42	1562,13	40	1100
1550,63	1562,82	60	1400
1550,82	1563,50	80	1700
1551,03	1564,17	100	2000
1551,24	1564,83	120	2300
1551,44	1565,53	140	2600
1551,65	1566,20	160	2900
1551,86	1566,88	180	3200
1552,08	1567,56	200	3500
1552,27	1568,23	220	3800
1552,49	1568,89	240	4100
1552,70	1569,59	260	4400
1552,89	1570,24	280	4700
1553,11	1570,94	300	5000



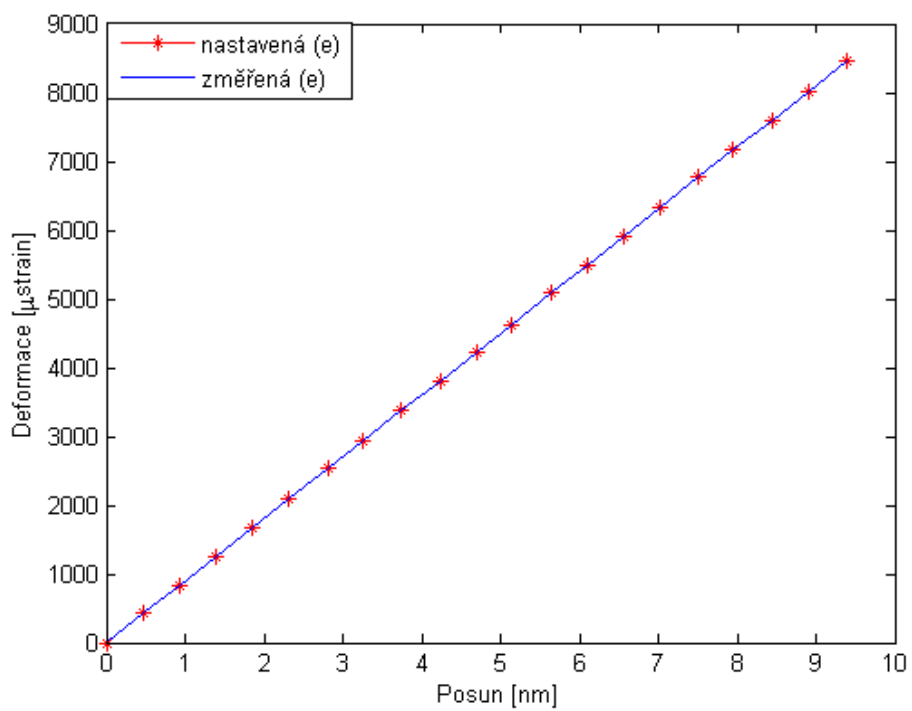
Obrázek 2.8: Průběh simulace dvou mřížek T a T+e



Obrázek 2.9: Závislost posunu braggovské vlnové délky na počtu kroků



Obrázek 2.10: Závislost teploty na posunu braggovské vlnové délky



Obrázek 2.11: Závislost deformace na posunu braggovské vlnové délky

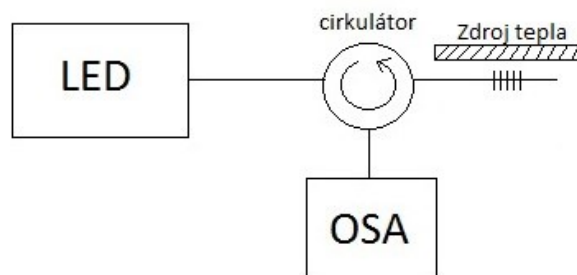
3 Měření

Tato kapitola bude zaměřena na reálné měření FBG. Jako první měření bude Braggovská mřížka užitá jako teplotní senzor, kde se bude zjišťovat teplotní citlivost mřížky. Ve druhé části této kapitoly bude druhá FBG použita jako senzor deformace, přičemž bude deformována, respektive natahována, na napínáku. Poslední část této kapitoly bude věnována současnému měření teploty a deformace, kde bude jedna Braggovská mřížka zatěžována teplotou a druhá FBG bude natahována na napínáku a zároveň na ni bude působit teplo.

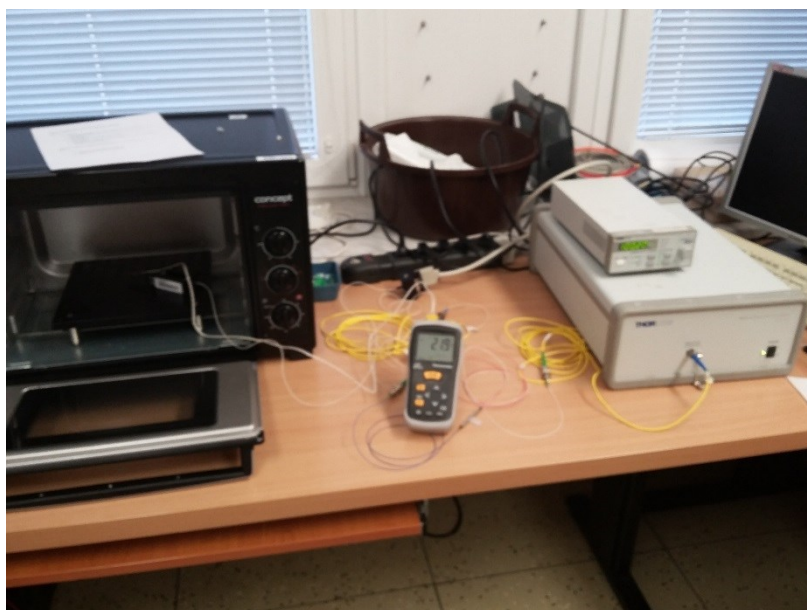
3.1 Teplotní senzor

Využití FBG jako teplotní senzor. Toto měření bude prováděno s pomocí horkovzdušné trouby a pomocí spektrálního analyzátoru Thorlabs a následně vyobrazeno přes software na PC.

3.1.1 Schéma zapojení a popis pracoviště



Obrázek 3.1: Schéma zapojení



Obrázek 3.2: Fotografie pracoviště

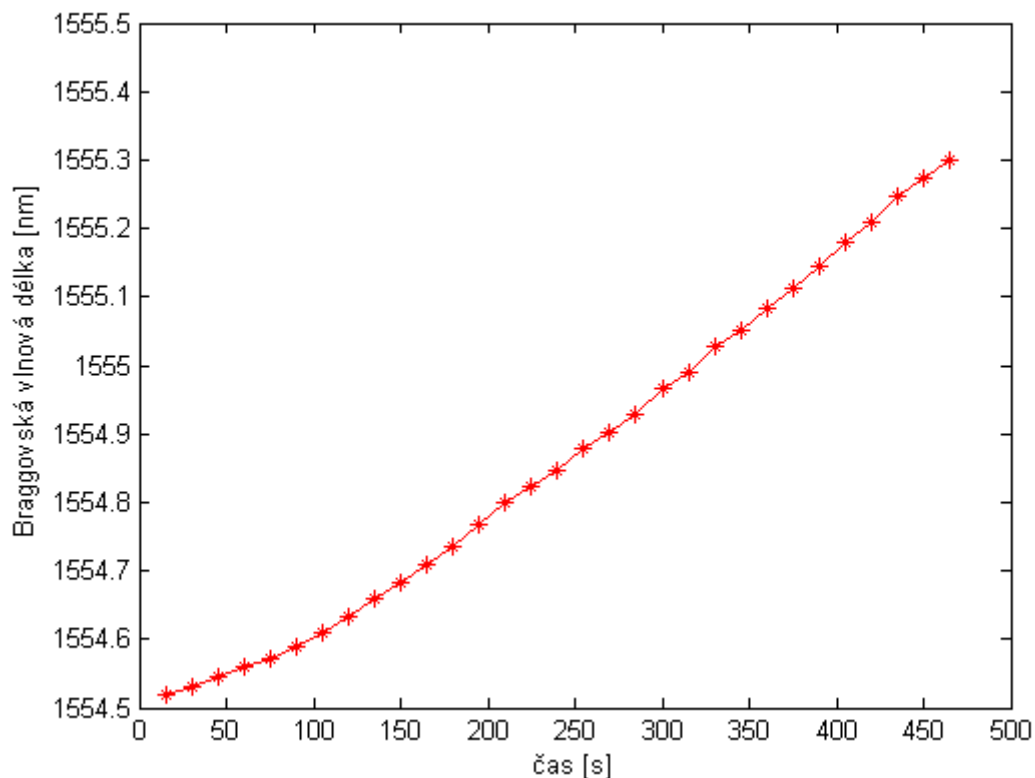
Laser svítí do vlákna s FBG přes cirkulátor, přičemž mřížka je spolu s čidlem teploměru v horkovzdušné troubě. Při změnách teploty se vrací odražená braggovská vlnová délka přes cirkulátor do spektrálního analyzátoru, který je spojen s notebookem, na kterém se vyobrazuje výsledek viz. **obrázek 3.1**. Na **obrázku 3.2** je fotografie pracoviště, kde lze vidět použité přístroje.

3.1.2 Měření časového zpoždění průchodu tepla do senzoru

V tomto měření je snímána teplota a posun vlnové délky každých 15 sekund. Nastaví se časovač na horkovzdušné troubě a zapisují se jednotlivé hodnoty. Měří se zhruba do 100°C. Vyhotovený graf závislosti braggovské vlnové délky na čase je na **obrázku 3.3**.

Tabulka 3.1: Hodnoty k měření časového zpoždění tepla do senzoru

T[°C]	λ_B [nm]	T[°C]	λ_B [nm]
26	1554,519	69	1554,767
27,4	1554,531	71,7	1554,799
32,3	1554,545	74,5	1554,823
35	1554,561	76	1554,846
39,2	1554,573	78	1554,878
43,8	1554,588	81	1554,902
47,4	1554,609	86,2	1554,929
52,56	1554,633	89,2	1554,966
56,3	1554,66	91,8	1554,991
58,9	1554,682	93,3	1555,027
63	1554,71	94,4	1555,051
65,9	1554,735	97,8	1555,082



Obrázek 3.3: Závislost braggovské vlnové délky na čase

3.1.3 Teplotní měření

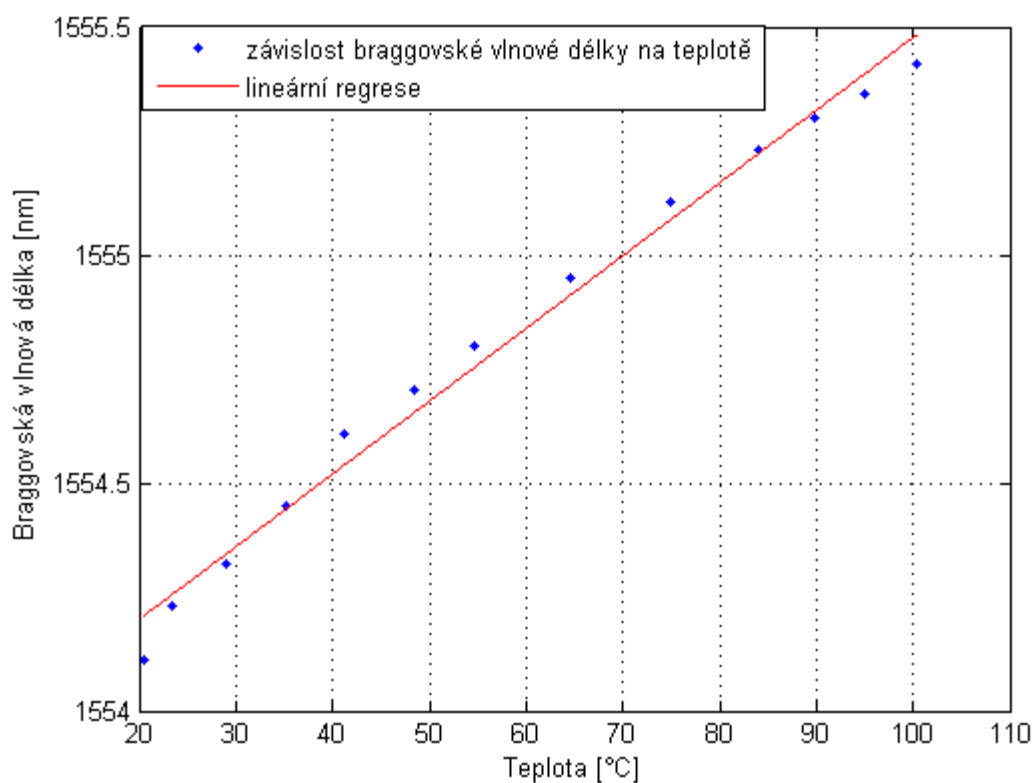
Na horkovzdušné troubě se nastaví teplota a při sledování teploměru se čeká, dokud se teplota neustálí, poté se zapíší hodnoty a následně se zvýší teplota. Tento postup se opakuje zhruba do 100°C. Poté se určí teplotní citlivost Braggovské mřížky a z hodnot **tabulky 3.2** se vyhotoví graf závislosti braggovské vlnové délky na teplotě s lineární regresí na **obrázku 3.4**.

Tabulka 3.2: Hodnoty k teplotnímu měření

T[°C]	λ_B [nm]	T[°C]	λ_B [nm]
20,6	1554,11	64,5	1554,951
23,5	1554,231	75	1555,116
29,1	1554,322	84,1	1555,23
35,2	1554,451	89,8	1555,301
41,3	1554,606	94,9	1555,355
48,5	1554,703	100,3	1555,421
54,6	1554,799		

Teplotní citlivost měřené FBG je vypočtena podle **vztahu 2.1** a vychází:

$$S = 16,449 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$$

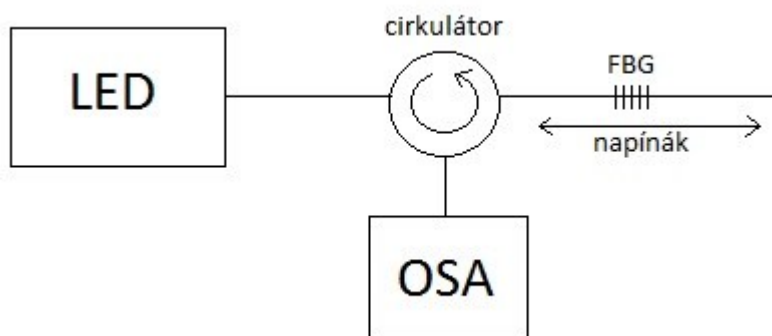


Obrázek 3.4: Závislost braggovské vlnové délky na teplotě + lineární regrese

3.2 Senzor deformace

Využití Braggovské mřížky jako senzor deformace. Vlákno s mřížkou bude natahováno v napínáku a odražené braggovské vlnové délky zobrazeny na spektrálním analyzátoru a zapsány do tabulky, ze které následně bude vypracovaný graf.

3.2.1 Schéma zapojení a popis pracoviště

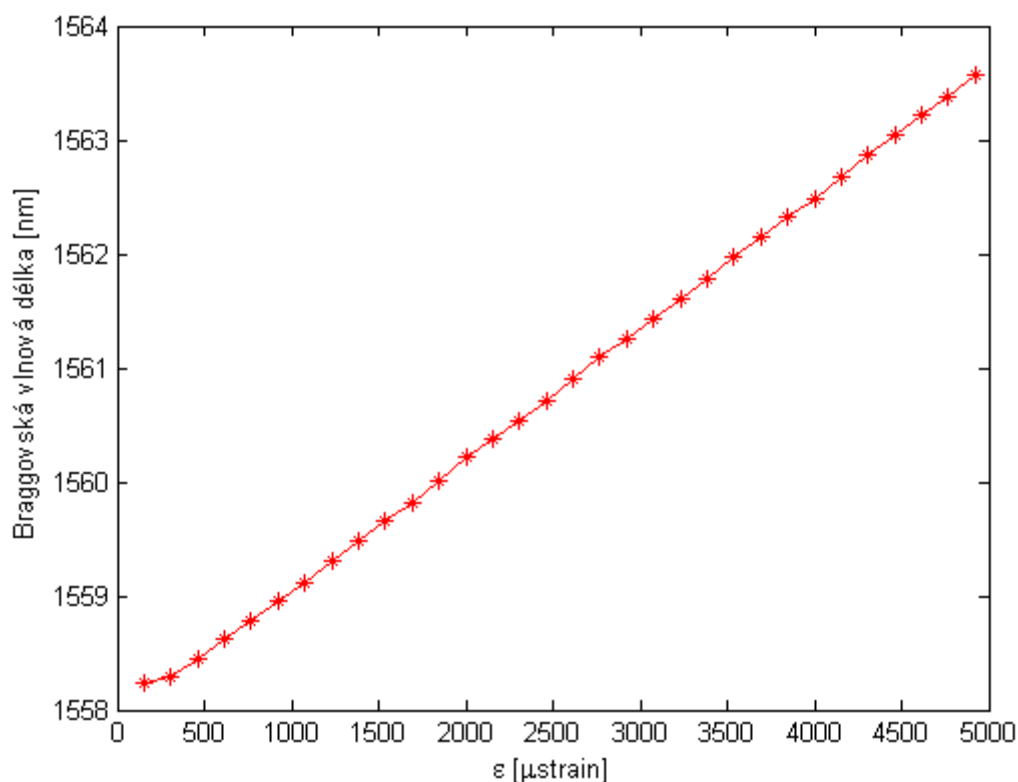


Obrázek 3.5: Schéma zapojení

Laser svítí přes cirkulátor do vlákna s mřížkou, přičemž vláknem s Braggovskou mřížkou upnutém v napínáku se přes cirkulátor vrací odražená braggovská vlnová délka z FBG do spektrálního analyzátoru, kde se vyobrazuje výsledek. Postupně je vlákno natahováno na napínáku a tím se zvyšuje působená deformace viz. **obrázek 3.5**.

3.2.2 Měření deformace

Prvním krokem bylo navaření pigtailu na jeden konec vlákna. K tomu bylo zapotřebí připravit dané vlákno s Braggovskou mřížkou na svaření. Příprava obnášela odstranění ochrany vlákna, následné zaříznutí a začištění. Po přichystání vlákna s mřížkou se musela připravit i druhá část svarového spoje, tedy pigtail. U pigtailu se provedou stejné kroky přípravy ke svařování jako u vlákna s mřížkou. Po dokončení příprav ke svařování je nasazena ochrana sváru, oba konce jsou vloženy do svářečky a svařeny. Nakonec dojde k zatavení ochrany sváru a přistoupení k samotnému měření. Do napínáku na **obrázku 3.8** je umístěno vlákno s mřížkou, dále byla zjištěna počáteční braggovská vlnová délka 1558,234 nm. Následně je vlákno natahováno po 0,1 mm a zaznamenávají se změny vlnové délky. Měření bylo provedeno celkem třikrát. Hodnoty ze všech tří provedených měření se zprůměrují, a vykreslí se do grafu závislosti braggovské vlnové délky na deformaci, na **obrázku 3.6**. Určíme deformační citlivost mřížky. Zprůměrované hodnoty jsou uvedeny v **tabulce 3.3**.



Obrázek 3.6: Závislost braggovské vlnové délky na deformaci

Deformační citlivost měřené FBG je vypočtena podle **vztahu 2.2** a vychází:

$$S = 1,117 \text{ pm}/\mu\text{strain}$$

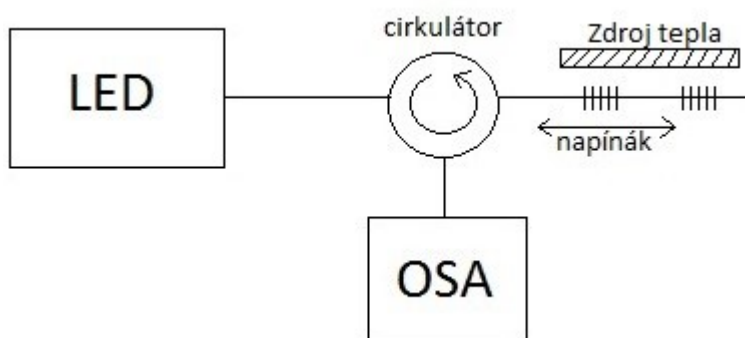
Tabulka 3.3: Zprůměrované hodnoty z měření deformace

Posun [mm]	Vlnová délka [nm]	Deformace [μ strain]	Posun [mm]	Vlnová délka [nm]	Deformace [μ strain]
0,1	1558,234	153,846	1,7	1560,903	2615,385
0,2	1558,287	307,692	1,8	1561,094	2769,231
0,3	1558,445	461,538	1,9	1561,258	2923,077
0,4	1558,62	615,384	2,0	1561,431	3076,923
0,5	1558,785	769,230	2,1	1561,598	3230,769
0,6	1558,948	923,076	2,2	1561,780	3384,615
0,7	1559,113	1076,923	2,3	1561,973	3538,462
0,8	1559,315	1230,769	2,4	1562,145	3692,308
0,9	1559,480	1384,615	2,5	1562,323	3846,154
1,0	1559,650	1538,462	2,6	1562,487	4000
1,1	1559,823	1692,308	2,7	1562,679	4153,846
1,2	1560,007	1846,154	2,8	1562,865	4307,692
1,3	1560,214	2000	2,9	1563,039	4461,538
1,4	1560,370	2153,846	3,0	1563,214	4615,385
1,5	1560,542	2307,692	3,1	1563,377	4769,231
1,6	1560,710	2461,538	3,2	1563,563	4923,077

3.3 Současné měření teploty a deformace

Při současném měření budou užity dvě Braggovské mřížky, jedna mřížka bude zatížena teplotou a druhá teplotou i deformací podobně jako ve třetí simulaci. Mřížka 1554 nm bude sloužit jako teplotní senzor a druhá mřížka s 1558 nm bude zatížena oběma veličinami. V tomto měření bude zapotřebí jiného zdroje tepla, než byl použit u samostatného teplotního měření, jelikož napínák z měření deformace by se do horkovzdušné trouby nevešel, proto byla zvolena 30 let stará žehlička, která nahradí výše zmíněnou troubu. Fotografie pracoviště je na **obrázku 3.9**, přičemž detail mřížek pod žehličkou je na **obrázku 3.10**.

3.3.1 Schéma zapojení a popis pracoviště



Obrázek 3.7: Schéma zapojení pracoviště

Laser svítí přes cirkulátor do vlákna s mřížkou které je natahováno na napínáku, a také je tato FBG zatížena teplotou, dále světlo pokračuje druhým koncem vlákna do druhé mřížky, která je jen zatížena teplotou, přes cirkulátor se vrací odražené braggovské vlnové délky do spektrálního analyzátoru a z něj do notebooku, kde se zobrazuje výsledek viz. **obrázek 3.7**.



Obrázek 3.8: Fotografie napínáku

3.3.2 Současné měření teploty a deformace

K tomuto měření bylo nezbytné navařit pigtail na druhý konec vlákna, jelikož u předchozího měření, neboli u měření deformace, byl pigtail navařen jen na jeden konec vlákna, ale protože je zapotřebí mít zakončení na obou koncích vlákna, tudíž se navaří i druhý pigtail. Popis přípravy na svár je podrobněji uveden v předchozím měření. U samotného měření je jedna Braggovská mřížka zatížena jen teplotou, a druhá teplotou zároveň s deformací. FBG s 1558 nm je uchycena v napínáku a také na ni působí teplo ze zdroje tepla, přitom je pomalu napínána po 25 dílcích, kde 0,01 mm je 1 dílek, přičemž druhá Braggovská mřížka s 1554 nm je jen ovlivňována zdrojem tepla. Postupem měření se zvyšuje teplota ovlivňující obě mřížky, a také deformace. Při zvýšení teploty na žehličce dochází k razantnímu nárůstu teploty, čekalo se na ustálení a poté se zapisovaly hodnoty, ale hliníková konstrukce napínáku rychle odvádí teplo, tudíž dochází i k rychlému chladnutí. Hodnotami jsou uvedeny v **tabulce 3.4**.

Tabulka 3.4: Hodnoty k současnému měření teploty a deformace

λ_{B1} [nm]	λ_{B2} [nm]	T [°C]	merT [°C]	ε [μstrain]	$\text{mer}\varepsilon$ [μstrain]	Krok
1554,16	1559,31	27,4	27,4	0	0	1
1554,16	1559,73	27,4	27,4	370,37	372,97	2
1554,13	1560,17	27,4	25,6	740,74	788,36	3
1554,58	1560,51	60	59,2	740,74	787,52	4
1554,56	1560,49	57,1	57,7	1111,11	779,48	5
1554,55	1560,88	55,2	56,5	1481,48	1142,38	6
1554,53	1561,33	53,4	55,2	1851,85	1563,83	7
1554,52	1561,72	52,5	54,7	2222,22	1920,16	8
1554,89	1562,11	87,7	82,3	2222,22	2021,85	9
1554,88	1562,57	84,7	81,2	2592,59	2446,67	10
1554,86	1562,94	81,7	80,1	2962,96	2787,26	11
1554,81	1563,35	76,5	75,8	3333,33	3199,84	12
1555,16	1563,79	108,6	102,4	3333,33	3345,71	13
1555,14	1564,17	105	100,8	3703,70	3710,20	14
1555,11	1564,56	100,7	98,4	4074,07	4082,38	15
1554,94	1564,42	84,1	85,5	4074,07	4075,53	16
1555,22	1564,78	116,3	106,8	4074,07	4203,63	17
1555,21	1565,16	110,4	105,7	4444,44	4557,28	18
1555,13	1565,52	100,5	100,1	4814,81	4926,90	19
1555,05	1565,43	92,2	94	4814,81	4902,62	20
1554,91	1565,31	80,4	83,8	4814,81	4892,95	21
1554,86	1564,89	76,3	80,1	4444,44	4541,54	22
1554,79	1564,38	71,1	74,6	4074,07	4130,52	23
1554,77	1563,98	69,7	73,5	3703,70	3784,85	24
1554,76	1563,47	68,4	72,3	3333,33	3335,36	25
1554,74	1563,06	67,1	70,8	2962,96	2981,37	26

1554,72	1562,63	65,6	69,4	2592,59	2605,31	27
1554,70	1562,22	64	67,7	2222,22	2247,05	28
1554,67	1561,72	61,3	65,5	1851,85	1823,28	29
1554,65	1561,32	60,2	64	1481,48	1477,40	30
1554,63	1560,86	59	62,9	1111,11	1072,49	31
1554,58	1560,52	55,6	58,8	740,74	799,03	32
1554,55	1560,49	53,2	56,5	740,74	795,53	33
1554,53	1560,66	52,4	55,6	1111,11	952,33	34
1554,50	1560,62	49,2	52,9	1111,11	943,44	35
1555,22	1561,24	107	106,8	1111,11	1016,24	36
1555,19	1561,65	102,7	104,7	1481,48	1404,62	37
1555,16	1562,06	99,1	102,2	1851,85	1789,19	38
1555,14	1562,46	96,4	100,9	2222,22	2162,67	39
1555,13	1562,9	94,5	99,8	2592,59	2569,48	40
1555,00	1563,2	83,8	90,5	2962,96	2925,53	41
1554,98	1563,61	81,6	88,5	3333,33	3313,23	42
1554,94	1564,02	79,5	85,6	3703,70	3712,01	43
1554,92	1564,45	78	84,3	4074,07	4108,02	44
1554,90	1564,86	76,9	82,9	4444,44	4486,91	45

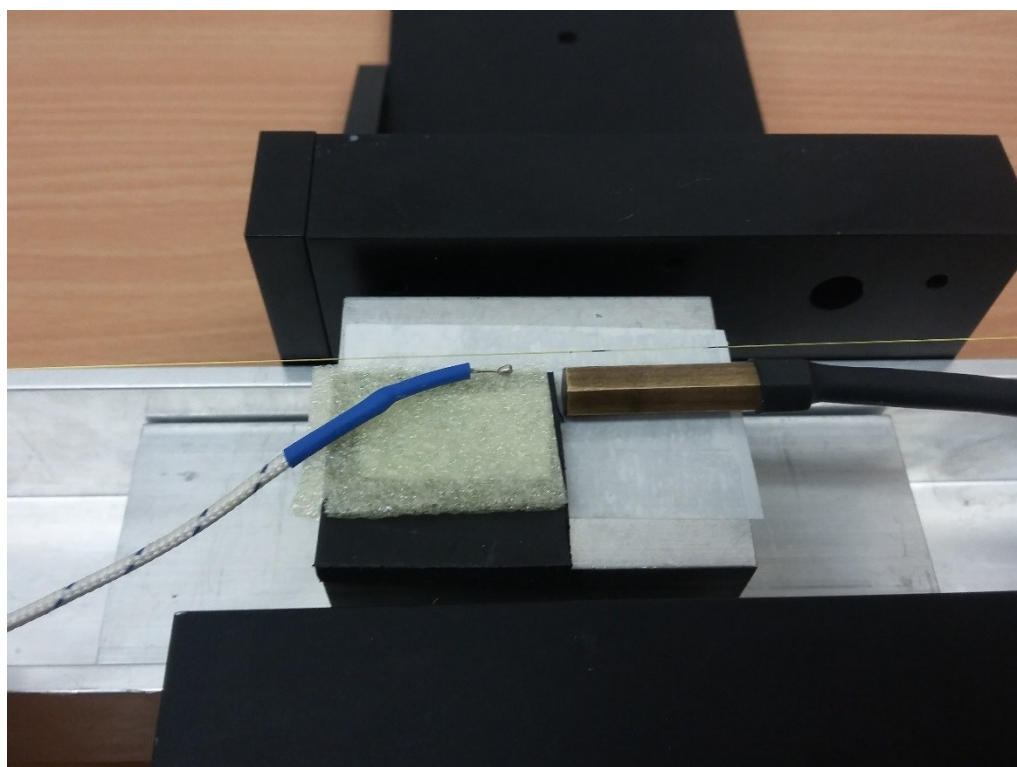
Graf závislosti braggovských vlnových délek na počtu kroků obou mřížek se nachází na obrázku 3.11. Srovnání průběhů měření teploty nastavené proti naměřené znázorněno na **obrázku 3.12** a průběh měření deformace, také se srovnáním nastavené a naměřené zátěže je na **obrázku 3.13**.

Na **obrázku 3.14** je vyobrazena chyba teploty, přičemž maximální chyba byla kolem 10 °C a vypočítaná průměrná chyba teploty vyšla -1,58 °C.

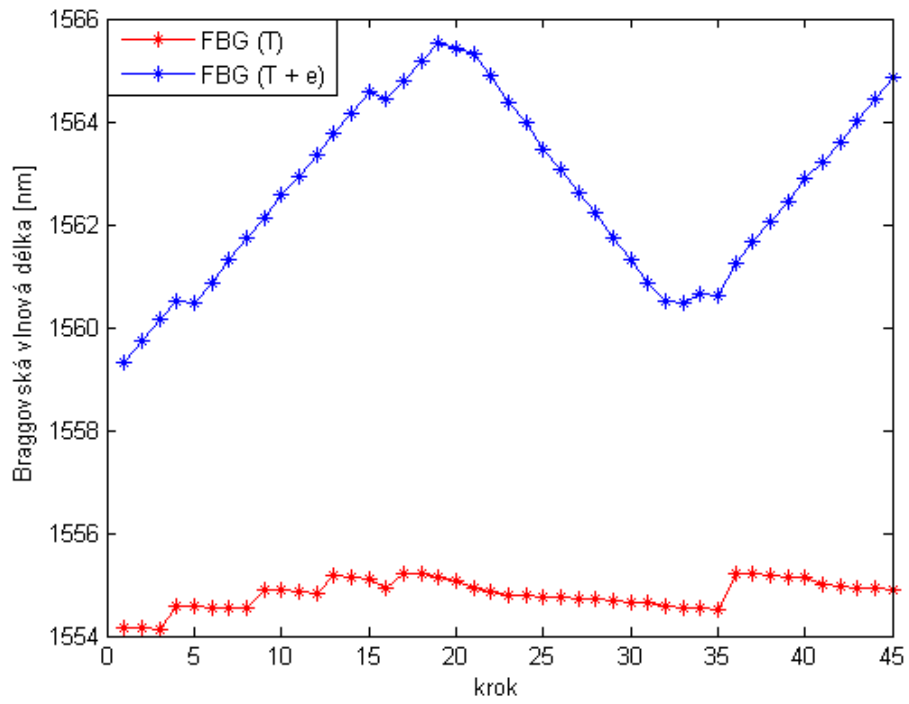
Obrázek 3.15 je chyba deformace, kde maximální chyba dosahuje 340 μ strain a průměrná chyba je 34,48 μ strain.



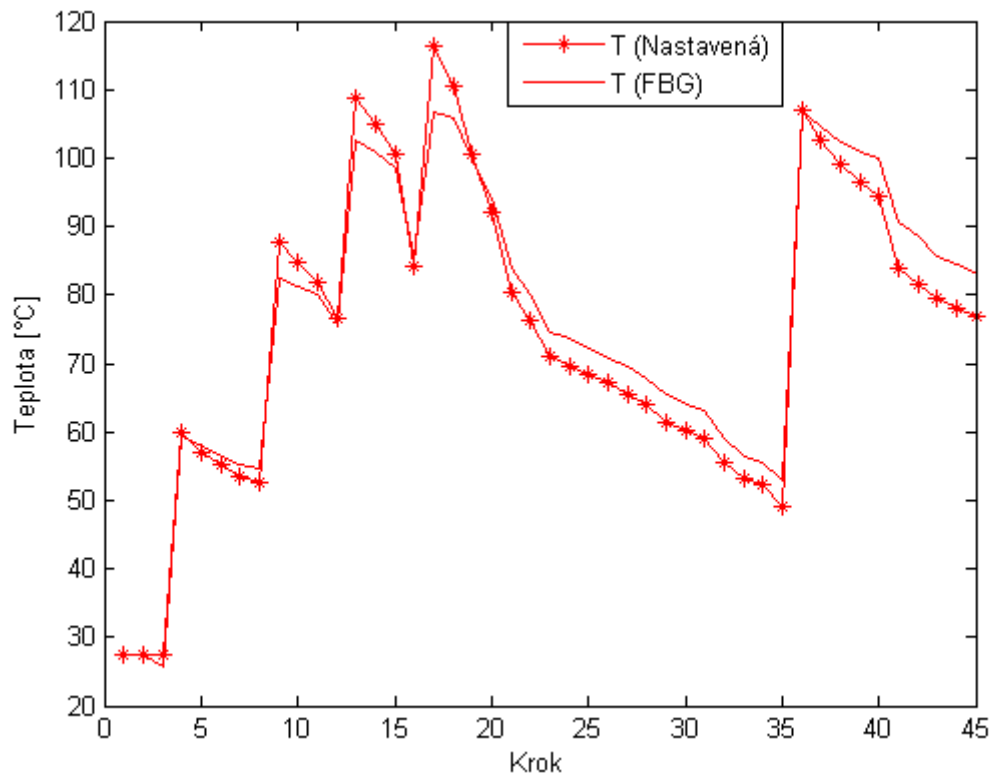
Obrázek 3.9: Fotografie pracoviště



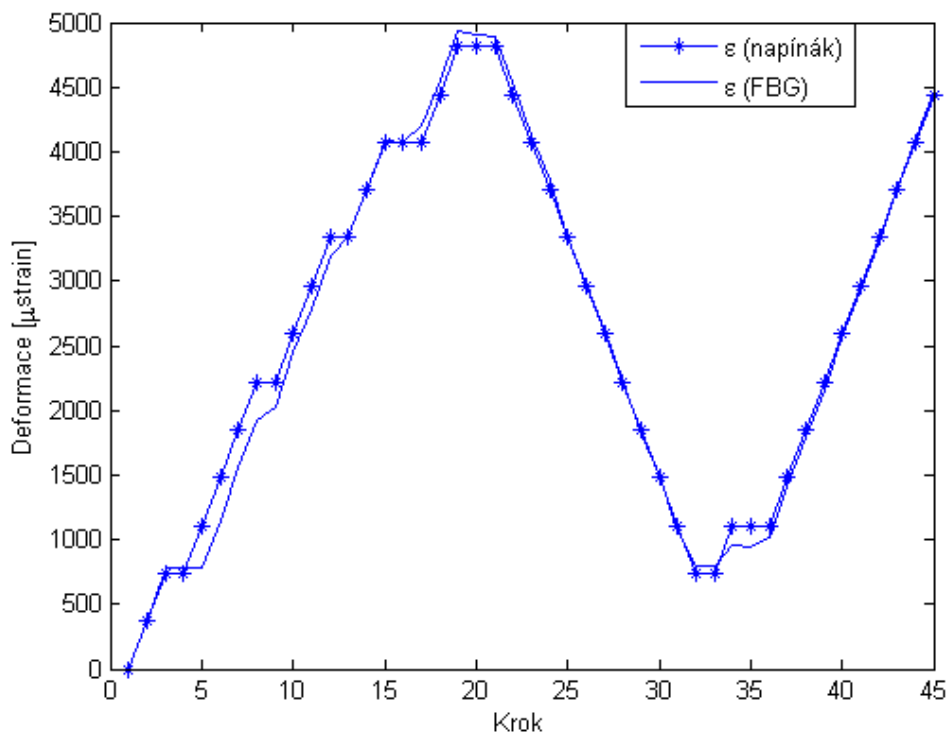
Obrázek 3.10: Detail umístění mřížek pod zdrojem tepla



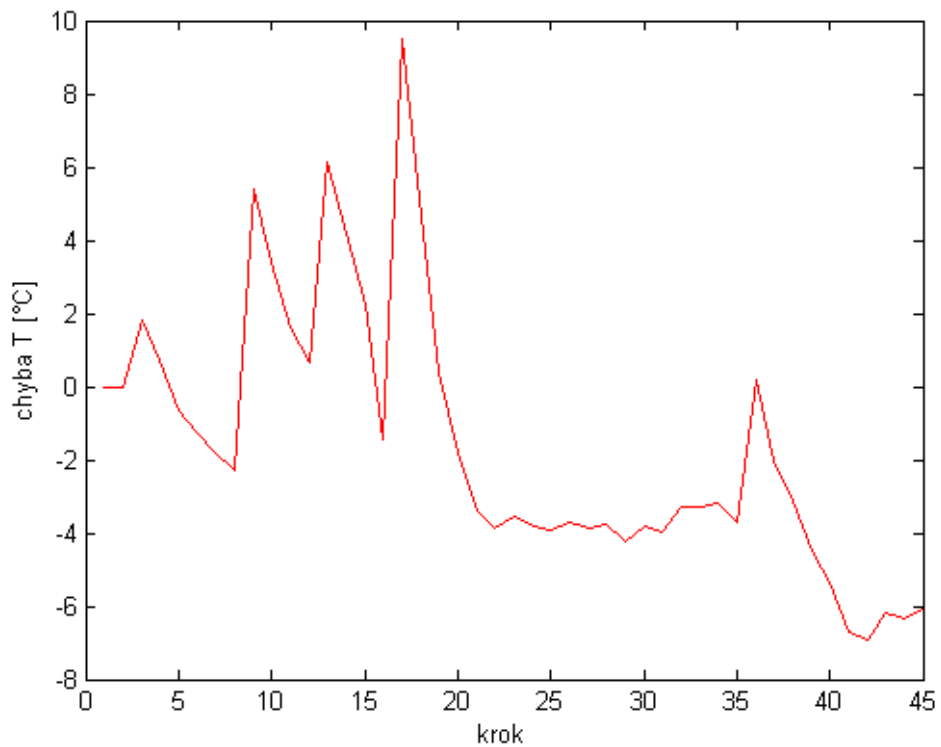
Obrázek 3.11: Závislost braggovské vlnové délky na počtu kroků



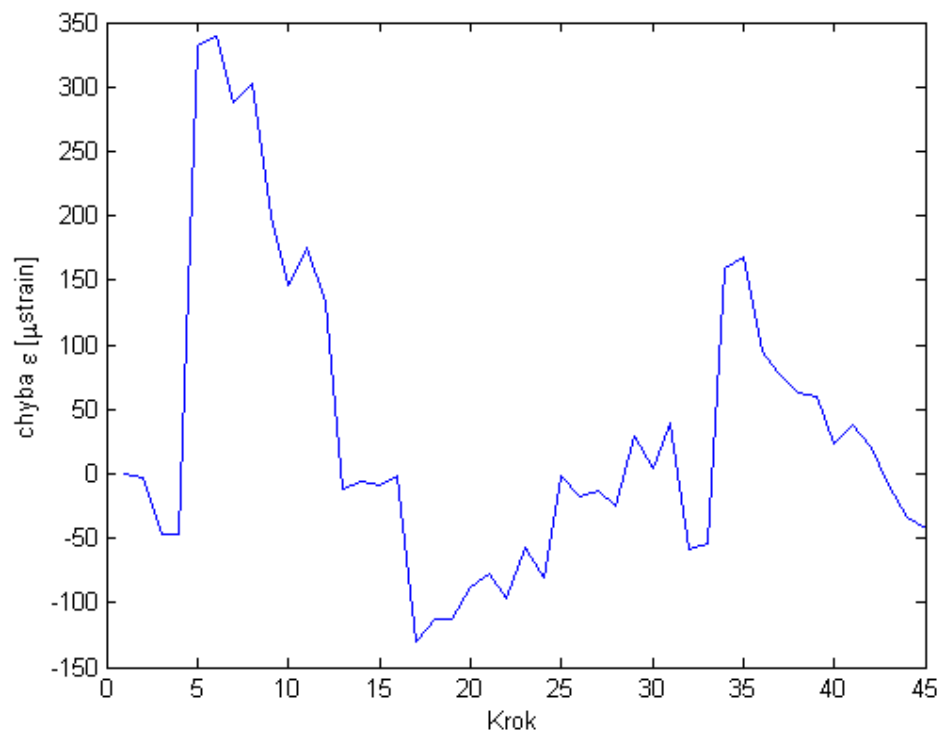
Obrázek 3.12: Průběh měření teploty



Obrázek 3.13: Průběh měření deformace



Obrázek 3.14: Chyba teploty



Obrázek 3.15: Chyba deformace

Závěr

Tato práce se věnovala optovláknovým senzorům založeným na Braggovských mřížkách. Stěžejní částí byla studie křížové citlivosti na teplotu a deformaci. Nejprve byla provedena simulace, ve které byly ověřeny matematické a funkční principy uvedené v teoretické části. V závěru práce byly navržené metody ověřeny experimentálním měřením.

Prvním cílem bylo popsání teorie Braggovských mřížek, které je uvedeno v první kapitole Braggovské mřížky. V teorii byl uveden základní princip Braggovské mřížky, dále vysvětlen pojem křížová citlivost a její případy. Popis mechanické zátěže a teplotní citlivosti Braggovských mřížek a v poslední řadě výroba. K výrobě FBG byly popsány čtyři metody, kterými jsou vnitřní zapisování, interferometrická metoda, fázová maska a bod po bodu.

Dalším cílem byl návrh metod současného měření teploty a mechanického napětí Braggovskou mřížkou. Toto bylo provedeno v softwaru OptiSystem, kde byl navržen vlastní blok skládající se ze dvou Braggovských mřížek a coupleru, tyto bloky byly užity dva a zapojeny sériově za sebou. Každý z bloků představoval jeden senzor s Braggovskou mřížkou. U bloku bylo možné nastavit následující parametry: teplota, deformace a vlnová délka a další parametry popisující materiální vlastnosti Braggovské mřížky. Pomocí těchto bloků a zapojení navrženého v softwaru OptiSystem byly provedeny tři simulace pro jednotlivé případy měření. V první simulaci se analyzoval vliv teploty na Braggovskou vlnovou délku. Ve druhé simulaci byla Braggovská mřížka ovlivněna deformací. A na závěr ve třetí simulaci byly použity dvě mřížky, kdy jedna z FBG byla zatížena čistě teplotou a druhá Braggovská mřížka teplotou s deformací. V této kapitole byl ověřen princip křížové citlivosti pomocí simulací.

Závěrem bylo provedeno experimentální měření teploty a deformace s Braggovskou mřížkou. Tento cíl odpovídá třetí kapitole, kde jsou provedeny celkem tři měření s mřížkami. V prvním měření byla použita mřížka s 1554 nm jako teplotní senzor pro určení teplotní citlivosti. Ve druhém měření figurovala mřížka s 1558 nm jako senzor deformace, abychom mohli určit deformační citlivost dané mřížky. Toto měření bylo provedeno celkem třikrát a hodnoty z měření byly zprůměrovány. Nakonec bylo provedeno současné měření teploty a deformace s oběma předchozími mřížkami, kde mřížka s 1554 nm sloužila čistě jako teplotní senzor, tudíž byla zatížena jen teplotou a druhá Braggovská mřížka s 1558 nm byla vystavena jak deformaci, tak i teplu. Princip křížové citlivosti byl ověřen reálným měřením a také byl využit především u současného měření teploty a deformace, kde s jeho pomocí byli vypočítány potřebné hodnoty. U třetího měření byly vypočítány chyby teploty a deformace, kde maximální chyba teploty dosahovala až 10 °C a maximální chyba deformace byla kolem 340 μ strain.

Použitá literatura

- [1] **OTHONOS, Andreas a Kyriacos KALLI.** Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. Boston, Mass.: Artech House, c1999, xiv, 422 p. ISBN 08-900-6344-3
- [2] **KROHN, D.** Fiber optic sensors: fundamentals and applications. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, c1988, 239 p. ISBN 08-766-4997-5.
- [3] **ŠIŠKA, Petr a František HANÁČEK.** Nekomunikační Aplikace Optických Vláken [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/index.php/vyuka/stazeni>
- [4] **KASHYAP R.,** Fiber Bragg gratings, Academic Press, San Diego, 1999
- [5] Optiwave. OptiSystem Lite 1.0 : Technical Descriptions [online]. 2015. Dostupné z: <https://dSPACE.ist.utl.pt/bitstream/2295/42444/1/OptiSystem%20Lite%201.pdf>
- [6] **FAJKUS, Marcel.** Braggovské mřížky [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://optice.vsb.cz/mfajkus/index.php/optika/braggovski-mrizky>
- [7] Wikipedia. En.wikipedia.org [online]. [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_gratings