

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikačnej techniky**

**Štúdium senzorických vlastností Braggovskej mriežky uloženej na
membráne reproduktora
Study of the Bragg grating sensory properties placed at
reproducer's membrane**

2015/2016

Bc. Ján Matejčík

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ján Matejčík**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Studium senzorických vlastností Braggovské mřížky upevněné k membráně reproduktoru**
Study of the Bragg Grating Sensory Properties Placed at Reproducator's Mebrane

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor použití Braggovských mřížek jako senzorů.
2. Realizace experimentální sestavy s Braggovskou mřížkou upevněnou k membráně reproduktoru.
3. Experimentální ověření citlivosti a frekvenční odezvy Braggovské mřížky upevněné k membráně reproduktoru.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] RAMAN, K.: Fiber Bragg Gratings, Second Edition (Optics and Photonics Series), 632 pages, Academic Press; 2 edition (November 18, 2009), ISBN 978-0123725790
- [2] OTHONOS A., KALLI, K.: Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing (Artech House Optoelectronics Library), 433 pages, Artech House Publishers (June 1999), ISBN 978-0890063446


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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Šiška, Ph.D.**


Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016





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

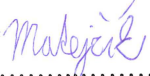


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

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

Dňa: 25.04.2016


.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval Ing. Petrovi Šiškovi, Ph.D. za odbornú pomoc a konzultácie pri vytváraní tejto diplomovej práce. Za odborné rady by som rad poďakoval pánom doktorandom Ing. Jakubovi Čubíkovi a Ing. Stanislavovi Kepákovi.

Abstrakt

Táto práca je zameraná na štúdium senzorických vlastností FBG s rôznymi parametrami v závislosti na sile napnutia vlákna. Práca obsahuje jednotlivé aplikácie používané v praxi. Praktická časť je zložená z návrhu a realizácie experimentálnej zostavy a z experimentálneho merania citlivosti v závislosti na umiestnení vlákna na membráne. V experimente bolo vlákno napínané rôznymi silami a bolo dokázané, že zväčšovaním sily sa citlivosť FBG zlepšila.

Kľúčové slová

Vlákno s Braggovou mriežkou, membrána reproduktora, experimentálna zostava, citlivosť.

Abstract

The thesis is focused on study of FBG sensory features with different parameters regarding to the tension force of the optical fibre. The thesis includes commonly used software solutions. The practical part is composed of design and realization of an experimental assembly and experimental sensitivity measurement regarding to the optical fibre membrane position. The fibre was tensed with different powers of tension. The measurement proved that FBG sensitivity grows higher with increasing tension power.

Keywords

Fiber Bragg grating, reproductor's membrane, experimental assembly, sensitivity.

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
F	N	Sila
c	m/s	Rýchlosť svetla
f	Hz	Frekvencia
mol	mol	Látkove množstvo
n	-	Index lomu
t	°C	Teplota
λ	m	Vlnová dĺžka

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovensky význam
CCD	Charge-Coupled Device	Zariadenie s viazanými nábojmi
DWDM	Dense Wave Division Multiplex	Hustý vlnovo delený multiplex
EMI	Electromagnetic Interference	Elektromagnetické rušenie
FBG	Fibre Bragg Grating	Vlákno s Bragg. mriežkou
FRP	Fibre - Reinforced Polymers	Polyméry vystužené vláknami
RCFC	Reinforced Carbon Fibre Composites	Uhlíkový kompozit
SBG	Simple Bragg Gratings	Jednoduché Braggove mriežky
OSA	Optical Spectrum Analyser	Optický spektrálny analyzátor

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Braggove mriežky	2
2.1	Vlákno s Braggovskou mriežkou	2
2.2	Historický pohľad.....	3
2.3	Externe modelované Braggove mriežky.....	4
2.4	Optické vlákno a jeho fotocitlivosť	5
2.5	Kremíkové optické vlákna a ich fotocitlivosť	6
2.5.1	Braggova mriežka typ I	7
2.5.2	Braggova mriežka typ IIA	8
2.5.3	Braggova mriežka typ II.....	9
2.5.4	Teplotná závislosť rozpadu Δn	10
2.6	Jednoduché Braggove mriežky (SBG)	11
2.7	Uniformne Braggove mriežky (UBG).....	12
2.8	Citlivosť na teplotu a namáhanie.....	14
2.9	Oneskorenie - fázové a skupinové.....	16
2.10	Ďalšie vlastnosti mriežok vo vláknach	17
2.10.1	Vyžarovanie svetla	18
2.10.2	Apodizované mriežky vo vlákne	19
2.11	Typ Braggovej mriežky vo vlákne	19
2.11.1	Braggov reflektor.....	20
2.11.2	Naklonené Braggove mriežky	21
2.11.3	Čirpované Braggove mriežky.....	23
3	Použitie FBG senzorov.....	25
3.1	Aplikácie v leteckom inžinierstve	25
3.1.1	Použitie senzorov na princípe Braggovej mriežky v lietadlách.....	26
3.2	Sledovanie zosilnených štruktúr z uhlíkových vlákien - tvrdnutie a naraz	26
3.2.1	Použitie FBG pre námorníctvo	32
3.2.2	Aplikácie v stavebníctve a monitorovanie štruktúr	32
3.2.3	Aplikácie na mostoch	33
3.2.4	Údržba štruktúr a aplikácie v tuneloch a podzemných stavbách	36

3.3	FBG senzory pre zdravotníctvo.....	37
4	Realizácia experimentálnej zostavy	38
4.1	Vyčítanie hodnôt z amplitúdovo frekvenčnej charakteristiky repro.....	41
4.2	Popis tvorenia grafov.....	43
5	Výsledky merania č.1 a popis.....	46
5.1	Špecifikácie merania č.1.....	46
5.2	Výsledné grafy z merania č.1	47
5.2.1	Napnutie FBG so silou 1 N.....	47
5.2.2	Napnutie FBG so silou 1,5 N.....	48
5.2.3	Napnutie FBG so silou 2 N.....	49
5.2.4	Rôzne napnutia FBG č.1.....	50
5.3	Zhodnotenie výsledkov z merania č.1	51
6	Výsledky merania č.2 a popis.....	52
6.1	Špecifikácie merania č.2.....	52
6.2	Výsledné grafy z merania č.2	53
6.2.1	Napnutie FBG so silou 1 N.....	53
6.2.2	Napnutie FBG so silou 1,5 N.....	54
6.2.3	Napnutie FBG so silou 2 N.....	55
6.2.4	Rôzne napnutia FBG č.2.....	56
6.3	Zhodnotenie výsledkov z merania č.2	57
7	Výsledky merania č.3 a popis.....	58
7.1	Špecifikácie merania č.3.....	58
7.2	Výsledné grafy z merania č.3	59
7.2.1	Napnutie FBG so silou 1 N.....	59
7.2.2	Napnutie FBG so silou 1,5 N.....	60
7.2.3	Napnutie FBG so silou 2 N.....	61
7.2.4	Rôzne napnutia FBG č.3.....	62
7.3	Zhodnotenie výsledkov z merania č.3	63
8	Záver.....	64
	Použitá literatúra	66
	Zoznam príloh na CD:	67

1 Úvod

Optické vlákno s mriežkou (FBG) sa vyznačuje periodickou zmenou indexu lomu v jadre vlákna. Svetlo je u týchto vlákien nadviazané do jadra optického vlákna a je následne odrazené, ak je jeho vlnová dĺžka rovná Braggovskej vlnovej dĺžke. V opačnom prípade svetelný lúč prejde mriežkou.

Diplomová práca je zo začiatku zameraná na teoretickú oblasť FBG. Konkrétne v kapitole č. 2 je spomenuté aké druhy FBG existujú a aké vlastnosti a veličiny dokážu tieto snímače detekovať. Neskôr v texte je možné sa dočítať aj o aplikáciách Braggových mriežok v praxi. Kapitola č. 3 je zameraná na použitie v jednotlivých odvetviach ako je napr. letectvo, stavebníctvo a možno pre niekoho prekvapivo aj zdravotníctvo.

Hlavnou úlohou tejto práce bola realizácia experimentálnej zostavy, kde FBG bude umiestnená na membráne reproduktora. Po umiestnení vlákna na membránu bolo nutné experimentálne overenie citlivosti na jednotlivé kmitočty. Kapitola č. 4 popisuje riešenie a aj určité potrebné úkony, ktoré budú neskôr použité pri vyhodnocovaní výsledkov. Tieto úkony sú myslené v zmysle získania hodnôt z amplitúdovo frekvenčnej charakteristiky reproduktora a následné prevedenie na percentuálne hodnoty. Prepočet na percentá bol dôležitý z pohľadu vyhodnotenia, pretože vo výsledku budú vynesené v grafe percentuálne pomery nameraných hodnôt a hodnôt z amplitúdovo frekvenčnej charakteristiky. Týmto sa dosiahne to, že ak má mriežka frekvenčnú odozvu na určitom kmitočte, tak hodnota percentuálneho pomeru musí byť nad 1. Pokiaľ sú pomery pod touto hodnotou tak vlákno s Braggovou mriežkou na tejto frekvencii nereaguje dostatočne.

Čo sa týka vyhodnocovania výsledkov, tak tie čitateľ nájde v kapitolách 5 až 7. Každá z týchto kapitol má vždy špecifikácie pre konkrétne meranie. Špecifikácie v zmysle toho, že v každom meraní bude použité vlákno s odlišnými parametrami odrazivosti a šírky spektra. Každé jedno meranie bude uskutočnené na membráne reproduktora a bude napínané pomocou čelusti silomera od 1 N do 2 N s krokom 0,5 N. Vo vyhodnotení je zahrnuté aj umiestnenie vlákna na membráne. Jednotlivé rozdiely vo vláknach a rozdiely v umiestnení sú popísané v zhodnoteniach výsledkov. Ako sa neskôr ukáže, umiestnenie na membráne v strede alebo na okraji má vplyv na citlivosť mriežky, ale najväčší vplyv má vo výsledku sila napnutia FBG, kde sa vďaka väčšej sile citlivosť zlepšuje.

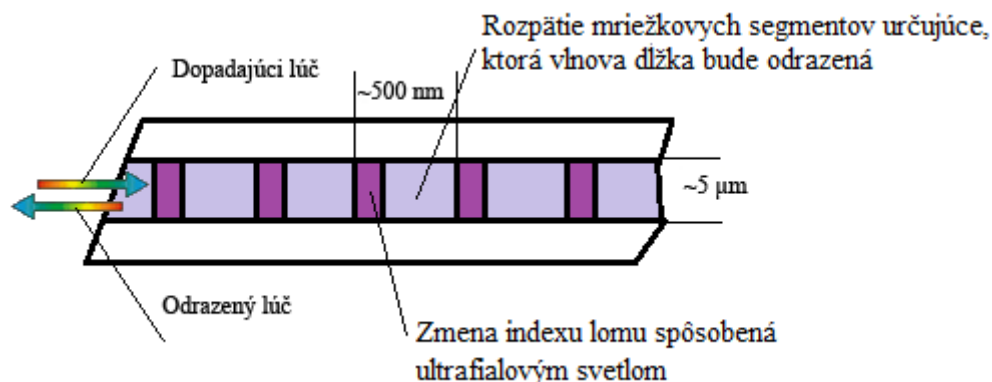
2 Braggove mriežky

2.1 Vláknó s Braggovskou mriežkou

Vzhľadom nato, že dopyt po vysokorychlostných širokopásmových prenosoch rástol, tak bolo treba prejsť na použitie vláknovej optiky. Jedna z kľúčových technológií spojená s optickými prenosmi je vlákňová Braggovska mriežka. Je to typ jednomódového vlákna, ktoré obsahuje štruktúru s periodickou zmenou indexu lomu v jadre. Ak máme periódu mriežky Λ rovnú polovici vlnovej dĺžky signálu na vstupe, tak prvotná vlnová dĺžka bude odrazená neprerušovane pre vytvorenie väčšieho odrazu. Odrazená vlnová dĺžka je definovaná ako (λ_B) a je určená vzorcom :

$$\lambda_B = 2 * n * \Lambda, \quad (2.0)$$

kde n je efektívny index lomu v jadre a Λ je perióda mriežky. Vláknó s rovnomerným rozložením indexu lomu so segmentmi vzdialenými 500 nm v mriežke spôsobí odrazenie cca 1500 nm. Vid' Obr.1.1.



Obr.1.1: Rovnomerné rozloženie indexu lomu vo vlákne

V podstate existujú tri veličiny, ktoré menia vlastnosti vlákna s Braggovskou mriežkou. Jedna sa konkrétne o index lomu, periódu segmentov a o dĺžku mriežky. V týchto vlastnostiach sú zahrnuté ďalšie tri vlastnosti a to je: odrazivosť, šírka pásma, postranné maxima. Zmena indexu lomu pozdĺž osi vlákna je buď to rovnomerná, apodizovaná alebo špeciálna zmena nazývaná ako čirpovaná. Výhodou apodizovanej mriežky je potlačanie postranných pásiem pri zvýšenej odrazivosti a rozšírení konkrétneho pásma. Tretia v poradí je spomínaná tzv. čirpovaná mriežka, ktorá má lineárnu zmenu v perióde mriežky a ta rozšíri šírku odrazeného spektra signálu. Jednotlivá zmena periódy v mriežke spôsobuje to, že každá vlnová dĺžka je odrážaná na odlišných miestach v mriežke a to je v podstate

podmienkou rôznych oneskorení. Toto sa využíva často na kompenzovanie chromatickej disperzie [1][2].

Pre konvenčne vlákno s Braggovou mriežkou je známe, že periodičita modulácie indexu lomu je polovica vlnovej dĺžky svetla odrážaného od mriežky cez vlákno naspäť. Takéto odrazy, ktoré sa približujú k sto percentám je možné uskutočniť na šírkach pásma cca od desatiny po takmer stovky nanometrov. Vlákno s takýmito vlastnosťami je vhodné pre telekomunikácie na odrazenie, rozptyľovanie a filtrovanie svetla. Braggova mriežka sa využíva aj pri formovaní laserov, ktoré sú schopné vytvárať svetlo do telekomunikačných časových okien. Mriežky s rôznou periódou umožňujú komprimovať alebo expandovať optické impulzy v časovej oblasti. Je to podstatné pre vysokorýchlostné systémy na dlhé optické trasy. V konkrétnom prípade prenosová rýchlosť 10 Gbit/s na diaľke okolo 300 km. S použitím mriežky je možné takmer úplne potlačiť vplyv chromatickej disperzie. Ďalšia výhoda mriežky je vysoká selekcia vlnových dĺžok čo je možné využiť na demultiplexovanie kanálov DWDM systému. Preto nedochádza k ovplyvňovaniu susedných kanálov.

Braggova mriežka je nástroj, ktorý vykazuje vplyv spôsobený mechanickým alebo teplotným namáhaním, podobne ako materiál, v ktorom je vytvorená. V takomto prípade sú splnené Braggove podmienky, kde je ovplyvnená fáza signálu a to ma za príčinu vzniku závislosti vlnovej dĺžky a odrazivosti. Obvyklá hodnota odchýlky odrážanej vlnovej dĺžky je pri mechanickom namáhaní 1 pm/nε. Pre teplotné namáhanie je to hodnota pohybujúca sa okolo 15 pm/°C. Týmto princípom odrazenej vlnovej dĺžky od mriežky môžeme vyhodnotiť zmeny namáhania a teploty. Táto skutočnosť nám umožňuje vytvoriť senzorickú Braggovu mriežku vo vlákne. Nastáva tu ale jeden problém a to je spoľahlivá detekcia signálu. Najľahším spôsobom je sledovanie zmeny parametra z optického spektra. Alternatívne využitie Braggovej mriežky v optickom vlákne je mapovanie dĺžok vlákien. Meranie v rovnakých intervaloch umožňuje presne meranie dĺžky vlákna alebo sledovanie pnutia [3].

2.2 Historický pohľad

Fotocitlivosť germánium dopovaného kremíkového vlákna bola vynájdená Kenom Hillom a jeho spolupracovníkmi v roku 1978 v Kanadskom komunikačnom centre pri experimentálnom skúmaní nelineárnych javov. V špeciálne navrhnutom vlákne naviazali svetlo z argónového lasera do jadra optického vlákna. Počas dlhého testovania s týmto svetlom zistili, že sa zvyšuje útlm optického vlákna. Zistili v konečnom dôsledku to, že sa zvyšuje intenzita odrazeného svetla po dlhšom čase neustále naviazaného svetla laserom. Nárast odrazivosti spôsobil trvale zmeny indexu lomu mriežky. Tento jav sa nazval ako fotocitlivosť. V ich pokuse bolo použité laserové svetlo o vlnovej dĺžke 488 nm, ktoré bolo naviazané do jadra špeciálneho vlákna interferujúceho s odrazeným lúčom, a tým

vytvára slabý vzor stojatých vln. V bodoch s najväčšou silou žiarenia sa zmenil index lomu. Týmto im vznikla odchýlka indexu lomu, ktorá ma rovnakú priestorovú periodicitu ako interferenčný vzor tvorený koherentnou dĺžkou zapisovacieho žiarenia. Táto odchýlka indexu v mriežke sa správala ako distribuovaný reflektor, kde zabraňoval postupujúcemu lúču v rozbiehavosti. Pri pozitívnej spätnej väzbe sa lúče spájali a tým zvyšovali intenzitu interferenčného vzoru a to zvyšovalo index lomu na osvetlených miestach po dobu odrazivosti mriežky až do saturácie. Tak vytvorili mriežku, ktorá je automaticky organizovaná bez zásahu človeka. Navrhnuté vlákna boli špeciálne vytvorené v Bellovom výskumnom ústave. Boli to vlákna s malým priemerom jadra, so silnými prímiesami germánia. Zhruba 10 rokov po tomto objave bola fotosenzitivita sledovaná len čiastočne v Bellovom ústave v Kanade. V roku 1981 Lam a Gardis dokázali, že veľkosť zmeny indexu lomu je závislá od druhej mocniny vlnovej dĺžky svetla v ich argónovom zdroji, ktorý mal 488 nm. To potvrdilo možný dvoj - fotónový proces zmeny indexu lomu. Nezáujem o túto problematiku bol spôsobený tým, že sa jednalo iba o tento konkrétny druh špeciálneho vlákna. Po nejakom čase prišiel až Edward James Stone, ktorý vynašiel fotosenzitivitu vlákien, ktoré mali veľkú časť prímеси germánia [4].

2.3 Externe modelované Braggove mriežky

Objav fotosenzitivity vo forme fotoindukovanej zmeny indexu lomu zohral hlavnú úlohu vo zlepšovaní technológie vlákien, ale zariadenia na princípe samo - vznikajúcej mriežky nenašli praktické využitie. To bolo z veľkej časti spôsobené tým, že Braggova rezonančná vlnová dĺžka bola obmedzená na zapisovanie argónovým svetelným zdrojom s $\lambda = 488$ nm. Jeden z najdôležitejších faktorov bola vedecká kuriozita, ktorá sa stala fenoménom, kde dôležitým nástrojom bolo osvetlenie vlákna z boku. Tato holografická technika bola predstavená v United Technologies Research. V roku 1989 Gerald Meltz a spol. začali pokračovať v práci Lamea a Gardisea. Ukázali výraznú zmenu indexu lomu v germánium dopovanom a priamo osvetlenom vlákne, jedno - fotónovým ultrafialovým svetlom blížiacim sa k 5 eV. To sa stotožňuje s absorpčnou špičkou v rozpätí 240 – 250 nm pre germánium dopované vlákna. Svietenie z boku optického vlákna s periodickou predlohou odvodenou z priesečníku dvoch koherentných 244 nm lúčov v interferometre, kde vzniká periodická mriežka pomocou vzniku modulácie indexu lomu v jadre. Vzďialenosť medzi interferenčnými maximami určuje uhol pretínajúcich sa lúčov. Tým sa dajú nastavovať rôzne vlnové dĺžky, pretože je možné meniť periodicitu mriežky. Zapisovanie vlnovej dĺžky je 244 nm, ale vyrobenie mriežky pre odraz ľubovoľnej vlnovej dĺžky nie je problém (vlnové dĺžky používané v telekomunikáciách). Dôležitým míľnikom tejto procedúry je vzrast indexu lomu a udržiavanie v oblasti 1300 až 1500 nm, aj keď poznáme fyzikálny jav absorpcie v ultrafialovej oblasti. Technika sa vylepšovala a okolo roku 1992 bola vytvorená zmena indexu lomu $2 \cdot 10^{-3}$. Pred rokom 1993 nebolo zvykom v literatúrach používať

hodnoty Δn pre porovnávanie indexov jadra a plášťa. Správny vyber indexu lomu jadra a plášťa spolu s Δn umožňujú široké možnosti lineárnych a nelineárnych prístrojov.

Prvotné porovnanie rozdielu v účinnosti medzi jedno a dvojfotónovým mechanizmom tvorenia mriežky, môže byť porovnávanie žiariacej energie dostačujúcej na vytvorenie rovnakej zmeny indexu lomu. Pri dvojfotónovom mechanizme je fotoindukovaná zmena indexu lomu saturovaná pri exponovaní žiarením dosahujúcim hodnotu asi 1 GJ/cm^2 . Jednofotónový proces potrebuje oveľa menej a to len 1 kJ/cm^2 . Je dokázané, že zmena indexu lomu je závislá od veľa faktorov a hlavné z nich sú vlnová dĺžka a intenzita použitého svetla pri vytváraní mriežky a predbežné spracovania, ktorým vlákno musí prejsť. Najpoužívanějšíe svetelné zdroje sú KrF (Krypton Fluoride) a ArF (Argon Fluoride) lasery s pracovnými vlnovými dĺžkami 248 nm a 193 nm. Vytvárajú pulzy trvajúce 10 až 20 ns, pri opakovaní dávky pulzov za sekundu. Obvyklým príkladom je vystavenie laserovému žiareniu na niekoľko minút s intenzitou od 100 do 500 mJ/cm^2 , čo zmení Δn v jednomódovom optickom vlákne s dopantami germánia o veľkosti asi $10^{-5} - 10^{-4}$. Spoločným problémom interných a externých postupov vytvárania mriežky je odrazivosť závislá na polarizácii detekovaného svetla. Táto vlastnosť je podstatnou pre chápanie foto - fyziky vlákien Braggovej mriežky. Užitočnosť tejto mriežky sa využila aj pri výrobe polarizačných zariadení a filtrov.

Ďalšou sférou boli vylepšovania techniky výroby pomocou hydrogenácie. Toto vylepšenie viedlo k zlepšeniu fotocitlivosti a zvýšeniu odrazivosti mriežky v štandardných komunikačných vláknach. Pred hydrogenáciou sa vlákna osvetľujú ultrafialovým svetlom.

Fázové masky sú ďalším aspektom, ktoré sa využívajú pre skutočne použitie v komerčných prístrojoch na výrobu mriežky. Technika fázových masiek je odvodená od fotolitografie. Jedná sa konkrétne o difrakčný člen, ktorý priestorovo moduluje dopadajúci ultrafialový lúč a tým vyhladzuje štruktúru kremenného skla. Pri správnej vlnovej dĺžke ultrafialového svetla sa pomocou fotoindukcie vytvorí interferenčný vzor a v jadre sa vytvorí Braggova mriežka. Pri použití fázovej masky nedochádza k zlepšeniu modulácie indexu lomu, ale nie je potrebný taký výkonný laserový zdroj a plusom je aj stabilita mechanizmu výroby Braggovej mriežky [4].

2.4 Optické vlákno a jeho fotocitlivosť

Pod prvé objavy fotocitlivosti sa podpísal Hill a jeho spoločníci. Jednalo sa o fotocitlivosť pri svetelnom zdroji, kde vlnová dĺžka bola 488 nm v kremíkovo - germániovom vlákne. Vyvíjanie laserov podporovali dvojfotónovou metódou a pri tom objavili spojenie s absorpčným pásom s vlnovou dĺžkou 248 nm. Neskôr bola transverzálna metóda využitá na vytvorenie Braggovej mriežky priamou excitáciou svetlom s 240 nm. Absorpčné pásmo v strede, bolo spojované s defektmi v kremíkovo-germániovom skle. Zistilo sa, že ak je svetelný zdroj, ktorý pracuje na rovnakej vlnovej

dĺžke ako aj absorpčný pás, tak dôjde k vytvoreniu ďalších absorpcii, ktoré vedú k zmene indexu lomu. Takýto proces je popísaný tzv. Kramersovo - Kroningovhim vzťahom. Po roku 1990 Lemaire a spol. ukázali výrazne zmeny indexu lomu pomocou hydrogenizácie pred osvetlením a to v zopár prípadoch aj bez zmeny 240 nm absorpčného pásma. Výsledky posledných pokusov ukazujú tvar spektrálnych zmien pod 240 nm. Excitaciou nehydrogenizovaného a germánium dopovaného optického vlákna a s žiarením na 193 nm je možnosť dosiahnuť zmenu indexu lomu zrovnateľnú s rozdielom indexov lomu jadra a plášťa. Zdá sa, že fotocitlivosť na 193 nm riadi jednofotónovú dynamiku v silnejšie germánium dopovanom vlákne. U dvojfotónovej dynamiky sa to javí pri slabom germánium dopovanom vlákne. Po tomto bol pozorovaný aj dvojfotónový proces v kremíkovo - germániovom skle pod UV svetlom. Užitočnosť fotocitlivosti, ma za následok vývoj jedného z najdôležitejších prvkov ako je Braggova mriežka v optickom vlákne [5].

2.5 Kremíkové optické vlákna a ich fotocitlivosť

Spomínané štúdie v predchádzajúcich kapitolách popisujú pri fotocitlivosti a mriežkach dôležitosť dopantu germánia. Je tomu naozaj tak, ale niektoré publikácie, ktoré sa zaoberajú fotocitlivosťou poukazujú nato, že je široká škála vlákien, ktoré germánium neobsahujú. Jedným z dôkazov je napr. kremíkové optické vlákno dopované kovmi ako je cére, erbium, kde je možno dosiahnuť rôzne stupne citlivosti. Dopant germánium - bór spôsobuje zmenu indexu lomu radovo 10^{-3} . Ďalším dôkazom fotocitlivosti v inom vlákne bolo objavenie vo flórozirkónovom vlákne dopovanom erbium alebo cérom, kde bola Braggova mriežka utvorená svetlom s 246 nm. V praxi sa väčšinou používa v telekomunikáciách a senzorových aplikáciách vlákno s jadrom dopovaným germánium.

Ako už bolo spomenuté v počiatočoch sa predpokladalo, že fotocitlivosť je len v germánium dopovaných vláknach. Po teste viacerých typov vlákien vyplynulo to, že fotocitlivosť je funkciou viacerých procesov. Nie je to len intenzita svetla a vlnová dĺžka, ale sú to fotochemické, termochemické a fotomechanické nástroje. Viacero modelov navrhnutých k popisu fotoindukovanej zmeny indexu lomu v germánium dopovanom vlákne, malo spoločný menovateľ a to kyslík. Kyslíkové defekty mali za následok fotoindukovanú zmenu indexu lomu. Vysoká teplota tento oxidačný proces chemicky modifikuje. GeO_2 sa rozdeľuje na GeO molekuly, pretože v tomto stave sú pri zvýšených teplotách stabilnejšie. Tie sa zaradia do hostujúceho skla a prejavujú sa vo forme nedostatku kyslíka (Ge - Si) a nežiaducich väzieb Ge - Ge. Tieto vady sú v podstate prepojenie s 240 - 250 nm absorpčným pásmom, ktoré má špičku v okolí 242 nm. Braggove mriežky, ktoré sú ožiarené ultrafialovým svetlom, pričom vzniká dynamicky rast, sú dôležitým faktorom pre fotocitlivosť optických vlákien. Za všeobecne známe môžeme považovať tri dynamické typy mriežok. Jedná sa o typ I, II, IIA. Pre jednoduchosť základných rozdielov je vytvorená tabuľka 2.1. Jednotlivé fyzikálne

popisy mriežok môžeme odvodiť z merania tepelne indukovaného rozpadu alebo z dynamiky ich vzniku. Každý typ mriežky ma odlišný urýchlený rozpad. Jednotlivé typy majú odlišne stability pri zvýšených teplotách. Pri zoradení podľa stability od najhoršej stability je najmenej stabilný typ I a naopak typ II je najstabilnejší. Typ IIA je na rozmedzí týchto dvoch typov.

	Podmienky zápisu		
Mriežka	Celková energia kontinuálneho osvetlenia	Energia impulzu	Dodatok
Typ I	$\leq 500 \text{ J/cm}^2$	100 mJ/cm^2	$\Delta n > 0$ Spojitosť s chybami v štruktúre skla
Typ IIA	$> 500 \text{ J/cm}^2$	100 mJ/cm^2	$\Delta n < 0$ Spojitosť so zhutňovaním v štruktúre skla
Typ II	Nepoužíva sa	1000 mJ/cm^2	$\Delta n > 0$ Spojitosť s fúziou štruktúry skla

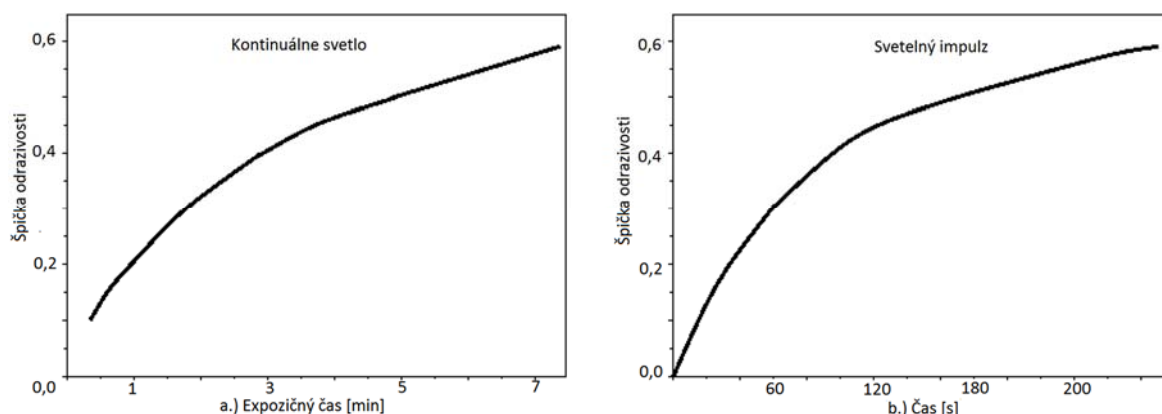
Tabuľka 2.1: Typy Braggových mriežok a ich rozdiely

Stabilita jednotlivých typov je spojená u typu I s chybami v štruktúre skla a u typu II je výhoda fúzie štruktúry skla a chyby spojené s typom IIA pochádzajú zo zhutňovania skla.

Dynamický rast u Braggovej mriežky pri UV svetle je pozorovateľný bez rozdielov vytvorených medzi mriežkami vyprodukovanými kontinuálnym alebo impulzným zdrojom svetla, teda laserom. Tým sú dokázané základne zákonitosti o raste mriežky typ I s rovnakým rastom pre oba spomenuté zdroje, ale v konečnom dôsledku pre tento typ je účinnejší impulzný laserový zdroj. Pre mriežku typu IIA platia podobné zákonitosti. Posledný typ II je tvorený iba vysoko energetickým impulzovým laserom [6].

2.5.1 Braggova mriežka typ I

Ako už bolo spomenuté, mriežka typu I môže byť vytváraná svetelnými impulzmi alebo kontinuálnym osvetlením. Porovnanie týchto dvoch techník môžeme vidieť na Obr.2.1.

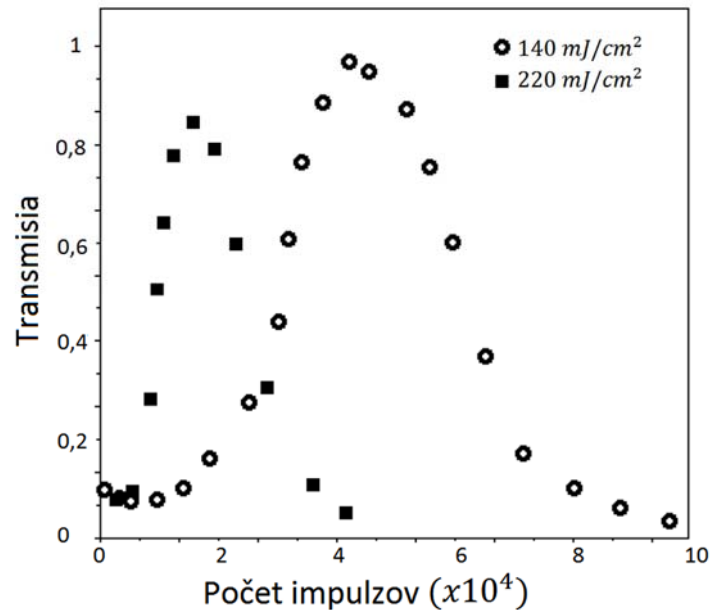


Obr. 2.1: Graf závislosti odrazivosti od expozičného času[6]

Je možné vidieť na Obr.2.1a vysokú špičku Braggovej mriežky, ktorá je tvorená v optickom vlákne s prímiesou germánia 10 % mol s kontinuálnym žiarením ultrafialového svetla na 244 nm a intenzitou žiarenia 47 W/cm^2 za 900 sekúnd. Skoro zhodná mriežka, vytvorená v rovnakom vlákne, ale s použitím impulzného zdroja, ktorého priemerná intenzita je 5 W/cm^2 počas 200 sekundového vystavovacieho (expozičného) času vid' Obr.2.1b. Ak by sme predpokladali, že výsledok je bezchybný je možné odlišnosti vo vytváraní mriežky pripísať prechodnému zohrievaniu urýchlením fototepelnej ionizácie alebo zhutňovaniu štruktúry skla [6].

2.5.2 Braggova mriežka typ IIA

Tento typ mriežky je najčastejšie spomínaný v literatúrach vo vláknach s vysokým obsahom germánia, s malým priemerom jadra a mnohokrát sa spájajú s vnútorným napätím vlákna. To je aj dôvodom absencie tohto typu medzi slabo germániom dopovanými vláknami na 240 nm. Mriežka tohto typu ma nedostatok a ten sa vie prejaviť vo vláknach, ktoré sú dopované vodíkom. Prejavuje sa to tým, že vodík upravuje fyzikálne a chemické vlastnosti optického vlákna. Braggova mriežka typu IIA môže vzniknúť aj z mriežky typu I. Ide o vytvorenie mriežky v kremíkovo - germániovom vlákne 28 % mol s impulzným laserom 12 ns pri frekvencii 10 Hz a vlnovou dĺžkou 244 nm vid' Obr.2.2.

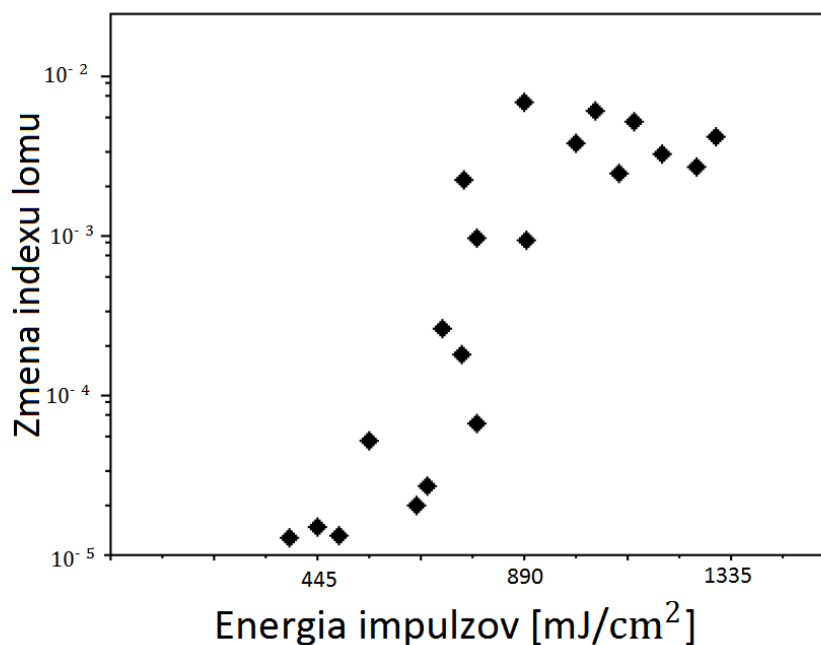


Obr.2.2: Transmisia Braggovej mriežky[6]

Na obrázku (Obr.2.2) môžeme vidieť pokles transmisie vlákna, ktorá odpovedá rastu odrazivosti mriežky cca o 10 %. Reflektivita tým ma 100 %. Zmenšovanie indexu modulácie ma na svedomí ďalšie osvetľovanie, pri ktorom nám rastie transmisia. Nad touto prahovou hodnotou sa môže zdať, že vzniká odlišná mriežka. Toto chovanie bolo možno vidieť pri rôznych vláknach, ale nebolo to spôsobené z nestabilnosti procesu tvorenia Braggovej mriežky. Postupom času pokusy ukázali, že dynamické formovanie mriežky typu I a IIA je ovplyvnené ak je vlákno našponované alebo natiahnuté pri tvorbe mriežky, tak je u typu I limitovaný index modulácie a u typu IIA je urýchlené formovanie mriežky [6].

2.5.3 Braggova mriežka typ II

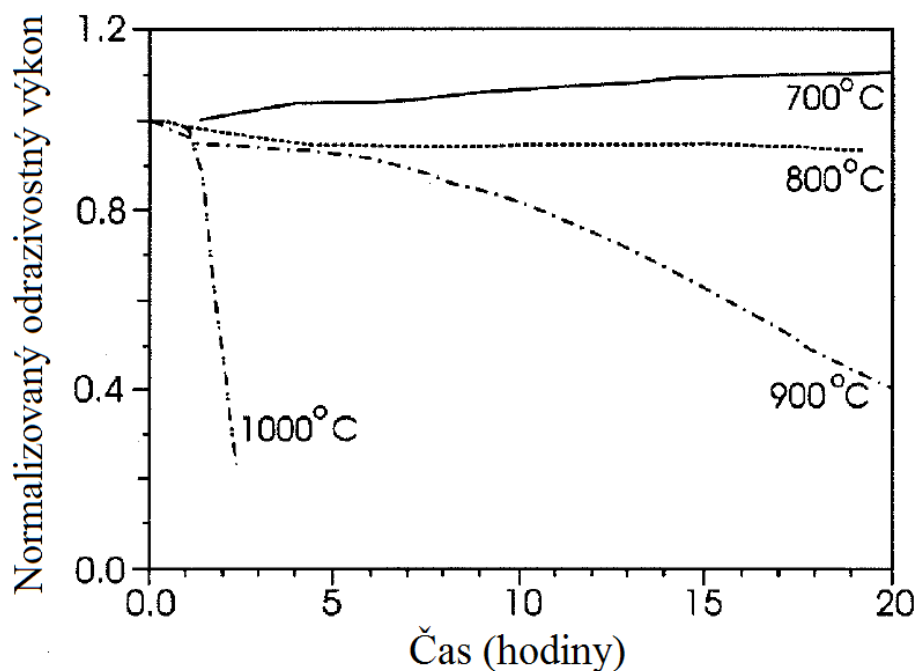
Jeden svetelný impulz stačí nato aby fotoindukoval zmenu indexu v malých oblastiach v rozhraní jadra a plášťa. Výsledkom tohto javu je mriežka typ II. Kvôli fyzickému poškodeniu je jadro limitované a vzniká tak veľké pozmenenie indexu lomu v okolí hodnôt 10^{-2} . Čo sa týká dynamického rastu tak to nám ozrejmuje obrázok (Obr.2.3). Vytvorenie mriežky bolo tvorené pomocou jedného impulzu kryptón fluoridového lasera. Môžeme tu vidieť hranicu, ktorá odpovedá impulzu energie cca 660 mJ/cm^2 . Po zdvojnásobení dodanej energie z cca 450 mJ/cm^2 na asi 900 mJ/cm^2 dostávame o dva rady vyššiu fotoindukovanú zmenu indexu. Táto hranica limituje to, že pod ňou je už lineárny rast indexu lomu [6].



Obr.2.3: Zmeny indexu lomu v Braggovej mriežke tvorenej impulzom kryptón fluoridového laseru [6]

2.5.4 Teplotná závislosť rozpadu Δn

Keď sa vytvorila mriežka prišlo sa aj na teplotnú závislosť rozpadu. Vo výsledku pokles odrazivosti je typický exponenciálnym priebehom v čase. Tento rozpad je zo začiatku rapidný, ale je postupne znižovaný v čase. Takéto správanie je pripisované tepelnému uvoľňovaniu nosičov pri ultrafialovom ožiarení. Rozpadnutie modulácie indexu lomu má na svedomí tepelná excitácia nosičov. Ostatné nosiče sú zviazané so stabilnou časťou zmeny indexu. Z tohto dôvodu je mriežka žiadaná popredu na odstránenie časti Δn , ktorá sa rozpadne rýchlo. Po tomto ostáva len časť s dlhodobou tepelnou stabilitou. Z toho vyplýva, že každý typ mriežky (Tabuľka 2.1) inak reaguje na rozdielne teploty. Tato mriežka sa javí ako stabilná ešte pri teplote takmer 800 °C po dobu 24 hodín testovania. Pri testovaní nedošlo k výrazným zmenám odrazivosti. Pri teplote 900 °C začínal byť pomaly úpadok odrazivosti. Pri teplote 1000 °C dochádza k úplnému vymazaniu mriežky. Mriežka typu II je najstabilnejšia z trojice mriežok spomínaných v (Tabuľka 2.1) a Obr.2.4 nám zobrazuje stabilitu mriežky typu II na zvýšenie teploty. Mriežka typu IIA dosahuje zvládnuteľnosť teploty maximálne 500 °C. Dlhodobá stabilita pri mriežke typu I je cca 300 °C [6].



Obr.2.4: Teplotná závislosť mriežky typu II [6]

2.6 Jednoduché Braggove mriežky (SBG)

Jednoduchá Braggova mriežka je zložená z pravidelnej zmeny indexu lomu jadra jednomódového vlákna. Sú to také typy, ktoré majú roviny mriežky kolmé na pozdĺžnu os vlákna, ktoré ma konštantné zmeny indexu lomu. Svetlo vedené jadrom optického vlákna je rozptyľované na každú rovinu Braggovej mriežky. Keď nie je splnená Braggova podmienka, svetlo odrazené od každej následnej roviny mriežky je mimo fázy a tým dôjde v konečnom dôsledku k rozptýleniu a ešte k tomu patrí aj svetlo, ktoré nemá zhodnú vlnovú dĺžku s Braggovou rezonančnou vlnovou dĺžkou a preto sa bude slabo odrážať od mriežky kvôli zmene indexu lomu. Takáto odrazivosť je po celej dĺžke mriežky. Ako príklad si môžeme zobrať mriežku o dĺžke 1 mm s periódou 1,5 μm a zmenou indexu lomu Δn cca 10^{-3} ma odrazivosť asi 0,05 % pre svetlo dopadajúce s vlnovou dĺžkou mimo rezonancie s Braggovou. Po splnení Braggovej podmienky, sú príspevky reflektovaného svetla z každej roviny mriežky sčítané a tak tvoria odrazené svetlo od Braggovej mriežky šíriace sa v spätnom smere. Parametre Braggovej mriežky určujú strednú vlnovú dĺžku špičky odrážaného svetla, ktorá sa dá zobrazit' v spektrálnej oblasti.

Jednoduchá podmienka Braggovej mriežky hovorí o splnení zákona zachovania hybnosti a energie, pričom zachovanie energie ma požiadavku, ktorá hovorí o frekvencii odrazeného svetla rovného svetlu dopadajúceho svetla. Zákon zachovania hybnosti požaduje aby súčet vlnového vektora dopadajúceho svetla k_i a vlnového vektora mriežky K sa rovnal vlnovému vektoru odrazeného svetla k_f vyjadrené vo vzťahu (2.1).

$$k_i + K = k_f, \quad (2.1)$$

kde K je vlnový vektor mriežky, ktorý ma smer do roviny mriežky o veľkosti $\frac{2\pi}{\Lambda}$ (Λ je perióda mriežky). Vlnový vektor odrazeného svetla ma rovnakú veľkosť s opačným smerom oproti vlnovému vektoru dopadajúceho svetla a z toho dôvodu je podmienka hybnosti v tvare (2.2)

$$2 * \left(\frac{2 * \pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.2)$$

Po zjednodušení na prvú Braggovu podmienku je vzťah nasledujúci:

$$\lambda_B = 2 * n_{eff} * \Lambda, \quad (2.3)$$

kde λ_B je vlnová dĺžka Braggovej mriežky a je to hodnota špičky odrazeného žiarenia od mriežky. Λ je perióda mriežky a n_{eff} je efektívny index lomu v jadre pre vlnovú dĺžku Braggovej mriežky [6].

2.7 Uniformne Braggove mriežky (UBG)

Ak by sme uvažovali o Braggovej mriežke vytvorenej v jadre optického vlákna s priemernou hodnotou indexu lomu n_0 potom profil indexu môžeme vyjadriť nasledujúcim vzťahom.

$$n(z) = n_0 + \Delta n * \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right), \quad (2.4)$$

kde Δn predstavuje amplitúdu indukovanej zmeny indexu lomu (zvyčajne $10^{-5} - 10^{-3}$), a z je vzdialenosť pozdĺž osi vlákna. Pomocou teórie viazaných módov odrazivosť mriežky s konštantnou periódou a veľkosťou zmeny indexu lomu nám vychádza vzťah:

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 * \sinh^2 * (sl)}{\Delta k^2 + s^2 * \cosh^2 * (sl)}, \quad (2.5)$$

kde $R(l, \lambda)$ je odrazivosť (reflektivita), ktorá je funkciou dĺžky Braggovej mriežky l a vlnovej dĺžky λ . Väzobný koeficient je Ω a $\Delta k = k - \frac{\pi}{\lambda}$ je rozladenie vlnového vektora, pričom $k = \frac{2\pi n_0}{\lambda}$ a konštanta šírenia je $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$. Následné sínusová zmena väzobného koeficientu je daná :

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} * M_p, \quad (2.6)$$

kde M_p je časť energie šíriaca sa v jadre optického vlákna. V oblasti jadra kde je uniformná mriežka vytvorená môžeme M_p aproximovať nasledujúcim vzťahom $1 - V^2$, kde V je normalizovaná frekvencia. Normalizovaná frekvencia je daná vzorcom:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} * a * \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.7)$$

kde a je polomer jadra, a n_1, n_2 je index lomu jadra a plášťa. Pre vlnový vektor Braggovej mriežky platí, že $\Delta k = 0$. Z toho vyplýva že vzťah (2.5) nadobudne tvar:

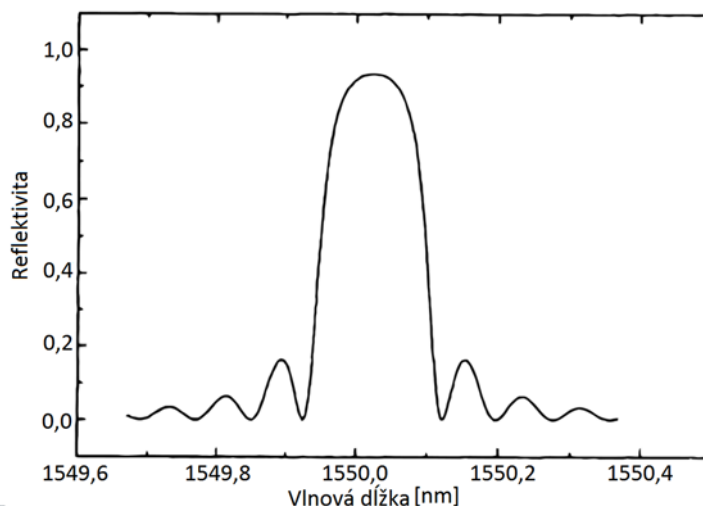
$$R(l, \lambda) = \tanh^2 * (\Omega * l) \quad (2.8)$$

Odrazivosť ma tendenciu rásť spolu so zmenou indukovaného indexu lomu. Tak isto dĺžka mriežky priamoúmerne interferuje výslednú odrazivosť Braggovej mriežky. Na Obr.2.5. môžeme vidieť prepočítaný priebeh spektra vlnových dĺžok, ktoré sa odrazili od spomínanej Braggovej mriežky, ktorá ma najlepšiu reflektivitu v okolí 1550 nm. Postranné laloky boli spôsobené mnohonásobným odrazom a protiahlymi koncami mriežky. Takéto sínusové spektrum vzniká pomocou Fourierovej transformácie na harmonický signál s konečnou dĺžkou. Pri úvahe, že by bola nekonečne dlhá mriežka tak by vznikol priebeh ideálnej delta funkcie.

Pre určenie maximálnej šírky pásma mriežky je vytvorený všeobecný tvar:

$$\Delta \lambda = \lambda_{BS} \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2}, \quad (2.9)$$

kde parameter N určuje počet rovín čo tvoria Braggovu mriežku. Hodnota $s \sim 0,5$ pre menej výrazne mriežky vo vlákne. Pri $s \sim 1$ je reflektivita takmer 100 % a tieto mriežky majú oveľa väčšiu zmenu indexu lomu oproti $s \sim 0,5$ [6].



Obr.2.5: Reflektivita v závislosti od vlnovej dĺžky uniformnej Braggovej mriežky [6]

2.8 Citlivosť na teplotu a namáhanie

Efektívny index lomu jadra a periodičita mriežky od týchto dvoch údajov závisí rezonančná vlnová dĺžka nachádzajúca sa v centre odrazenej špičky od Braggovej mriežky. Odstup medzi rovinami, a efektívny index sú parametre, ktoré budú ovplyvnené zmenami teploty a namáhaním vlákien. Ak budeme vychádzať zo vzťahu $\lambda_B = 2 * n_{eff} * \Lambda$, tak dostaneme rovnicu určujúcu posuv Braggovej vlnovej dĺžky, ktorá je odrazená od Braggovej mriežky na, ktorú vplýva výkyv teploty a namáhanie.

$$\Delta \lambda_B = 2 * \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right] \Delta l + 2 * \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right] \Delta T \quad (2.10)$$

Prvá časť vzťahu je vplyv namáhania na vlákno. To odpovedá zmene odstupu rovín mriežky, a namáhanie zapríčiňuje zmena indexu lomu jadra. Toto namáhanie optického vlákna je možné vyjadriť aj vzťahom (2.11).

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B * \left[1 - \frac{n^2}{2} * [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right] * \epsilon_z, \quad (2.11)$$

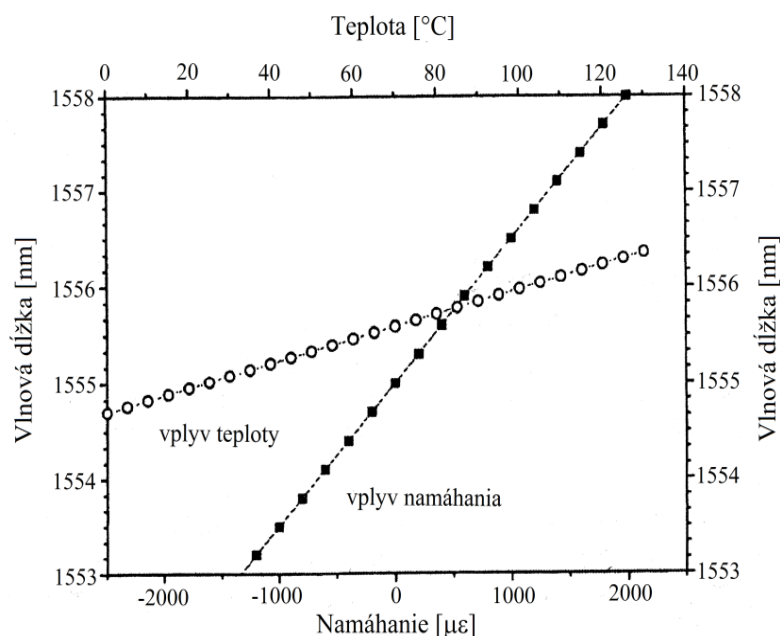
kde $\Delta \lambda_B$ je posuv, ktorý pre kremíkovo - germániove vlákno je 1,2 pm pri namáhaní Braggovej mriežky 1 $\mu\epsilon$. Komponenty tenzora p_{11} a p_{12} , ktoré vyjadrujú spojitosť namáhania vlákna s optickými vlastnosťami. ν je Poissonov koeficient namáhania, a potom $\epsilon_z = \frac{\delta l}{l}$.

Ďalšia časť rovnice (2.10) je vplyv teploty na vlákno. Pri pôsobení teploty dochádza k posúvaniu Braggovej vlnovej dĺžky kvôli teplotnej rozťažnosti a pre zmeny vzdialenosti mriežkových rovín vytvorených zmenami indexu lomu. Takýto posun na základe teploty je možné vyjadriť vzťahom (2.12).

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B * (\alpha_\Lambda + \alpha_n) * \Delta T, \quad (2.12)$$

kde $\alpha_\Lambda = \left(\frac{1}{\Lambda}\right) * \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)$ je to koeficient teplotnej rozťažnosti optického vlákna s hodnotou cca $0,55 * 10^{-6} K^{-1}$ pre kremíkové vlákna.

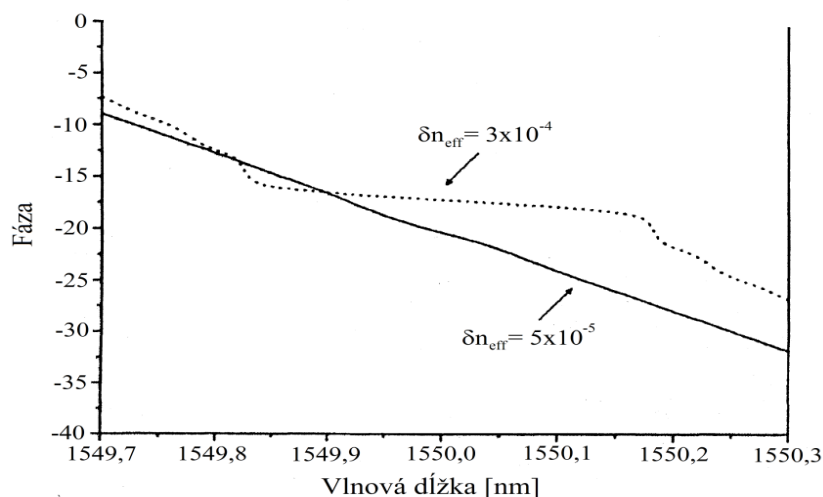
$\alpha_n = \left(\frac{1}{n}\right) * \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)$, predstavuje termo - optický koeficient, ktorý nadobúda hodnotu cca $8,6 * 10^{-6} K^{-1}$ pre kremíkové vlákno s dopantami germánia. Je očividne, že zmena indexu lomu má dominujúci vplyv. Z rovnice 2.11 vyplýva, že Braggova mriežka s vlnovou dĺžkou 1550 nm má citlivosť 13,7 pm/°C. V nasledujúcom obrázku je vykreslený pokus, ktorý ukazuje závislosť zmeny odrazenej Braggovej mriežky (1555,1 nm) od teploty, pričom bolo dokázané, že ľubovoľná zmena odrážanej vlnovej dĺžky vynútená vonkajšími zmenami je súčet teplotnej a namáhavostnej zložky. Pri senzoroch je potrebné jednotlivé zložky oddeliť pre skúmanie jednotlivéj teplotnej alebo namáhavostnej zložky [6].



Obr.2.6: Vplyv teploty a namáhania na odrazenú vlnovú dĺžku Braggovej mriežky [6]

2.9 Oneskorenie - fázové a skupinové

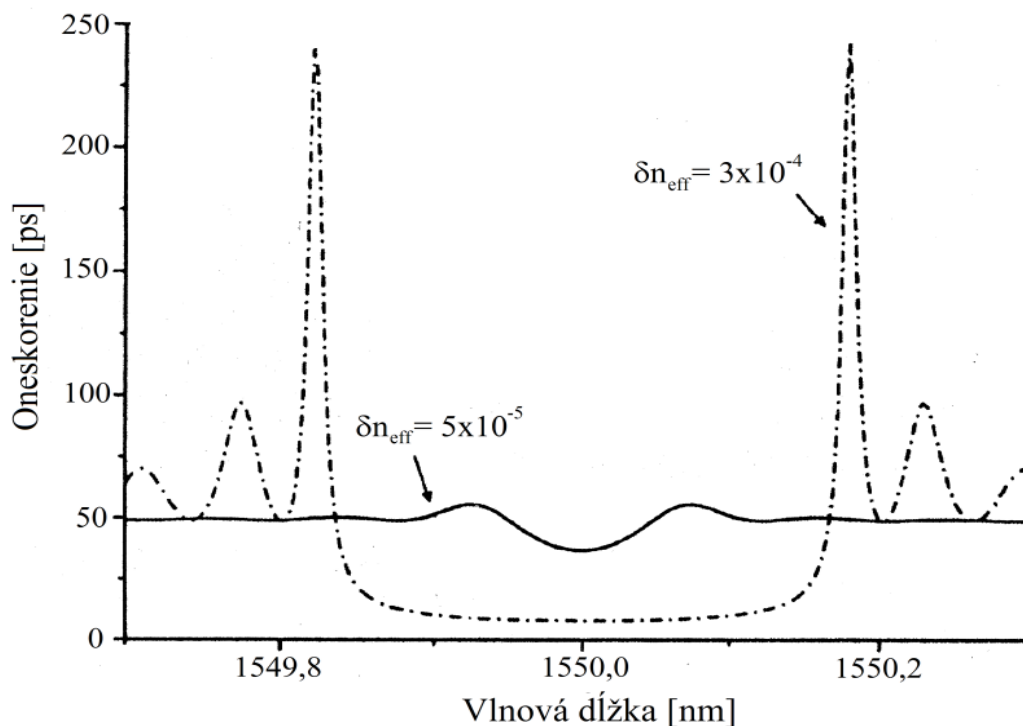
Grafické znázornenie na Obr.2.7. zobrazuje dve uniformné Braggové mriežky s totožnou dĺžkou 1 cm, ale pri tom výrazné odlišné zmeny indexu lomu. Je zjavné, že ak zvýšime index lomu tak klesá fázová zmena mriežky. Pretože z obrázku závislosť vyznačená hodnotou $\delta n_{eff} = 3 \cdot 10^{-4}$ ma väčšiu zmenu ako je $\delta n_{eff} = 5 \cdot 10^{-5}$.



Obr.2.7: Fázová odozva dvoch uniformných Braggových mriežok [6]

Znázornenie Obr.2.8, je skupinové oneskorenie dvoch identických Braggových mriežok. Je vidieť zmenu skupinového oneskorenia s vlnovou dĺžkou Braggovej mriežky, teda rozptyl na okrajoch

priepustného pásma. Ďalšie pozorovanie nám ukazuje tiež vzrast oneskorenia s výraznejšími mriežkami v úzkom pasme a skupinové oneskorenie je zväčša minimálne v centre pásma [6].



Obr.2.8: Vzťah vlnovej dĺžky uniformnej Braggovej mriežky od oneskorenia [6]

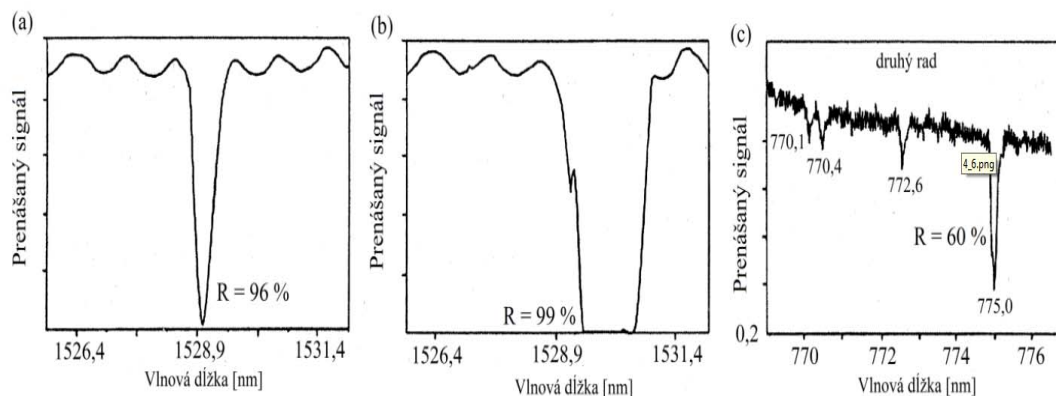
2.10 Ďalšie vlastnosti mriežok vo vláknach

Keď sa mriežka vytvára ultrafialovým žiarením, ktorým je zmena indexu lomu saturovaná, tak v tom prípade efektívna dĺžka mriežky bude odoberať signál o odrazení časť. Pre toto sa rozšíri spektrum a tým sa vychýli od Gaussovej alebo symetrickej funkcie, ktoré majú nepriamoúmernú dĺžku mriežky. Takto popísaná situácia je vyobrazená na Obr.2.9(a, b), takto bude mriežka vytvorená kosínusovým tvarom zmeny indexu lomu, ktorá bude pozamieňať krivku strmými hranami. V druhom rade sa objaví Braggova línia z nových harmonických vo Fourierovom spektre Obr.2.9c.

Na silne odrážajúcich mriežkach s veľkou zmenou indexu lomu bol objavený útvar rezonancie na strane kratších vlnových dĺžok od reflektovanej vlnovej dĺžky. Toto spôsobuje kolísanie $\Delta n_{eff}(z)$. V prípade ak je priemerný index lomu konštantný tak kolísanie nenastáva. Ak by priemerný index lomu nebol konštantný tak musí byť upravený tak, aby bol konštantný pre druhú expozíciu mriežky. Braggova mriežka je schopná viacerých režimov odrazov a prechodov svetla ak je splnená fázová podmienka a ak je dostatočne prekrytie vo vlákne, kde je konkrétna mriežka vytvorená. Preto fázová podmienka rovnosti je zabezpečená koherentnou výmenou energie a je daná nasledovne:

$$n_{eff} - \frac{\lambda}{\Lambda_z} = n_e, \quad (2.13)$$

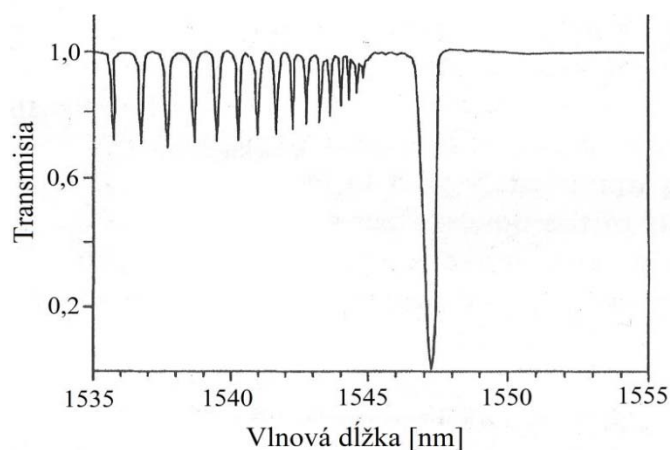
kde n_{eff} je index lomu pre dopadajúcu vlnu a n_e je index lomu odrážaných a transmisných vln. Tento vzťah je aplikovateľný iba pre šikmé a naklonené mriežky a nie je vhodný pre mriežky, ktorých roviny sú kolmé na pozdĺžnu os vlákna.



Obr.2.9: Grafy závislosti signálu od vlnovej dĺžky [6]

2.10.1 Vyžarovanie svetla

Mriežky vytvorené vo vysoko fotocitlivom alebo v hydrogenizovanom vlákne majú výraznú transmisnú krivku pre kratšie vlnové dĺžky od odrazenej Braggovej špičky vid' Obr.2.10.



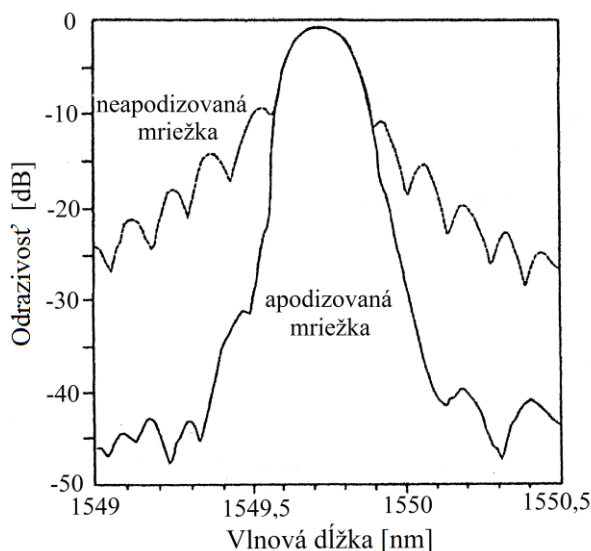
Obr.2.10: Transmisia výraznej Braggovej mriežky [6]

Takáto skutočnosť je pozorovaná iba v transmisnom spektre, a preto toto zvlnenie je výsledkom uniku svetla z vlákna. Tento jav je bežne pozorovaný pri povrchu mriežky tvorenej pomocou leptania jadra a je tiež miernou funkciou vlnovej dĺžky. Transmisia spektra mriežky je z viacerých špičiek, ktoré ukazujú unikanie svetla čo je dôsledkom rozhrania plášťa a vzduchu. Problém

sa čiastočne dá riešiť ponáraním vlákna do glycerínu. Aj keď je tento postup známy, napriek tomu nerieši problém nadmerných strát vlnových dĺžok menších od odrážanej špičky. Z tohto pozorovania sa zistilo, že Braggove mriežky s vysokou odrazivosťou majú oveľa nižšiu odrazivosť pre krátke vlnové dĺžky. Pre zamedzenie vyžarovania svetla sa často používa zníženie normalizovanej modulácie indexu lomu [6].

2.10.2 Apodizované mriežky vo vlákne

Pri uniformných mriežkach a jej spektre odrazivosti je vždy niekoľko postranných lalokov, ktoré môžu byť nežiaducim faktorom pri určitých použitíach. Je preto niekedy dôležité úplne potlačiť bočné laloky pomocou apodizácie odrážaného spektra mriežky, ktoré je veľmi žiaduce v DWDM, kde je dôležité mať potlačené nerezonančné vlnové dĺžky pre ovplyvňovanie susedných kanálov. V tomto príklade použitia je apodizácia nevyhnutelným procesom. Po apodizácii mriežky vo vlákne vzniká strmá spektrálna odozva a tým sa tvorí možnosť mať kanály od seba vzdialené menej ako 100 GHz. Aplikácie ako je demultiplexor, kde je hlavné potláčanie ostatných kanálov o menej než -30 dB oproti odrážanej vlnovej dĺžke. Apodizácia je osvedčená aj ako kompenzácia disperzie v čirpovaných Braggových mriežkach, ktorých skupinové oneskorenie začne byť lineárne a modulácia spojená so spomínanými postrannými lalokmi tak eliminovaná. Úroveň disperzie a prenosovej rýchlosti 10 Gb/s by mala mať hodnotu nižšiu než 100 ps. Prakticky sa apodizácia dosiahne tým, že po celej dĺžke mriežky je menená amplitúda koeficientu väzbovosti [6].



Obr.2.11: Odrzivost' mriežok [6]

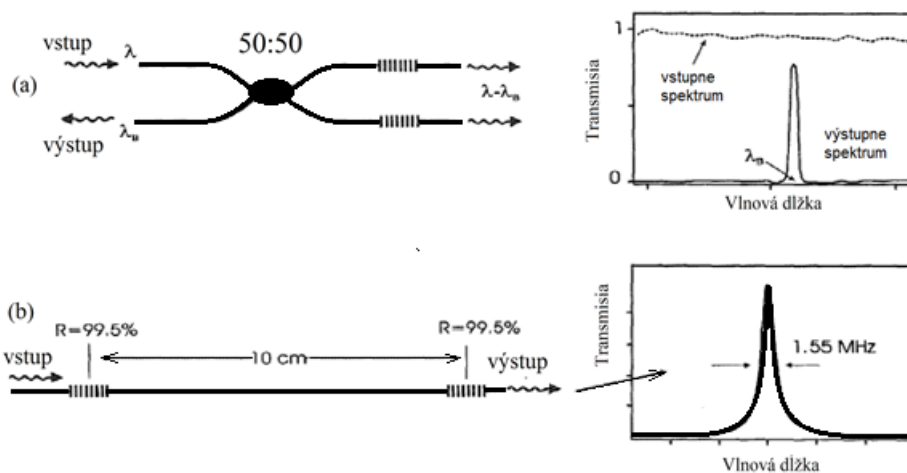
2.11 Typ Braggovej mriežky vo vlákne

Braggove mriežky majú viacero variant štruktúr. Ako príklad môžeme uviesť šikmé mriežky, čirpované alebo aj Braggov reflektor. Hlavné odlišnosti vláknových mriežok spočívajú u jednotlivých

typov v odlišnom rozstupe rovín mriežky alebo iným naklonením rovín mriežky. Najbežnejšie Braggove mriežky sú Braggove reflektory. Ich roviny mriežky sú konštantne vzdialené, a sú kolmé na pozdĺžnu os vlákna. Pri použití šikmých Braggových mriežok roviny zvierajú uhol menší než 90° s pozdĺžnou osou. Čirpované mriežky majú stupňujúci sa rozstup medzi rovinami. V ďalšej kapitole sa zameriam na prehľad typov mriežok.

2.11.1 Braggov reflektor

Je to najjednoduchší a najviac používaný typ Braggovej mriežky. Môžeme ho vidieť na obrázku Obr.2.12(a, b). Braggov reflektor dokáže filtrovať viaceré vlnové dĺžky na základe parametrov ako je napríklad dĺžka mriežky a indukovaná zmena indexu lomu. Z toho vyplýva, že môže spĺňať funkciu transmisného alebo reflektujúceho úzkopásmového filtra. Pomocou kombinácie viacerých Braggových reflektorov sa dá vytvoriť pásmová priepust alebo širokospektrálne zrkadlo. Vytvorenie takejto pásmovej priepasti je na Obr.2.12. V Obr.2.12a sa nachádza Michelsonova konfigurácia, kde modifikuje široké spektrum pomocou Braggovej mriežky s odstránením určitej vlnovej dĺžky. Následné na Obr.2.12b je vyobrazené Fábry - Perotove zoskupenie mriežok vo vlákne, ktoré vytvára vysokú odrazivosť konkrétnej vlnovej dĺžky.



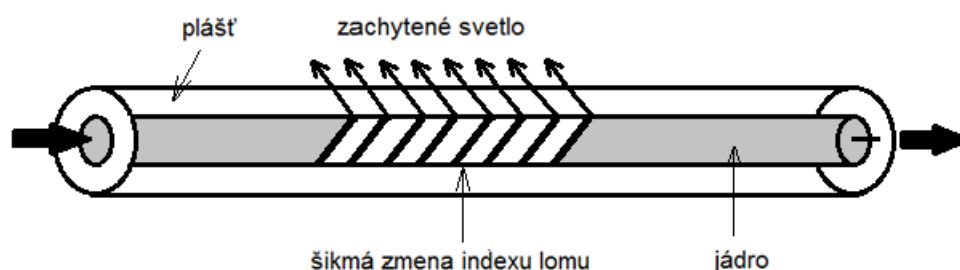
Obr.2.12: Pásmová priepust' vo vlákne [6]

Braggove reflektory majú vhodné využitie napr. ako snímač do zariadenia na meranie teploty alebo namáhania, keďže zmena meraného parametra sa prejaví na zmene odrazenej vlnovej dĺžky. Takáto vlastnosť nám eliminuje problémy s fluktuáciou amplitúdy intenzity svetla, s ktorým majú problém snímače pracujúce na princípe šírenia svetla vo vlákne. Každý Braggov reflektor je dobrý hlavne v tom, že sa dá nastaviť na odraz inej vlnovej dĺžky, a preto sériou viacerých mriežok vytvorených v optickom vlákne vieme tvarovať transmisnú krivku. Toto je vhodné využiť v demultiplexore hustého vlnovo deleného multiplexu alebo pri kvázi - distribuovaných snímačoch. Ukázalo sa, že mriežky sú veľmi užitočné v laditeľných vláknach a laseroch, ktoré slúžia ako

jednostranné alebo obojstranné zdroje (závisí na nastavení lasera). Rôzne odrazené dĺžky od mriežky ladia vlnovú dĺžku lasera. Pomocou tejto metódy Ball a Morey predstavili plynule laditeľný jednomódový erbiovy laser obsahujúci dva Braggove reflektory, ktoré boli usporiadané vo Fabry - Perotovej dutine. Takto plynule nalad'ovanie bez módového skákania dosiahli pomocou rovnomerného namáhania oboch mriežok a vloženého optického vlákna. Vláknové lasery s Braggovou mriežkou sa dajú použiť ako senzory, kde Braggov reflektor je ladiaci prvok a taktiež aj senzor. Pomocou naskladania viacerých Braggovych reflektoroch s rôznymi vlnovými dĺžkami vieme vytvoriť mnoho snímačov, ktoré sú umiestnené vo viacerých bodoch, a tak je možné pomocou jedného optického vlákna skúmať viac parametrov [6].

2.11.2 Naklonené Braggove mriežky

Šikmé alebo naklonené roviny Braggovej mriežky pod určitým uhlom voči rovnobežnej osi vlákna môžeme vidieť vyobrazené na Obr.2.13. Výsledkom dopadajúceho svetla šíriaceho sa v jadre vlákna je zmiznutie transmisie na určitých vlnových dĺžka v spektre. Tieto reflektované vlnové dĺžky sa šíria plášťom vlákna alebo sa vyviažu von z vlákna do prostredia.

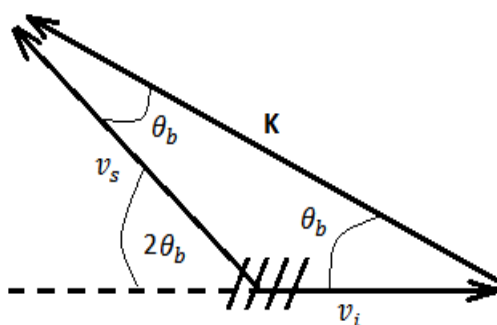


Obr.2.13: Naklonená Braggova mriežka [6]

Naklonenie rovín mriežky a intenzita zmeny indexu lomu určuje väzobnú účinnosť a šírku pásma svetla, ktoré je zachytene a odrazene von z jadra vlákna. Na Obr.2.14 je zobrazený vektorový diagram Braggovej podmienky (zachovanie hybnosti a energie) pre šikmé mriežky v optickom vlákne. Vlnový vektor mriežky K zvierá uhol θ_b s pozdĺžnou osou vlákna. Veľkosti vektorov musia byť rovnaké, a preto veľkosť dopadajúceho vektora v_i a odrazeného vektora v_s je rovnaká ($v = |v_s| = |v_i|$). Základná trigonometria ukazuje, že odrazený vektor bude odrážaný pod uhlom o veľkosti $2\theta_b$ od pozdĺžnej osi vlákna. Potom z toho vyplýva, že keď aplikujeme kosínusovú vetu na vektorový diagram, dostaneme následný vzťah :

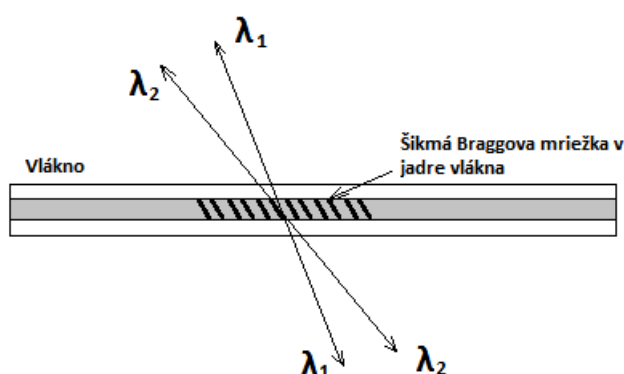
$$|v_i|^2 + |v_s|^2 - 2|v_i||v_s| \cos(\pi - 2\theta_b) = |K|^2 \quad (2.14)$$

Ak si vzťah zjednodušíme dostaneme $\cos(\theta_b) = |K|/2v$, z toho môžeme vyvodit' to, že uhol odrazu je obmedzený Braggovou vlnovou dĺžkou a efektívnym indexom lomu. Z rovnice 2.14 vyplýva, že pre šikmé mriežky nie sú odlišne odrážané vlnové dĺžky na základe zmeny uhla jednotlivých rovín mriežky, ale odrážajú sa rôzne módy rovnakej vlnovej dĺžky.



Obr.2.14: Vektorový diagram pre šikmé mriežky [6]

Nasledujúci obrázok (Obr.2.15) ukazuje výstupný zväzok 488 nm a 514,5 nm svetla z argón iónového lasera.



Obr.2.15: Zobrazenie oddelených vlnových dĺžok zachytených pod odlišným uhlom roviny mriežky [6]

Jednotlivé vlnové dĺžky majú viaceré modely. Zelená argón - iónová vlnová dĺžka ma dva modely a modrá ma až tri modely popisujúce šírenie v optickom vlákne. Vlnové dĺžky a ich modely sú ľahko oddeliteľné a riešiteľné. Samotný jav vyžiarovania určitých vlnových dĺžok s pomocou šikmej Braggovej mriežky vo vlákne je možné sledovať módovým diskriminátorom, alebo taktiež spektrometrom. Páni Meltz a Morey dosiahli vyžiarovanie svetla z vlákna vyše 21 % na vlnových dĺžkach 488 nm a 514 nm.

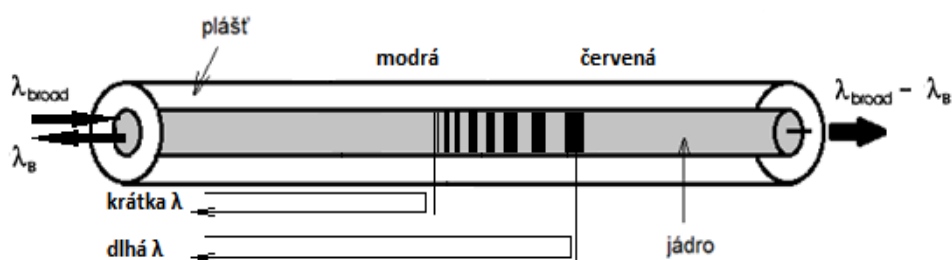
Vysokorýchlostné komunikačné systémy na prekonávanie dlhých vzdialenosti v súčasnosti využívajú erbiom dopované optické zosilňovače. Taktiež hľadajú uplatnenie v oblasti širokospektrálnych zosilňovačov. Kashyap a spol. demonštrovali použitie viacerých šikmých mriežok

na vyrovnávanie charakteristiky zisku erbiom dopovaných zosilňovačov. Zmena zisku $\pm 1,6$ dB na šírke pásma 33 nm v saturovanom erbiom dopovanom zosilňovači bola znížená na $\pm 0,3$ dB. Takáto vlastnosť je dôležitá v optických komunikáciách, kde sa využíva viac odlišných vlnových dĺžok na udržanie rovnakého odstupe signálu od šumu na prijímacej strane systému.

Šikmé Braggove mriežky sa dajú aplikovať aj na módovú konverziu. Módové konvertory sa vyrábajú s periodickou zmenou indexu lomu pozdĺž dĺžky vlákna s periodicitou, ktorá premoštuje nezhody hybnosti medzi jednotlivými módmami a umožňuje fázové prispôsobenie medzi vybranými módmami. Odlišné periódy mriežky sa používajú na tzv. módovú konverziu pre odlišné vlnové dĺžky. Hill a spol. demonštrovali účinnú doprednú módovú konverziu medzi módom LP_{01} a LP_{11} [6].

2.11.3 Čirpované Braggove mriežky

Ďalšia zaujímavá štruktúra Braggových mriežok, ktorá je aplikovaná v telekomunikačnom priemysle je čirpovaná Braggova mriežka. Je známa najmä tým, že má monotónne variabilnú periódu. Existujú určité charakteristické vlastnosti, ktoré ponúkajú monotónne sa zvyšujúcu periódu Braggovej mriežky v optickom vlákne, vid' Obr.2.16.



Obr.2.16: Čirpovaná Braggova mriežka [6]

Čirpované mriežky sú hlavne výhodne použiteľné pre špecifické aplikovania v telekomunikačnej oblasti a taktiež aj v senzorike. Vďaka jej vlastnostiam sa dá odstrániť disperzia a dá sa stabilizovať vyžarovanie svetelných zdrojov. Čirpované mriežky môžu byť realizované pozdĺžnou zmenou periodicity rovin mriežky Λ alebo pozdĺžnou zmenou veľkosti indexu lomu jadra alebo kombináciou oboch. Z rovnice 2.3 potom dostávame nasledovný vzťah:

$$\lambda_B(z) = 2n_{eff}(z)[\Lambda_0 - \Lambda_1 z], \quad (2.15)$$

kde predpokladáme, že zmena periódy mriežky je lineárna. Λ_0 je počiatočná perióda a Λ_1 je lineárna zmena, takže stúpanie pozdĺž dĺžky mriežky.

Tato mriežková štruktúra môže byť považovaná za sériu krátkych uniformných Braggových mriežok, ktorým sa zväčšuje perióda zmeny indexu lomu jadra v optickom vlákne. Jedna sa o postupne zväčšovanie. Pokiaľ je navrhovaná štruktúra správna je potom možné vytvoriť aj širokopásmový reflektor. Obvykle používaná lineárna čirpovaná mriežka sa charakterizuje dvoma hodnotami, a to je hodnotou Λ_1 a počiatočnou periódou Λ_0 . Ako príklad čirpovanej mriežky je mriežka s celkovou dĺžkou 2 cm, ktorá ma počiatočnú periódu na odraz svetla s vlnovou dĺžkou 1550 nm a Λ_1 je rovná 1 nm/cm. Z toho vyplýva, že koniec tejto mriežky bude odrážať svetlo s vlnovou dĺžkou cca 1552 nm. Vytvorenie čirpovanej mriežky v optickom vlákne je možné viacerými metódami.

Hlavnou limitáciou optických zosilňovačov, ktoré sú použité na vysokorýchlostné prenosy prekonávajúce veľké vzdialenosti je chromatická disperzia, ktorá spôsobuje rozširovanie svetelných pulzov. Rozšírenie pulzu je možné odstrániť vloženíím prvku do prenosovej cesty s rovnakou hodnotou disperzie v reverznom smere oproti prenosovej ceste v komunikačnom optickom vlákne. U čirpovaných mriežok je rezonančná frekvencia lineárnou funkciou vzdialenosti pozdĺž dĺžky mriežky. Odlišne frekvencie charakterizované svetelným pulzom sa odrážajú v rôznych bodoch a tým sa získa rozdielne oneskorenie, vid' Obr.2.16. Podstatným faktom je to, že takto dokážeme späťne zúžiť pulzy, ktoré boli rozšírené chromatickou disperziou.

3 Použitie FBG senzorov

V tejto kapitole uvediem niekoľko možných použití FBG v praktickom a reálnom aplikovaní. Popisovať budem niekoľko nespočetných aplikácií, ktoré sú opísané v dostupnej literatúre.

3.1 Aplikácie v leteckom inžinierstve

Letecký priemysel je potenciálne dôležitý užívateľ optických vlákien, najmä v dátových prepojeniach. Tie sú po rokoch intenzívneho vývoja považované za vyspelú technológiu. Dodávatelia vojenských lietadiel, ako je napríklad Westland Helicopters, tieto komponenty využívajú ako súčasť vymeniteľných prvkov v komunikačných prepojeniach vo vrtuľníkoch Lynx. Ďalšie aplikácie by mali prebiehať na projektoch ako sú Boeing 777 a Eurofighter 2000.

Aj keď výskum ukázal, že optické vláknové senzory môžu pracovať v rámci predpísaných požiadavkách pre letecký priemysel, sú stále považované za nevyspelú technológiu. Doteraz bol vývoj týchto senzorov zameraný hlavne na rozvoj senzorov pre drsné podmienky, nevhodné pre konvenčné elektromechanické snímače. Využíva sa hlavne ich odolnosť voči radiácii a EMI imúnosť. Letecký priemysel je ohľadom nových snímačov veľmi konzervatívny a každá novinka musí prejsť dlhým obdobím testovania. Až potom môžu nastať zmeny vo vybavení systémov v civilných a aj vo vojenských lietadlách. Optické senzory budú úspešné, iba ak si „kúpia“ cestu do lietadiel. Prakticky to znamená, že oproti aktuálne umiestnenému snímaču sa zredukuje hmotnosť systému alebo sa znížia náklady na výrobu. Zvýšenie spoľahlivosti snímača a jednoduchosť inštalácie a údržby sú vzhľadom na aplikáciu povinné, ideálne by malo dochádzať k javu „namontuj a zabudni“. V konečnom dôsledku by štandardizácia snímačov znížila ich celkové výrobné náklady a aj počet dielov, z ktorých sú zložené.

Stratégie aplikácie snímačov pre letecké aplikácie (lietadlá, vrtuľníky, rakety a vesmírne vozidlá) sa v zásade riadia rovnakými pravidlami. Najdôležitejšie požiadavky na snímače sú nízka hmotnosť a ideálne dobrá dostupnosť. Sensory by mali byť ľahko aplikovateľné do zložitých optických sietí. Tým, že dôkladne spracujeme požiadavky na snímače, určíme ich rozsah použitia v rôznych aplikáciách a definujeme požiadavky na snímače, dosiahneme univerzálnosť ich aplikácie ako aj kompatibilitu s bežne dostupnými prístrojmi. V súčasnej dobe nájdeme mnoho typov snímačov, ktoré vykonávajú podobné funkcie, ale nie sú vzájomne zameniteľné.

Každý nový senzor na báze optických vlákien nesmie prekročiť veľkosť a hmotnosť konvenčných elektromechanických senzorov, preto je senzor ktorý je aplikovaný priamo do jadra optického kábla veľmi účelný a atraktívny. Sensory pracujúce na princípe Braggovej mriežky riešia jednu z hlavných nevýhod optických vláknových senzorov: nedostatok štandardného demodulačného

prístupu pri zachovaní úplne pasívnej siete. Najčastejšie použitie týchto senzorov je sledovanie stavu podvozku lietadiel, vysunutia klapiek, polohy smerových klapiek atď.. Ak vezmeme do úvahy vysoké hladiny redundancie (trojitá úroveň pre hlavné zariadenia) nájdeme v riadiacich systémoch viac ako 100 senzorov. Úspora priestoru a hmotnosti by bola veľmi významná. Ďalšie snímače, kontrolujúce priebeh letu sú napríklad snímače merajúce hladiny paliva, vibrácie a tak ďalej. V tejto oblasti sú snímače systematicky vystavené nepriaznivým poveternostným podmienkam. Snímače nájdeme v rôznych kategóriách, ako sú kategórie teploty, tlaku, rýchlosti, snímania hladiny tekutiny, krútiaceho momentu a sledovania trosiek v okolí lietadla.

3.1.1 Použitie senzorov na princípe Braggovej mriežky v lietadlách

Potencionálne využitie pre tieto senzory v leteckom priemysle je na meranie teploty, tlaku, deformácie a pri ich úspechu by mohli byť aplikované aj do výrobných procesov pri výrobe kompozitov z uhlíkových vlákien a pri pokročilom testovaní turbínových motorov. V niektorých odvetviach neexistuje technológia, ktorá by im dokázala konkurovať.

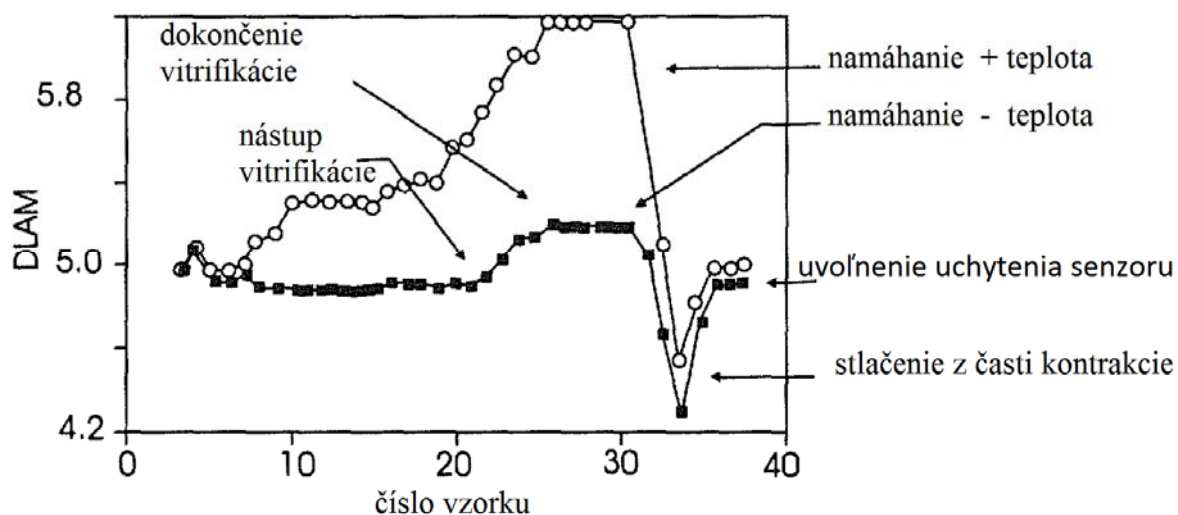
3.2 Sledovanie zosilnených štruktúr z uhlíkových vlákien - tvrdenie a naraz

Najimpozantnejšia úloha pre každý senzor je sledovanie únavy a životnosti nových materiálov v leteckom priemysle. Jedná sa najmä o kompozity z uhlíkových vlákien (RCFCs). Tieto materiály sa stále viac používajú pri stavbe konštrukčných častí lietadiel, hlavne pre ich výborné mechanické vlastnosti. Kompozity a optické vlákna zdieľajú podobnú materiálovú štruktúru. To viedlo k ich kombinácii, z ktorej vznikla štruktúra s názvom „smart skin“. Ak je signál zo senzoru použitý na pohon aktuátora modifikujúceho štruktúru zariadenia za účelom aktívneho tlmenia a kontroly je systém známy ako „smart structure“. Pokročilé RCFC materiály nachádzajú využitie v civilných a vojenských lietadlách a odnedávna aj vo vesmírnych dopravných prostriedkoch. Tieto materiály sú charakteristické lepším pomerom pevnosti k hmotnosti ako oceľ. Napriek tomu môžu byť formované do zložitých tvarov, pri zachovaní rozumnej ceny (napríklad prostredníctvom pretláčania živice). Tieto materiály nie sú detekovateľné radarom. Materiály sa skladajú z vrstiev vlákien ležiacich pri sebe paralelne. Jednotlivé vrstvy sú na seba naskladané paralelne, kolmo alebo pod 45 stupňovým uhlom. Spolu tvoria materiál, ktorého odolnosť môže byť prispôbená tak, aby vyhovovala konkrétnej aplikácii.

Vlastná anizotropia týchto materiálov znamená, že ich fyzikálne vlastnosti sú silne závislé na ich orientácii. Veľmi dôležité je, aby kompozitný materiál prešiel procesom úplného vytvrdenia. Plne vytvrdený kompozit je veľmi flexibilný a znesie veľmi vysoké úrovne dynamického namáhania bez zjavnej straty pevnosti. Veľkým problémom je zistenie poškodenia vnútorných častí. Klasické

tenzometre nie sú pre tento problém dobre použiteľné. Delaminácia sa môže dostaviť aj bez zjavných vonkajších dôkazov.

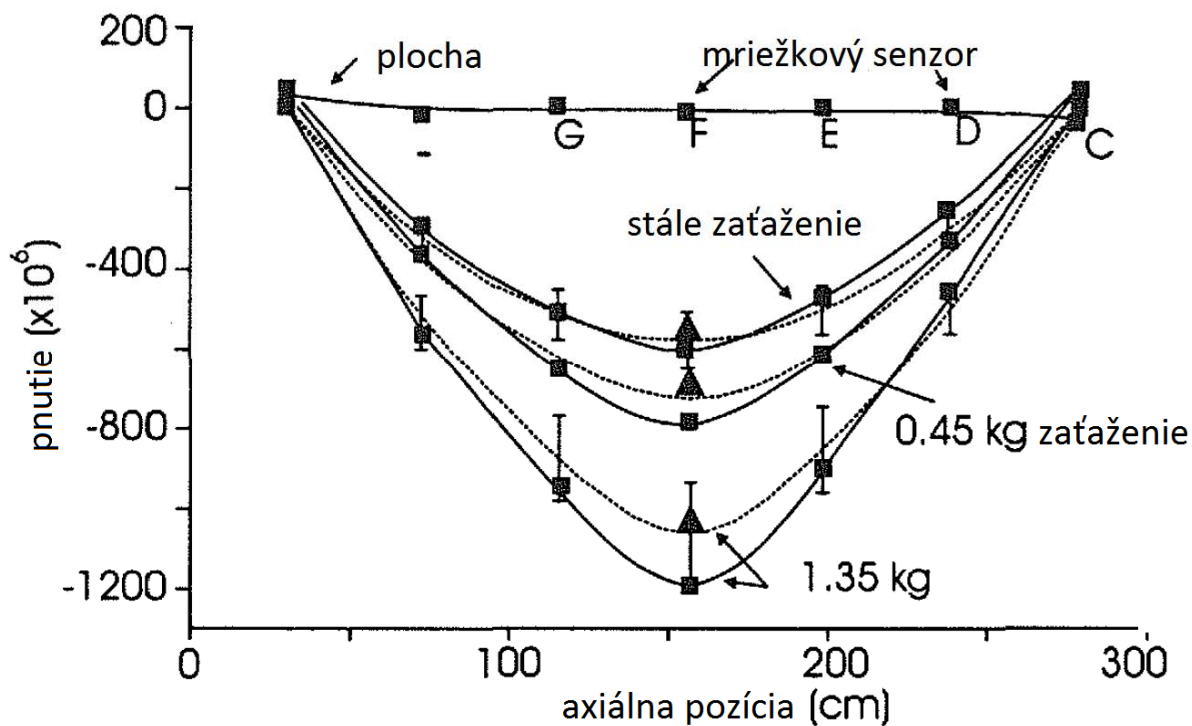
Okrem iného je poškodenie nárazom zvyčajne viditeľné len v bode nárazu, ktorý je takmer vždy skrytý v rámci komplikovanejšej štruktúry. Kompozit je náchylný k poškodeniu laserom indukovaného prostredníctvom optickej absorpcie svetla a jeho následnej premene na teplo. Nájde sa tiež problémy s kompatibilitou medzi RCFC a optickými vláknami. Napríklad, priemery vlákien sú priemerne 10 μm a 100 μm (tenké plátované vlákna), čo môže viesť k značnému mechanickému narušeniu vrstiev uhlíkových vlákien. Táto porucha môže viesť k oslabeniu štruktúry, ale experimentálne údaje naznačujú, že tieto narušenia nie sú až tak významné. Výroba RCFC pozostáva z lisovania vrstiev vlákien so spojivom a zo zahriatia na teplotu medzi 180 ° C a 400 ° C pod tlakom až do 100 psi. V aplikáciách, kde je kompozitný panel pomerne hrubý musí byť tepelné spracovanie prispôbené podmienkam na prehriatie celého panelu. Vstavaný senzor by mohol poskytnúť informácie v reálnom čase, čo by umožnilo monitorovanie výrobného procesu. Informácie o teplote a sledovanie napätia v profile by mohlo mať za následok zlepšenie kvality výrobkov a výrobného procesu samotného. Ďalej by senzor mohol slúžiť pre meranie teploty a deformácií pri používaní produktu s aplikovanými snímačmi.



Obr.3.1: Monitorovanie dvoch multiplexovaných Braggových mriežkových senzorov na 824 a 823 nm nachádzajúcich sa v šiestej vrstve pred impregnovaného grafitu [6]

Tieto aplikácie by boli vhodné pre krídla, trup lietadla, atď.. Funkcia monitorovania starnúcich lietadiel ale aj moderných kompozitných štruktúr môže slúžiť ako predikcia pre zvyškovú životnosť komponentov, kontrolu štruktúrnej integrity pre prípadnú údržbu. Snímanie nárazov a trhlín môže poskytovať spätnú väzbu pre aktuátory, ktoré predstavujú napríklad tlmiče vibrácií pružných štruktúr,

tvarová kontrola štruktúr alebo tepelné a mechanické zaťaženie. Tieto aplikácie sú pre letecké a armádne aplikácie veľmi dôležité.

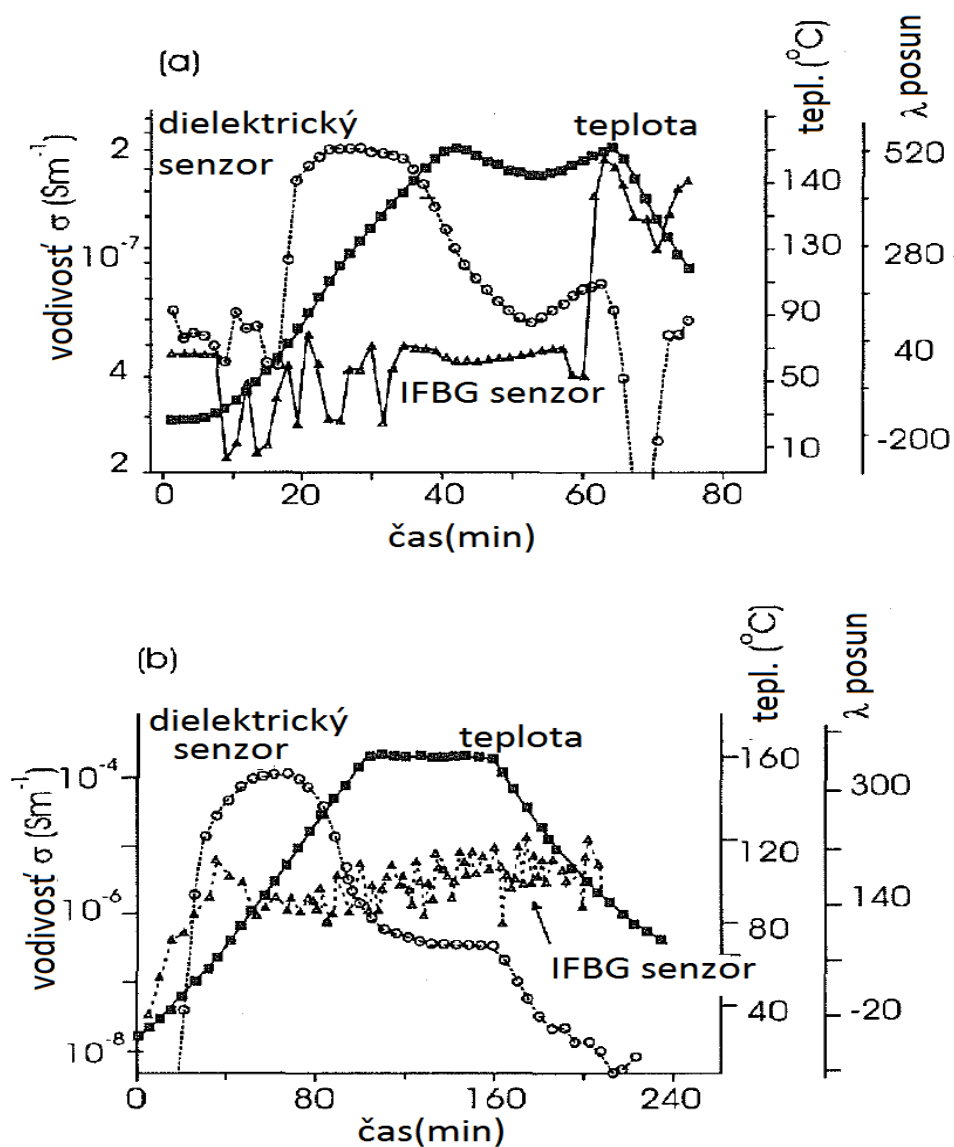


Obr.3.2: Meranie pnutia pomocou (CRTM - kontinuálne pretláčanie živice), Braggovým senzorom (štvorček) a porovnanie s konečnými elementmi (čiarkovaná čiara) a s teoretickým modelom (trojuholník) [6]

Dunphy a kol. vymedzili výhody kombinovania optických vlákien a kompozitov. Mriežky s 825 nm boli vložené do 6 - vrstvého pred impregnovaného grafitu a následne boli spolu vložené do horúceho lisu na tvarovanie a vytvrdzovanie. Jeden snímač sa nachádzal v nevytvrdenom kompozite, druhý bol použitý ako referenčný. Sledovaný program bolo tvarovanie a vytvrdzovanie pri 175 °C / 3500 lb tlaku. Obrázok 3.1 potvrdzuje nástup vitrifikácie spolu s ukázaťelným zvyškovým namáhaním v priebehu chladnutia. Bol to prvý náznak, že optimalizácia výroby a testovanie kompozitných dielov môže úspešne ťažiť z použitia optických vláknových senzorov. Friebele a kol. aplikovali senzory na princípe Braggovej mriežky počas ukladania vlákien kompozitného materiálu behom alternatívneho procesu vytvárania kompozitov - pretláčaním živice. Výsledky uvedené na obrázku 3.2 spolu s teoretickou analýzou viedli k určitej zhode. Tieto merania vychádzali z jednoosého namáhania pozdĺž mriežky, čo je nepravdepodobné, pre tento typ aplikácie. Tatam a kol. študovali vplyv vnútorného napätia v reálnom čase pri vytvrdzovaní kompozitov a tiež dôsledky nárazu na RCFC.

Merania s vloženými dielektrickými mikrosenzormi ukazujú, že je možné sledovať hladinu namáhania vyplývajúceho z nástupu skvapalnenia, gélovatenia, a vitrifikácie v okolitom živicovom

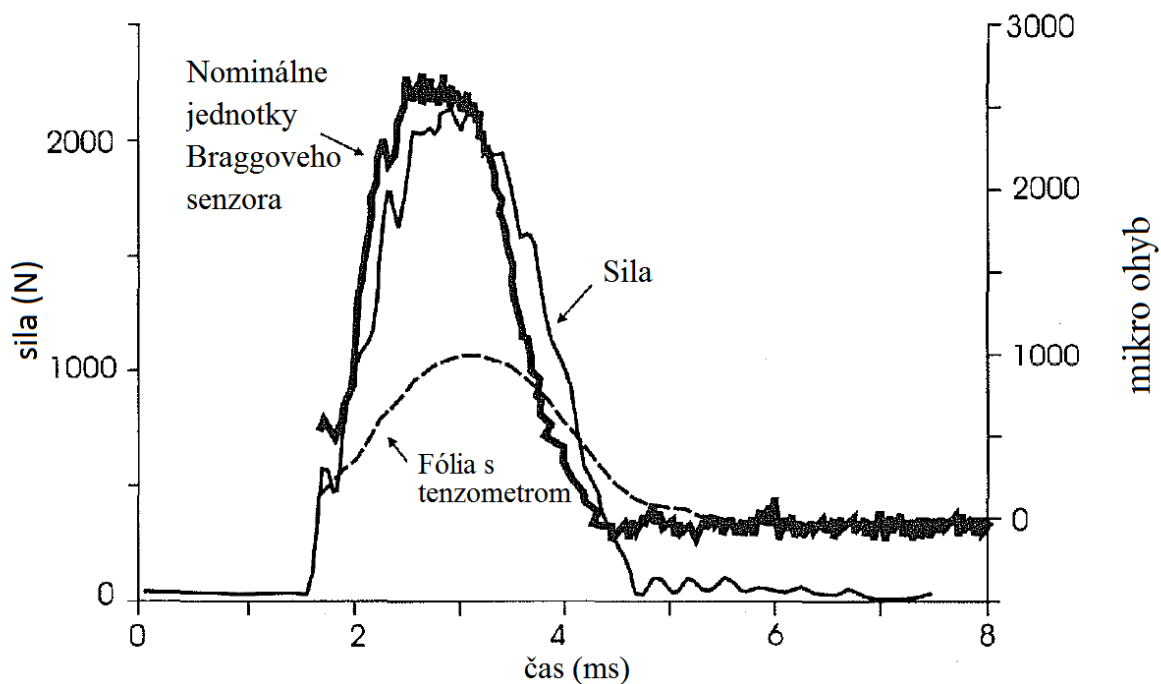
materiáli. Obrázky 3.3 (a, b) znázorňujú výsledky dvoch po sebe nasledujúcich cyklov vytvrdzovania. Informácie o napätí z mriežok ukazujú rozdiel medzi vytvrdzovacími režimami s rýchlymi zmenami teploty na obrázku 3.3 (a), čo má za následok podstatne vyššie napätie než je finálne vnútorné napätie na obrázku 3.3 (b). Konečné napätie zamerané 2 týždne po vytvrdnutí ukazovalo posun vlnovej dĺžky 0,16 nm, čo by znamenalo zvyškové napätie 330 $\mu\epsilon$ (0,48 pm/ $\mu\epsilon$ pri 836 nm), čo je v súlade s Friebeleho výsledkami.



Obr.3.3: a.) Cyklus pre kompozit z uhlíkových vlákien 934 nm, o 3 °C/min do 180 °C, b.) je vytvrdzovací cyklus o 1 °C/min do 177 °C [6]

Je tu tiež možnosť rozloženia napätí vo štruktúre, ktoré majú za následok kumulatívne zmrštenie živice v smeroch, kde nie je vystužená uhlíkovými vláknami. Zraniteľnosť vloženými

optických vlákien na poškodenie nárazom naznačuje, že poloha a orientácia vlákien má veľký vplyv na maximálnu úroveň nárazu. Obalené vlákna rozptýlené v blízkosti vrchnej časti plochy prežijú nárazy 35 J, na rozdiel od neobalených vlákien, ktoré zlyhajú nezávisne na orientácii snímačov. Obalené vlákna vložené hlbšie do štruktúry zostanú funkčné ak sú orientované v uhle 90 stupňov alebo 0 stupňov od vrstiev kompozitu, uvažujúc rovnakú nárazovú silu 35 J. Neobalené vlákna v orientácii 0 stupňov od vrstiev prežijú nárazy 15 J. Tabuľka 3.1 uvádza súhrn výsledkov a navrhuje umiestnenie FBG snímačov do vrchnej časti povrchu. Obrázok 3.4 ukazuje výsledok z merania nárazu o sile 1 J. Reakcie mriežky vykazujú rovnaké vysokofrekvenčné nepravidelnosti, ktoré chýbajú z merania tenzometrom. Šírka pásma demodulácie presahuje 25 kHz v porovnaní s 2 kHz, ako je to u tenzometra. Ide o jasný dôkaz toho, že vzdialenosť vlákna od nárazu je dôležitejšia ako celková sila nárazu.



Obr.3.4: Reakcia mriežky na 1J v čase a porovnanie tenzometra a silomera [6]

<i>Orientácia vlákna/ typ</i>	<i>Poloha povrchu</i>	<i>Integrácia</i>	<i>Zlyhanie pre obal</i>	<i>Zlyhanie pre odlúpnutie</i>
0° obal. a neobalené	Hore	Vložený	Bez zlyhania > 35 J	Medzi 25 a 35 J
0° obal. a neobalené	Dole	Vložený	Bez zlyhania > 35 J	Medzi 10 a 15 J
90° obal. a neobalené	Hore	Vložený	Bez zlyhania > 35 J	Medzi 25 a 35 J
90° obal. a neobalené	Dole	Vložený	Medzi 25 a 35 J	Neuvedené
0° obal. a neobalené	Hore	Prisadený	Bez zlyhania > 35 J	Medzi 25 a 35 J
0° obal. a neobalené	Dole	Prisadený	Bez zlyhania > 35 J	Bez zlyhania > 35 J
90° obal. a neobalené	Dole	Prisadený	Bez zlyhania > 35 J	Medzi 5 a 10 J

Tabuľka 3.1: Zraniteľnosť odhalených / obalených optických vlákien na náraz 2 mm od miesta integrácie

Spomeniem aj niekoľko väčších projektov, vyberám tie najzaujímavejšie príklady. Francúzske konzorcium DRET/AIA-Cuers-Pierrefeu/ONERA-L3C a CEA/LETI posudzuje integritu stíhacích lietadiel vzhľadom na neviditeľné dopady v rámci kompozitnej štruktúry, ako je delaminácia a praskliny. Firma Aerospatiale je do značnej miery zapojená do návrhu a výroby pokročilých kompozitných konštrukcií pre nové motory a vysokotlakové kompozitné nádrže. Nedávno začala vývoj s CEA/LETI s cieľom opatrit' vysokotlakovú nádrž tenzometrami pracujúcimi na princípe Braggovej mriežky. Photonics Group v NASA Ames Research Center vyvíja nedeštruktívny, citlivý senzor tlaku pre vrtule vrtuľníkov práve s použitím Braggovej mriežky. Tie sú zabudované v špeciálnom návleku, ktorý je hrubý len 0.15 cm a poskytuje namerané hodnoty tlaku za letu alebo pri skúškach vo veternom tuneli.

V súčasnosti sú na vrtuľníkoch umiestnené tlakové senzory, umiestnené v špeciálne vyvrtaných otvoroch. Tento deštruktívny prístup k umiestneniu senzorov vyžaduje návrh a výrobu špeciálnych a drahých krídel a rotorov. Za jeden kus sa platí vyše milióna dolárov. Ďalšie aplikácie predstavujú aplikácie senzorov do zadného rotora a ďalších dôležitých konštrukčných častí vrtuľníkov.

Vo Švédsku sa Institute of Optical Research spolu s FFA podieľa na národnom projekte s názvom SMART. Vyvíjajú merací systém na zaznamenávanie namáhania a teploty v kompozitných

materiáloch vojenských lietadiel. Záujem je tiež o zdravotné systémy, systémy na zaznamenávanie poškodenia a zaťaženia. British Aerospace vedie spoluprácu s 11 partnermi. Cieľom tejto spolupráce je zníženie potreby kontrol pre poškodenie alebo opotrebenia rôznych zariadení. Hovorí sa o znížení nákladov na prevádzku jedného lietadla v rozsahu 2.000.000 \$, vzhľadom na jeho 20 ročnú životnosť.

3.2.1 Použitie FBG pre námorníctvo

Dnes sa používajú optické vlákna pre námorné aplikácie v podstate rovnako ako na iné vojenské účely. Napríklad sa s nimi stretáme v optických hydrofónoch. Aplikácia v námorníctve je snáď jedinou oblasťou, kde je senzorové vybavenie podobné tomu v lietadlách. Dopyt po senzoch je však omnoho menší. Námorné lode sa čím ďalej, tým viac modernizujú a vybavujú komplexnejšími počítačovými systémami. Spracovanie dát a ich prenos, ako aj nízka hmotnosť celej IT sústavy je veľmi dôležitá. Výhody ponúkané optickými vláknami a optickými snímačmi pre komunikáciu a snímanie, sú preto veľmi atraktívne.

Väčšinu typov senzorov vo všeobecnosti nájdeme aj v iných aplikáciách, ako napríklad v stavebníctve. Ďalšie využitie by mohlo byť napríklad pri ťažbe nerastných surovín, kde sú na snímače kladené vysoké nároky. Musia pracovať s vysokou spoľahlivosťou aj vo veľmi drsných podmienkach, ktoré nie sú bežnými elektronickými senzormi dobre tolerované.

3.2.2 Aplikácie v stavebníctve a monitorovanie štruktúr

Existuje rastúce znepokojenie nad stavom civilnej infraštruktúry v Spojených štátoch a Európe. Je nevyhnutné, aby bolo monitorované mechanické zaťaženie mostov, priehrad, tunelov, budov a športových štadiónov. Meraním distribuovaného napätia v budovách by bolo možné predpovedať povahu a stupeň zaťaženia budov, napríklad po zemetrasení. Mechanický stav mostov musí byť neustále pod kontrolou, keďže sú často nadmerne zaťažené čo vedie k možnosti zvýšenej konštrukčnej poruchovosti. Department of Transportation, USA zverejnil prieskum odhadujúci že 40 % všetkých mostov v Spojených štátoch je v zlom mechanickom stave. Štrukturálne zlyhanie Forth Road Bridge v Škótsku (postavený v roku 1964) o tom svedčí. V decembri 1997 jedna z oceľových skrutiek zaisťujúca závesné káble praskla. Spomenutá skrutka, 60 cm dlhá s priemerom bežmála 7 cm, bola jednou zo 768, ktorá zabezpečovala závesné laná o cestu. Oceľové laná boli tiež v zlom stave. Mostu sa nevyhla nutná rekonštrukcia za 9 miliónov dolárov. Mnohé železničné mosty v USA sú v zlom technickom stave. Dané je to ich vekom cca 50 rokov.

Súčasná kontrolná rutina závisí na pravidelných vizuálnych kontrolách. Použitie moderných optických senzorov by viedlo k meraniam v reálnom čase, pomocou ktorých by sa dali sledovať závady na stavbách. Optické vláknové senzory umožňujú prenos dát na veľké vzdialenosti do centrálného monitorovacieho centra. Výhodou optických vlákien je, že môžu byť buď pripojené k

existujúcej konštrukcii alebo vložené do novej štruktúry. Dal by sa tým sledovať stav stavebnej konštrukcie v priebehu jej celej životnosti.

Jednou z najdôležitejších aplikácií pre FBG snímače je aplikácia do inteligentných štruktúr. Mriežka je vložená v tomto prípade priamo do štruktúry pre sledovanie napätí. Pre bezchybné, kvázi - statické meranie napätia je nutná kompenzácia tepelných výkyvov. Táto aplikácia by mohla viesť ku stavbám, ktoré by si pomocou systému sledovali svoj stav a plánovali ich prípadnú údržbu. Tento systém by spájal dohromady niekoľko odvetví ako sú umelá inteligencia, materiálové vedy a staviteľstvo. Nájde sa niekoľko typov snímačov na princípoch optických vlákien, ktoré dokážu merať napätie v takýchto štruktúrach, je to napríklad snímač Fabry-Perot.

Napríklad, Lee a kol použili systém 16 senzorov typu Fabry-Perot pre monitorovanie napätia na moste Union Pacific, vedúcom cez rieku Brazos v Waco, Texas. Tieto vláknové senzory boli umiestnené v kritických bodoch pre meranie dynamického zaťaženia vyvolaného vlakmi, ktoré cez tento most jazdia. Dáta zaznamenané z týchto senzorov súhlasia s dátami nameranými z konvenčných tenzometrov.

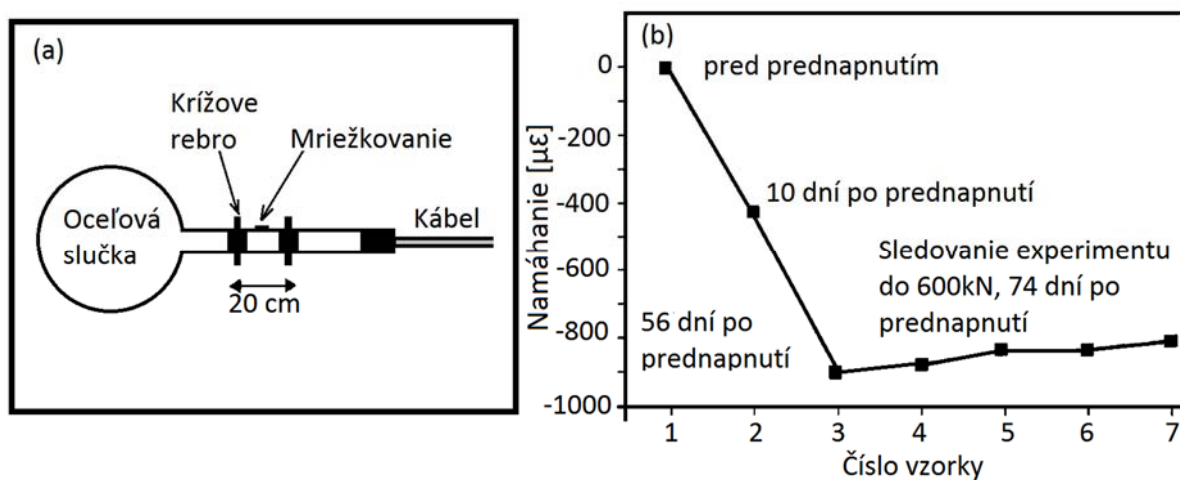
FBG senzory vykazujú v súčasnosti najlepšiu aplikovateľnosť na "smart structures"(chýtré stavby). Vybavenie pre aplikáciu na veľkých konštrukciách je relatívne lacné a presné. Optické vláknové senzory sú robustné s pevnosťou v ťahu viac ako je tomu u ocele. S vhodnou ochranou povrchu vlákna môže byť zachovaná mechanická integrita vlákna. Za správnych podmienok dôjde k zlyhaniu sensorovej mriežky iba pri porušení konštrukcie ako celku. Vlnová dĺžka posunu napätia je lineárna a nemá žiadne oneskorenie, preto je možné dlhodobé sledovanie konštrukcií

3.2.3 Aplikácie na mostoch

Aplikácií Braggovej mriežky na monitorovanie štruktúr existuje naozaj veľa. Jedno z prvých použití (1993) bolo prevedené na meraní napätia na moste Beddington Trail neďaleko Calgary v Kanade. 16 senzorov bolo umiestnených do oceľových výstuží v betóne a tiež do žíl uhlíkových vlákien použitých v nosníkoch mostu. Tento projekt poukázal na uskutočniteľnosť pre dlhodobé monitorovanie mostných konštrukcií, ktoré bolo predtým považované za nepraktické. Projekt mostu I-10 v Las Cruces, New Mexico, využíva radu 67 optických senzorov pripojených k oceľovým štruktúram podporujúcich most. Sensory merajú napätie vznikajúce prejazdom automobilov po vozovke mostu. Sensory určujú počet ťažkých nákladných automobilov, ktoré cez most jazdia a tiež štruktúrnu rezonanciu spôsobenú dynamickým zaťažením. V projektoch ako sú mosty môžu byť senzory taktiež použité na identifikáciu poškodenia alebo zhoršenia stavu umiestnením senzorov v kritických, vysoko namáhaných miestach. Súčasný výskumný program na čele s Fuhr a Huston z University of Vermont, zavádza rozšírené používanie optických senzorov na báze optických vlákien,

vrátane FBG snímačov na monitorovanie mostu Waterbury Vermont Steel Truss. Snímače sú zaliate do plastu, ktorý je následne vsadený do štruktúry v betóne. Ďalšie FBG snímače sú pripevnené epoxidom priamo na nosných častiach mostu, pod ochrannou vrstvou. Merania z vláknových senzorov sú privedené do centrálneho počítača, kde sú analyzované a následne zobrazené na internete.

Meissner a kol. aplikovali FBG snímače do betónových blokov a zaťažili ich silou 150 kN, za cieľom premerania lineárnej odozvy pri zaťažení. Snímače boli testované na 72 m dlhom betónovom moste na diaľnici A4 pri Drážďanoch v Nemecku. Nosič snímača chráni FBG pred poškodením pri stavbe mosta (obrázok 3.4 (a)) a tiež zabráňuje skresleniu merania, ktoré môže vyplynúť z mikrotrhlín v konštrukcii. Vláknó je vložené v drážke v ocelí (priemer 6 mm) a je vybavené dvomi priečnymi rebromi, ktoré zaručia dobrý kontakt medzi nosičom snímača a betónom. Dve takéto zariadenia boli inštalované v strede mosta pri jeho výstavbe. Predtým než boli vložené snímače do konštrukcie, bolo napätie programovo nastavené na nulu a následne bolo sledované napätie pri plnej prevádzke mosta (obrázok 3.4 (b)). Pri aplikácii snímačov sa musí rátať s ich predpätím pri meniacich sa klimatických podmienkach. Budúce použitie vidí tento kolektív v kontrolovaní premávky na mostoch vzhľadom na ich maximálne zaťaženie.



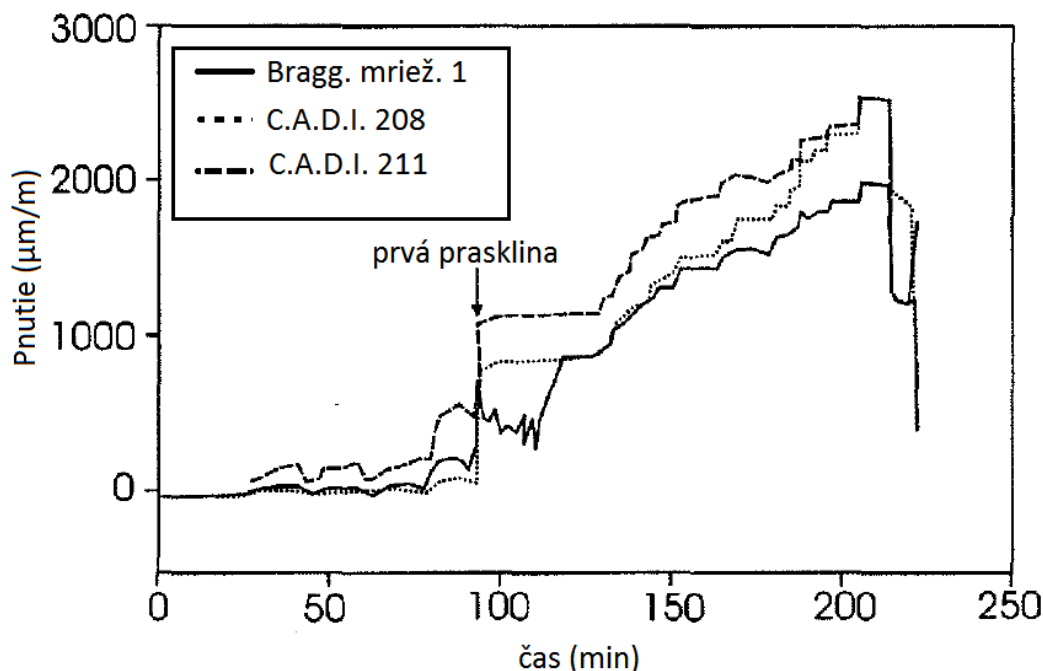
Obr.3.5: a.) Umiestnenie Braggoveho mriežkového senzoru, b.) Histogram jedno Braggoveho senzoru [6]

Napokon, Dewynter-Marty a kol. uskutočnili testy na praskanie a namáhanie pomocou povrchových snímačov. Merania boli uskutočnené na ukotvovacích prvkoch, ktoré ukotvujú objekt alebo štruktúru k zemi.

Výsledky sú prezentované pre napätie a šírenie trhlín, ktoré boli namerané prenosným prístrojom pracujúcim na princípe FPF (Fabry - Perot Filters) a 40 nm super svietivej diódy 1,3 μm . Dané výsledky sú platné pre betónové valce a obdĺžnikové podlahové bloky, ktoré môžu byť použité na akejkoľvek štruktúre. Merania napätia na betónovej valcovej ploche, porovnávajúc FBG, odporový

tenzometer a indukčné snímače umiestnené na protiľahlých bodoch na obvode namáhaného vzorku. Namáhanie rastie až do 1200 kN v 100 kN krokoch. Teoretická krivka sa vypočíta z Hookovho zákona a uvádza, že senzory FBG a odporový tenzometer merajú dobre od 0 - 700 $\mu\epsilon$ s presnosťou $\pm 2,8 \%$ a $\pm 1,3 \%$ na celej stupnici.

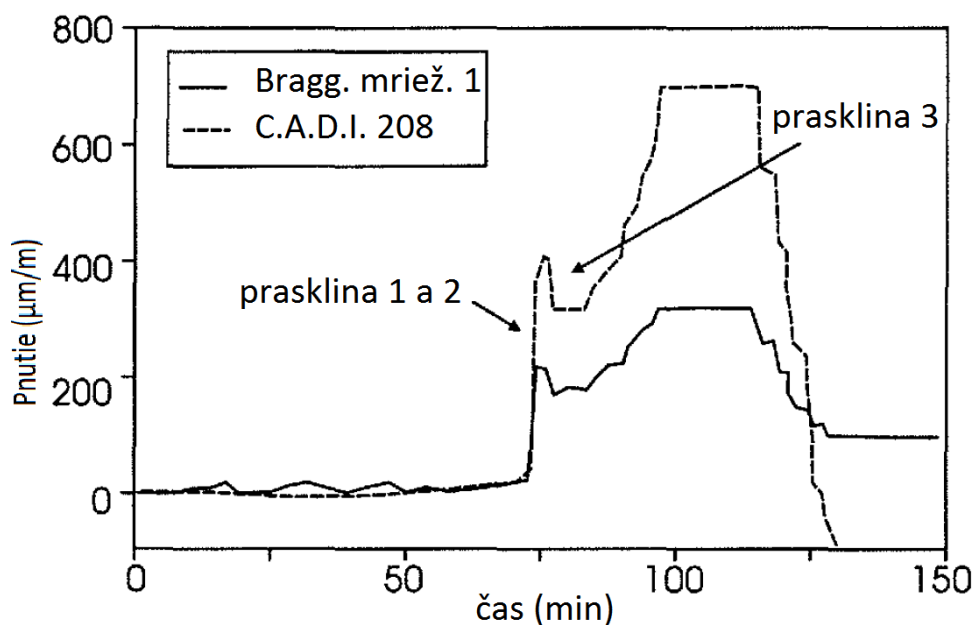
V druhom pokuse sa opakuje 10 záťažových cyklov až do 1000 kN s rýchlym návratom k nule. Test je navrhnutý na kvantifikáciu kolísania okolo nulového bodu v dôsledku možného posunutia kotviaceho bodu. Optické senzory preukázali návrat k nule $\pm 3 \eta\epsilon$, dobrú reprodukovateľnosť $\pm 3 \mu\epsilon$ a $\pm 4 \mu\epsilon$ opakovateľnosť (30 priemerov). Indukčné a FBG senzory boli umiestnené na betónovú podlahu (1.5 m dlhá, 1 m široká a 0,26 m vysoká) a na vytvorenie slabých miest boli použité kovové dosky. Tenzometre mali pri zaťažení prah napätia 2 $\mu\epsilon$ v porovnaní s 30 $\mu\epsilon$ na indukčnom snímači. Obrázok 3.6 ukazuje výsledky pri aplikovanej sile 1 000 kN a zobrazuje, že indukčný snímač umiestnený na okraji štruktúry meria najväčšie napätie. V tomto mieste sa formuje prasklina. FBG senzor 1 indikuje trhlinu pri 500 μm . Merania boli tiež uskutočnené s FBG tenzometrami, komerčnými tenzometrami a externe pripojenými indukčnými snímačmi. Napätie na FBG vykazuje dobrú linearitu $< \pm 2\%$ v plnom rozsahu, zatiaľ čo všetky ostatné typy senzorov zobrazujú zvyškovú hodnotu. Hodnoty zvyškového napätia pre FBG tenzometre je medzi 2 a 50 $\mu\epsilon$ s reprodukovateľnosťou menej ako 7 $\mu\epsilon$ a opakovateľnosťou menej než 5 $\mu\epsilon$ (30 priemerov).



Obr.3.6: Tri senzory reagujúce na prasklinu v štruktúre [6]

Pre meranie podlahy sa záťaženie zvýšilo do 600 kN po 50 kN krokoch. Pri záťaži 350 kN sa objavia dve trhliny. Mriežka meria napätie 228 $\mu\epsilon$ pre trhlinu o rozmere 45,6 μm a pôsobiaca sila sa

pomaly znižuje na 0 kN. Snímače v danom mieste zostávajú na hodnote napätia $90 \mu\epsilon$ s prasklinou so šírkou $18 \mu\text{m}$ (Obrázok 3.7). Tieto experimenty jasne ukazujú, že FBG senzory sú schopné detekovať a sledovať skoré štrukturálne závady na meracom rozsahu $2500 \mu\epsilon$.



Obr.3.7: Tri senzory reagujúce na prasklinu v štruktúre [6]

3.2.4 Údržba štruktúr a aplikácie v tuneloch a podzemných stavbách

V stavebníctve rastie dopyt po nových materiáloch. Sú to napríklad materiály polyméry vystužené vláknami (FRP). Tieto materiály sú odolné proti korózii a majú väčšiu životnosť ako ich oceľoví konkurenti. K dispozícii však nie sú dlhodobé skúsenosti s týmito alternatívnymi materiálmi, preto sú potrebné dlhodobé merania a sledovania. Nedávne predstavenie 65 FBG snímačov na moste Taylor pri Winnipeg, v Kanade prinieslo aj FRP výstuže, podporné konštrukcie pre betónové nosníky a časti mostovky tiež z tohto nového materiálu.

Podporné káble z uhlíkových vlákien boli taktiež použité ako náhrada za oceľové na moste Storck v Winterthur, Švajčiarsko. FBG snímače boli uchytené na obvod podporných káblov alebo pripevnené na 2 m dlhé oceľové tyče a následne zapustené do betónu. FBG systém bol demodulovaný na 0.5 m spektrometer s CCD, čím bolo získané rozlíšenie napätia $1 \mu\epsilon$ pri frekvencii 10 Hz.

Okrem toho, môžu byť vláknové senzory tiež použité na sledovanie namáhania v priebehu výstavby. Svedčí o tom aplikácia 32 FBG snímačov na moste Vaux v blízkosti Lausanne v Švajčiarsku. V tomto prípade bolo napätie merané pri presune obrovských oceľových nosníkov, určených na piliere.

Ďalšou aplikáciou v rámci Európskej únie je projekt STABILOS sledujúcich tunel Mont-Terri vo Švajčiarsku pod taktovkou CSEM. Sieť snímačov pozostáva z FBG snímačov, ukotvených medzi sebou do série. Na demoduláciu je použitý rotačný filter .

Spomeňme projekt COSMUS, ktorý začal v decembri 1996 a trval po dobu 3 rokov, s cieľom zlepšiť bezpečnosť stavebných prác. Cieľom bolo posúdiť a kontrolovať podzemné pohyby s presnosťou 1 mm pri vývoji podzemných dopravných systémov. Sensory používané v stavebníctve v súčasnej dobe tento cieľ ešte nedosahujú, preto sú stále vo vývoji.

3.3 FBG senzory pre zdravotníctvo

Jednou z prvých aplikácií optických vlákien bola aplikácia endoskopov, ktoré priniesli svetlo do neprístupných oblastí ľudského tela. S príchodom optických sensorov na báze optických vlákien vzrástol dopyt pre ich aplikáciu na meranie fyziologických parametrov (LUXTRON Corporation a senzory Fabry - Perot).

Vnútna elektrická izolácia a odolnosť proti elektromagnetickému rušeniu sú užitočné najmä v zamedzení úrazu elektrickým prúdom. Nastáva to hlavne v prípade, keď je na pacientovi prevádzaná defibrilácia po náhlej srdcovej zástave. Veľkosť optických katétrov umožňuje meranie funkcií orgánov a to s minimálnym narušením tela pacienta. Prenášať sa dajú rôzne dáta ako dáta o teplote, tlaku a akustických poliach. Dochádza k minimálnemu narušeniu tkanív vďaka dielektrickým vlastnostiam optického vlákna a malej veľkosti snímača. Ten je dosť malý na to aby nezasahoval do ďalších lekárskeho postupov ako je napríklad hemodialýza.

Senzory musia byť z inertného materiálu, aby sa zabránilo nežiadúcej reakcii imunitného systému. Rastie záujem o termálne terapie a metódy, ktoré sú minimálne invazívne. Termálne terapie spočívajú v zvýšení telesnej teploty o 10 stupňov Celzia po dobu 20 - 60 minút. Nový trend zahŕňa terapie využívajúce akustické výstupy z diagnostických ultrazvukových systémov a postupne sa rozširujú aj terapeutické aplikácie vysokej intenzity ultrazvuku.

Pomocou spomenutých metód sa liečia napríklad choroby prostaty, srdcová arytmia, terapia na liečbu rakoviny prsníkov a odstránenie niektorých neoperovateľných nádorov. Intenzívne elektrické alebo ultrazvukové pole môže mať za následok lokálny nárast teploty až o niekoľko desiatok stupňov, čo musí byť presne merané. FBG snímače majú za úlohu merať ultrazvukové, teplotné a tlakové polia v poškodených bunkách alebo v tkanive.

Sú atraktívne ako takmer neinvazívne senzory, ktoré môžu byť vložené do katétra alebo do injekčnej ihly. Jediným skutočným problémom je otázka presnosti a stability. FBG senzory by mohli vyriešiť aj problém s masovou produkovateľnosťou snímačov na jedno použitie [6].

4 Realizácia experimentálnej zostavy

V tejto časti práce je popísaná realizácia meracej zostavy. Úlohou bolo vymyslieť vhodné uchytenie optického vlákna s Braggovou mriežkou na membránu reproduktora, tak aby vlákno bolo smerované od viacerých miest reproduktora do napínacej sústavy. Napínacia sústava obsahovala upínacie čeluste, ktoré boli umiestnené na silomere. Silomer bol uchytený na kovovej konštrukcii nezávislé na reproduktore. Nezávislé preto, aby pri meraní neboli vibrácie z reproduktora priamo prenášané na konštrukciu čo by znamenalo ovplyvnenie výsledkov a tým aj nesplnenie zadania práce. Dôležitým faktorom bolo dodržanie rovnakých podmienok pri každom meraní. Preto bolo potrebné konštrukciu označiť na podlahu, aby bolo jasné ako treba posunúť konštrukciu do prvotného mnou určeného stavu. K ďalšej záležitosti zabezpečenia meracích podmienok bolo umiestnenie silomera presne nad stred reproduktora. Pomocou olovnice sa vyznačil stred na prichystaný papier nalepený na podlahe. Následne som spravil kríž súmernosti, podľa ktorého sa bude reproduktor pootáčať o 90°.

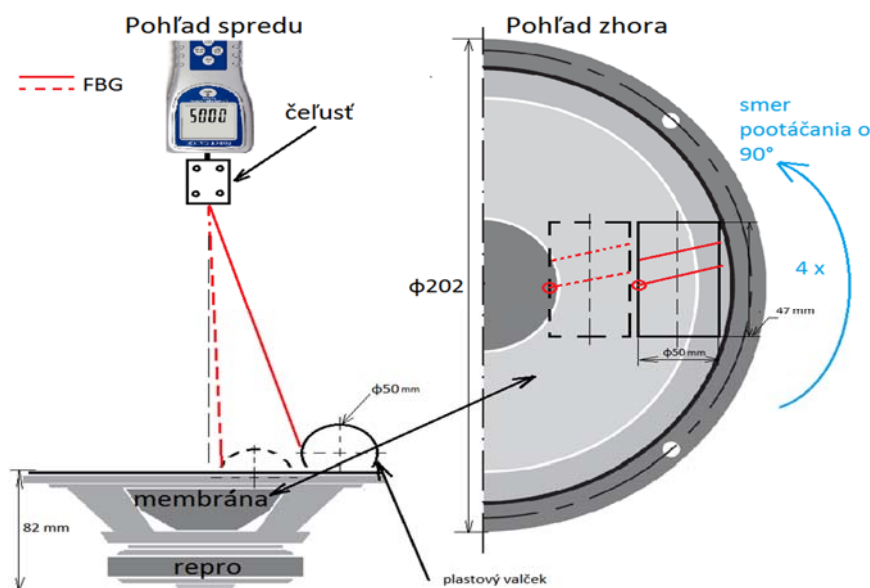
Pootáčanie reproduktora bude slúžiť na spriemerovanie nameraných hodnôt aby sa predišlo chybe v meraní. Popri pootáčaní bude vlákno presúvané z okraja membrány ku stredu aby bolo možné ukázať, že reproduktor kmitá mierne odlišne na okraji a v strede jeho membrány.

Konkrétne uchytenie FBG som riešil pomocou PVC valčeka o rozmere $\Phi 50$ mm a dĺžke 47 mm. Valcovitý tvar a rozmer som riešil zámerne tak, aby sa vlákno nezalomilo. Pri menšom priemere by mohlo dôjsť k zalomeniu a tým aj vyviazaniu svetla z vlákna. V takom prípade by nám svetlo vyšlo von z vlákna a nemohlo by sa odraziť od Braggovej mriežky vo vlákne. Vtedy by sme nespíjali žiadne zmeny v citlivosti na frekvencie púšťané do reproduktora pomocou frekvenčného generátora. Vlákno na valčeku bolo navinuté a prilepené pomocou obojstrannej lepiacej pásky s nosnosťou do 10 kg. Takáto páska zabezpečí stabilné uchytenie na valčeku. Po tomto je možné vlákno aj s valčekom prísť na membránu reproduktora. Toto uchytenie bolo z hľadiska prístupu a veľkosti reproduktora najvhodnejšie. V meraní sa bude používať viacero druhou FBG, a preto tento proces uchytenia nie je časovo až tak náročný a je opakovateľný niekoľkokrát.

Na uchytenie vlákna bolo viacero nápadov, ale po otestovaní bolo zistené, že nedokážem dosiahnuť dostatočne dobré podmienky pre meranie v prípade prilepenia vlákna priamo na reproduktor. Vďaka chveniu sa postupne vlákno uvoľnilo a tým nebolo možné korigovať napnutie vlákna pomocou silomera na určenú silu (1.0, 1.5 a 2 N). V prípade prísť to bolo najvhodnejšie. Silu bolo možné dodržať s malými korekciami na silomere. Preto bolo v rámci možnosti toto uchytenie najvhodnejšie.

Príprava k meraniu zahŕňala aj výber vhodného reproduktora, ktorý má škola vo vlastníctve. Ako najvhodnejší sa javil reproduktor REDSUN. Bol to basový reproduktor, ktorý by bol vhodný pre

meranie, pretože jeho zdvih membrány bol dostačujúci na zosnímanie pomocou FBG. V konečnom dôsledku tento reproduktor bol použitý iba pre vyladenie a návrh meracej zostavy, pretože nebolo možné získať amplitúdovo frekvenčnú charakteristiku. Tento výrobok sa už dlhšie nevyrába a nebolo možné okrem značky zistiť nič bližšie k jeho charakteristike. V podstate poslúžil ako maketa pred kúpou nového reproduktora s datasheetom. Jedná sa o stredobasový reproduktor MANOCOR o rozmere 202 x 183 x 82 mm. Jeho frekvenčná charakteristika je od 20 do 20 000 Hz.



Obr.4.1: Ilustračná schéma uchytenia FBG na membránu reproduktora

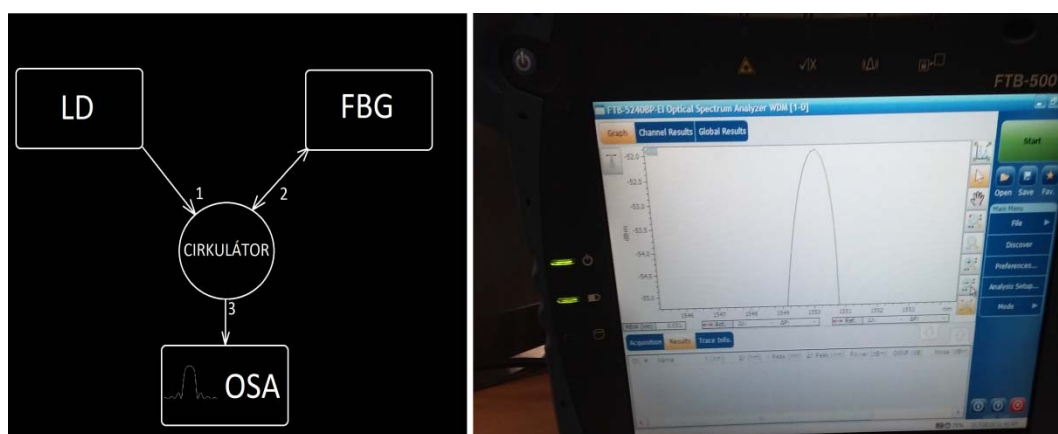
Na obrázku (4.1) je ilustrované pre predstavu hlavne nezávislému čitateľovi aby videl, že meranie bude prebiehať na okraji a v strede reproduktora s pootáčaním po 90° a napínaním po definovaných silách. Je možno dobré podotknúť, že vlákna použité v meraní sú s primárnou ochranou a práca s nimi musí byť opatrná aby nedošlo k pretrhnutiu alebo k poškodeniu tohto vlnovodu.



Obr.4.2: Fotky realizácie a prípravy k meraniu

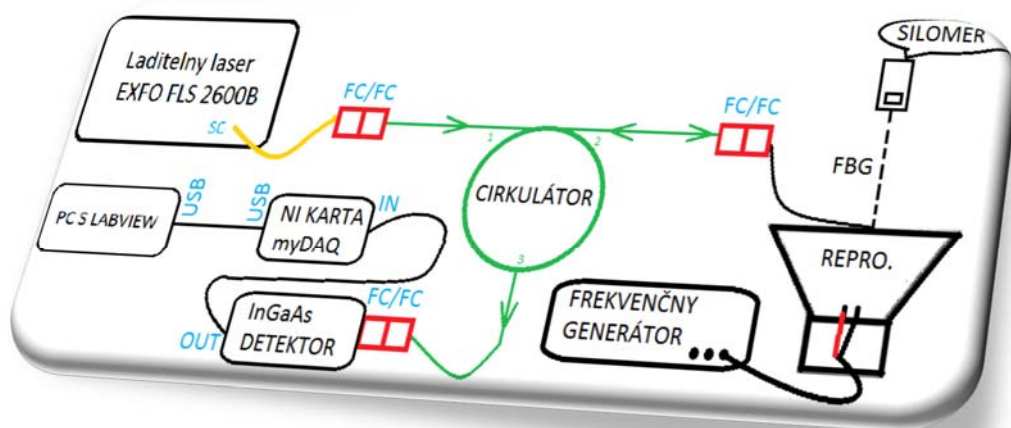
Obrázok 4.2 zachytáva uchytenie vlákna v čeľustiach silomera. Konkrétne pre túto zostavu sa použil digitálny merač sily Lutron FG - 6005SD. Tento merací prístroj slúži na meranie tlakovej a ťahovej sily. Ťahová a tlaková sila je v rozpätí od 0,03 do 49,03 N. Prístroj FG - 6005SD má viacero funkcií, ale pre meranie vďaka jeho rozsahu je využitý na napínanie vlákna voči reproduktoru od 1 do 2 N. Na rozkmitanie reproduktora bol potrebný generátor funkcií. Konkrétne na meranie mi bol poskytnutý prístroj od výrobcu ROHDE&SCHWARZ HMF2550. Tento prístroj dokáže generovať viaceré typy signálov napr. pílovitý signál alebo sínusový. V mojom meraní bol pomocou tohto prístroja generovaný na výstupe sínusový signál. Použitý prístroj má veľký frekvenčný rozsah od 10 μ Hz do 50 MHz. V našom prípade som zvolil v meraní rozsah od 20 do 300 Hz, ale o tomto budú informácie spomenuté pri vyhodnocovaní výsledkov v ďalších kapitolách práce. Bližšie informácie k tomuto prístroju sa môžeme dočítať na [8], pretože cieľom merania nebolo dopodrobna skúmať tento prístroj.

Doposiaľ spomenuté prístroje neboli viac - menej optického charakteru a preto v meraní boli samozrejme použité zdroje žiarenia, optické vlákna, spojky, cirkulátor atď. Pred zahájením merania bolo potrebné tri Braggove mriežky určené na meranie pozrieť pomocou LD zdroja za pomoci LD drivera, teplotného a laser diódového kontrolera od firmy THORLABS. Z LD drivera smerovalo zapojenie na vstup cirkulátora označeným ako číslo 1. Cirkulátor má tri porty, a preto výstup číslo dva šiel na konektor FC na FBG. Výstupné reflexné spektrum sa získalo z portu číslo 3 zapojeného do optického spektrálneho analyzátoru. Ako optický spektrálny analyzátor (OSA) bol použitý prístroj EXFO FTB-500 s kartou OSA. Toto prípravné meranie bolo uskutočnené pre mriežky na skontrolovanie pracovnej vlnovej dĺžky a pre určenie korekcií pri výslednom meraní, pokiaľ by bola odchýlka voči hodnotám vlnových dĺžok udávaná výrobcom FBG. Na nasledujúcom obrázku (Obr.4.3) je nakreslená ilustračná schéma zapojenia pri overovaní vlnovej dĺžky s fotkou výstupu na prístroji EXFO FTB 500. Je to fotka priblíženého spektra pomocou funkcií na priblíženie v tomto prístroji.



Obr.4.3: Vľavo - ilustračná schéma, vpravo odrazené spektrum od FBG zobrazené na OSA

Po určitých úkonoch a zoznámením sa s problematikou a prezretím spektier som pristúpil k bodu, kde bolo potrebné už zostaviť finálnu zostavu, kde sa už bude meniť len vlákno na reproduktore a sila napnutia vlákna. Bolo treba pre zostavu určiť aký zdroj sa bude používať pri meraní, ako sa budú výsledné hodnoty zaznamenávať atď. Pre celé meranie bude použitý laditeľný laser EXFO FLS - 2600B, ktorý ma rozsah nastaviteľných vlnových dĺžok 1510 - 1612 nm, ktoré sa preladujú pomocou teplotnej zmeny. V meraní sa bude využívať aj funkcia jemného ladenia, na presne doladenie potrebnej vlnovej dĺžky. Výkon sa nastaví na hodnotu 0 dBm (1 mW). Podobne ako v predchádzajúcej pasáži svetelný zdroj je napojený na cirkulátor na port 1. Z portu 2 je svetlo vedené na FBG, ktoré je už umiestene na membráne reproduktora. Port 3 na cirkulátore bude slúžiť na odvedenie časti výkonu odrazeného od FBG s intenzitou odrazu závislého na konkrétne použitej mriežke. Každá použitá mriežka ma odlišnú odrážavosť, takže intenzita je odlišná. Odvedený svetelný výkon je privedený na detektor THORLABS PDA10CS - EC vďaka, ktorému bude možné snímať zmeny v závislosti na zmenených parametrov ako je napr. sila napnutia vlákna. V konečnom dôsledku je z optickej domény prevedený výsledok do elektrickej domény. Elektrická doména v podobe napätia je zaznamenaná na počítači pomocou karty od firmy NATIONAL INSTRUMENTS (NI) myDAQ. Hodnoty z karty sú dostupné na počítači vďaka programu od NI Labview 2014 (64 bit). Hodnoty budú zaznamenávané v dBV ako špičky maxim na jednotlivých frekvenciách.



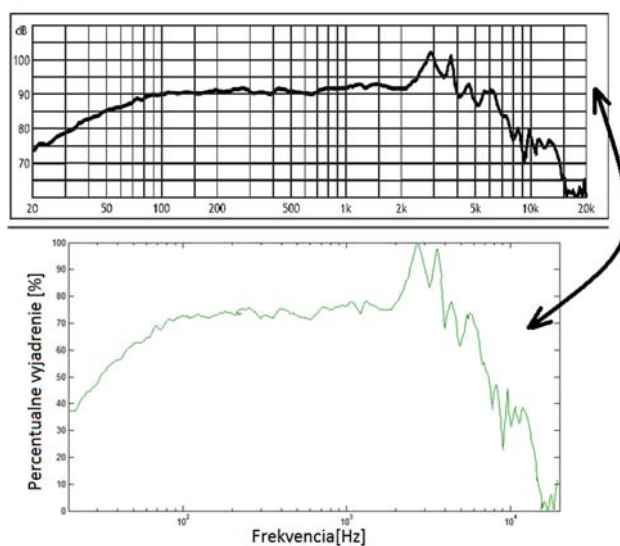
Obr.4.4: Ilustračná schéma celej výslednej zostavy

4.1 Vyčítanie hodnôt z amplitúdovo frekvenčnej charakteristiky repro.

Aby bolo možné regulárne vyhodnotiť meranie je dôležité mať výkonové úrovne reproduktora v číselných hodnotách. V číselných hodnotách, tak aby bolo možné povedať aký konkrétny akustický výkon ma reproduktor na určitej frekvencii. Preto pri kúpe reproduktora bolo potrebné vybrať

reproduktor takej značky, ktorá vie dodať k parametrom reproduktora aj amplitúdovo frekvenčnú (A - F) charakteristiku. Ideálne by bolo ak by táto charakteristika bola v číselných tabuľkových hodnotách a z tých by sa dal rovno vytvoriť graf závislosti výkonu na frekvencii. Použitý reproduktor takúto charakteristiku ma len v grafickej forme v rozsahu približne od 20 do 20 000 Hz. Tieto parametre je potrebné dostať na číselné hodnoty, pretože tieto hodnoty by bolo vhodné odčítať alebo spraviť percentuálny pomer pri vyhodnocovaní nasnímaných hodnôt detektorom. Pokiaľ by sme tieto hodnoty nezistili, tak vo výsledkoch by bol zahrnutý aj čisto akustický výkon reproduktora a tým by nebolo možné určiť na akých frekvenciách ma konkrétna FBG najlepšiu citlivosť, pri akej sile ma citlivosť najvyššiu atď.

Riešenie ako previesť hodnoty z grafu na numerické tabuľkové hodnoty som našiel v použití programu PLOT DIGITIZER(P-D) [9]. Je to program naprogramovaný v Java a slúži na digitalizáciu naskenovaných alebo inak vytvorených grafov. V mojom prípade je datasheet k reproduktoru vo formáte PDF, tak bolo ešte potrebné exportovať obrázok do PNG alebo GIF, JPEG formátu. Výhoda je, že program pracuje nie len s lineárnym, ale aj s logaritmickým merítkom. Po aplikovaní vo výsledku máme rozsah od 20 - 20 000 Hz, kde sú jednotlivým frekvenciám pridelené výkony v dB. Pomocou týchto hodnôt je možné graf zrekonštruovať pre kontrolu správnosti. Celé frekvenčné pásmo reproduktora je v prílohe 1.



Obr.4.5: Zrekonštruovaný graf z hodnôt vyčítaných pomocou P-D

Na obrázku 4.5 vpravo je vyobrazený graf, kde bol výkon prevedený na percenta pre neskoršiu potrebu pri vyhodnocovaní konečných výsledkov merania. Tieto výsledky prepočítané na percenta budú použité k percentuálnemu pomeru s nameranými hodnotami, kde reakcia FBG na frekvenčnú zmenu bude očividná ak bude percentuálny pomer 1 a viac. Po tomto je možné si z prílohy 1 vyparsovať už hotové percentuálne hodnoty pre meranie. V meraní bol použitý rozsah od 20 - 300 Hz,

pretože pri skúšobných meraniach mriežky nad 300 Hz slabo reagovali. Nasledujúca tabuľka obsahuje hodnoty už v percentách. Výkonové hodnoty v dB bolo potrebné previesť na percenta z dôvodu, že namerané hodnoty budú napätia na NI karte v dBV a nie v dB. Preto by nebolo možné porovnávať tieto dva výkony priamo, ale jedine spomínaným percentuálnym pomerom.

Vzorový prepočet pre 20 Hz (priloha1):

$$f = 20 \text{ Hz} , P_{repro_20\text{Hz}} = 75,98 \text{ dB} , P_{repro_max} = 102,56 \text{ dB} , P_{repro_min} = 60,31 \text{ dB} , \\ y = P_{repro_max} - P_{repro_min} = 42,25 \text{ dB}$$

$$P_{repro_ \%_20\text{Hz}} = 100 - \left(\frac{P_{repro_max} - P_{repro_20\text{Hz}}}{y/100} \right) [\%] \quad (4.1)$$

$$P_{repro_ \%_20\text{Hz}} = 100 - \left(\frac{102,56 - 75,98}{0,4225} \right) = 37,1 \%,$$

kde P_{repro_max} je maximálna hodnota z celého rozsahu reproduktora, P_{repro_min} je minimálna hodnota a y je rozdiel medzi maximom a minimom.

Frek. repro [Hz]	Percent. vyjadrenie výkonu [%]	Frek. repro [Hz]	Percent. vyjadrenie výkonu [%]	Frek. repro [Hz]	Percent. vyjadrenie výkonu [%]	Frek. repro [Hz]	Percent. vyjadrenie výkonu [%]
20	37,10	31	49,56	60	64,33	170	73,89
21	37,21	32	51,02	70	68,61	180	74,43
22	37,20	33	51,64	80	70,64	190	73,81
23	39,28	34	52,26	90	71,65	200	73,49
24	41,77	35	53,82	100	72,97	230	75,20
25	42,81	36	54,13	110	71,95	260	75,28
26	44,27	37	55,22	120	72,81	280	73,64
27	44,68	38	55,46	130	72,49	300	71,77
28	45,93	39	56,08	140	72,02	-	-
29	46,55	40	56,23	150	72,41	-	-
30	47,49	50	62,46	160	73,11	-	-

Tabuľka 4.1: Tabuľka hodnôt repro. potrebná k výpočtu percentuálneho pomeru

4.2 Popis tvorenia grafov

V predchádzajúcej kapitole a podkapitole som spomínal realizáciu ako bude meranie prebiehať. V tejto podkapitole by som chcel ukázať na vzorovom príklade ako som po nameraní výsledkov dostal jednotlivé percentuálne pomery aby bolo očividne z akých hodnôt boli grafy poskladané a vytvorené v programe MATLAB, kde pomocou príkazu `plottools` sa nám zapne editor grafov. Ako už bolo spomenuté bol meraný rozsah od 20 - 300 Hz a to v strede reproduktora štyrikrát

a na okraji štyrikrát a to pre jednotlivé silové napätia od 1 do 2 N. Tak isto tento celý proces bol aplikovaný v každom meraní, keďže boli použité tri parametrovo odlišne FBG. Keď by som to popísal pre jedno meranie, tak z nameraných hodnôt v každom určenom bode na reproduktore sa pre danú frekvenciu spravil priemer hodnôt, tj. pre každú frekvenciu sme vo výsledku mali jediná zápornú hodnotu v dBV. Keďže vo výsledku budú uvedené percentuálne pomery, tak bolo nutné rozsah prepočítať. Po prepočítaní rozsahu na percenta je potom možné spraviť percentuálny pomer nameraného voči percentám reproduktora na tej istej frekvencii. Prepočet výkonu na percenta u reproduktoru je obsiahnutý v tabuľke 4.1.

Vzorový prepočet pre 20 Hz a FBG č.1, sila 1N (príloha 2):

$$f = 20 \text{ Hz} , F = 1 \text{ N} , P_{20\text{Hz}_\text{namerane}} = -39,59 \text{ dBV} , P_{\text{max}_\text{namer}} = -22,66 \text{ dBV} , \\ P_{\text{min}_\text{namer}} = -77,77 \text{ dBV} , y_2 = P_{\text{max}_\text{namer}} - P_{\text{min}_\text{namer}} = 55,12 \text{ dBV}$$

$$P_{\text{namer}_\%_{20\text{Hz}}} = 100 - \left(\frac{P_{\text{max}_\text{namer}} - P_{20\text{Hz}_\text{namerane}}}{y_2/100} \right) [\%], \quad (4.2)$$

kde $P_{\text{max}_\text{namer}}$ je hodnota nameraná ako maximum v celom rozsahu a $P_{20\text{Hz}_\text{namerane}}$ je hodnota nameraná na 20 Hz a $y_2/100$ je rozsah prepočítaný na percento.

$$P_{\text{namer}_\%_{20\text{Hz}}} = 100 - \left(\frac{-22.66 - (-39.59)}{0.5512} \right) = 69.26 \%$$

$$\text{Perc}_{\text{pomer}} = \frac{P_{\text{namer}_\%_{20\text{Hz}}}}{P_{\text{repro}_\%_{20\text{Hz}}}} [-], \quad (4.3)$$

$$\text{Perc}_{\text{pomer}} = \frac{69,26}{37,10} = 1,87$$

Obdoba prepočtu nad textom je obsiahnutá v prílohách, kde je to vypočítané pomocou vzorcov v programe MS Excel. Z jednotlivých percentuálnych pomerov budú grafy realizované u každej mriežky a umiestnení na reproduktore v závislosti na sile. Vyhodnotenie a dodatočné informácie budú popísané pri výsledných grafických výstupoch. Tabuľka 4.2. ukazuje hodnoty pre jedno meranie

obsiahnuté vo vzorovom výpočte podľa vzťahov (4.1 až 4.3). Pre rozsiahlosť sú ostatné tabuľky v prílohách 2 až 4 pre každé meranie.

Frek. repro. [Hz]	Namer. napätie na karte [dBV]	Percent. vyjadrenie výkonu z merania [%]	Percent. vyjadrenie výkonu repro. [%]	Percent. pomer mer./repro. [-]	Frek. repro. [Hz]	Namer. napätie na karte [dBV]	Percent. vyjadrenie výkonu z merania [%]	Percent. vyjadrenie výkonu repro. [%]	Percent. pomer mer./repro. [-]
20	-39,60	69,26	37,10	1,87	40	-22,66	100,00	56,23	1,78
21	-38,79	70,72	37,21	1,90	50	-24,57	96,53	62,46	1,55
22	-38,50	71,25	37,20	1,92	60	-38,55	71,16	64,33	1,11
23	-38,31	71,60	39,28	1,82	70	-49,19	51,86	68,61	0,76
24	-38,07	72,04	41,77	1,72	80	-57,54	36,71	70,64	0,52
25	-37,85	72,43	42,81	1,69	90	-44,31	60,72	71,65	0,85
26	-37,36	73,31	44,27	1,66	100	-43,84	61,56	72,97	0,84
27	-36,90	74,16	44,68	1,66	110	-50,56	49,36	71,95	0,69
28	-36,18	75,46	45,93	1,64	120	-52,58	45,71	72,81	0,63
29	-35,23	77,18	46,55	1,66	130	-55,16	41,03	72,49	0,57
30	-34,28	78,92	47,49	1,66	140	-56,62	38,37	72,02	0,53
31	-33,88	79,64	49,56	1,61	150	-58,04	35,80	72,41	0,49
32	-32,65	81,87	51,02	1,60	160	-59,30	33,52	73,11	0,46
33	-31,88	83,26	51,64	1,61	170	-61,07	30,30	73,89	0,41
34	-31,02	84,83	52,26	1,62	180	-62,41	27,86	74,43	0,37
35	-30,11	86,48	53,82	1,61	190	-62,58	27,56	73,81	0,37
36	-29,13	88,26	54,13	1,63	200	-62,68	27,38	73,49	0,37
37	-27,56	91,11	55,22	1,65	230	-63,51	25,87	75,20	0,34
38	-26,03	93,89	55,46	1,69	260	-62,93	26,92	75,28	0,36
39	-24,52	96,63	56,08	1,72	280	-67,70	18,28	73,64	0,25
-	-	-	-	-	300	-77,77	0,00	71,77	0,00

Tabuľka 4.2: Vzorová tabuľka prepočítaných hodnôt pre FBG č.1

5 Výsledky merania č.1 a popis

V tejto sekcii a v podkapitolách sa zameriam na vyhodnotenie FBG použitého v meraní. Porovnam odozvy na FBG v závislosti na umiestnení na reproduktore a sile napnutia vlákna.

5.1 Špecifikácie merania č.1

FBG č.1 :

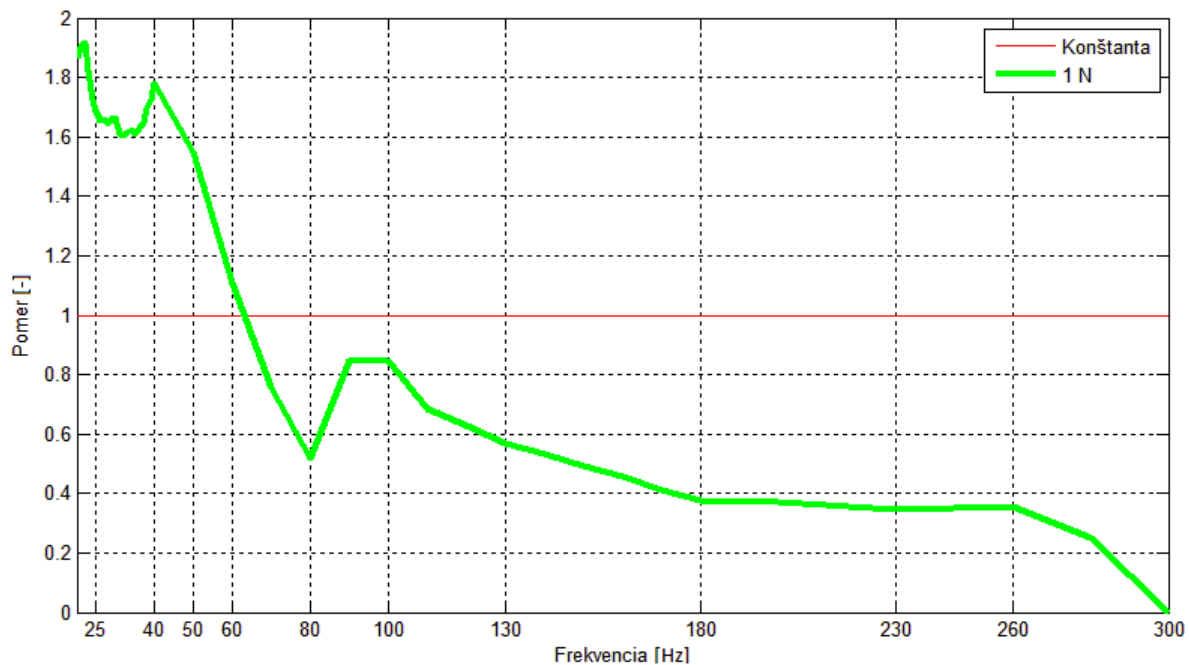
- FBG vlnová dĺžka 1550 nm
- Centrálna vlnová dĺžka 1549,910 nm
- Centrálna frekvencia 193,4 THz
- Odrážavosť 52,1 %
- Šírka spektra pre polovicu maximálnej hodnoty 1,548 nm

Použité súčiastky :

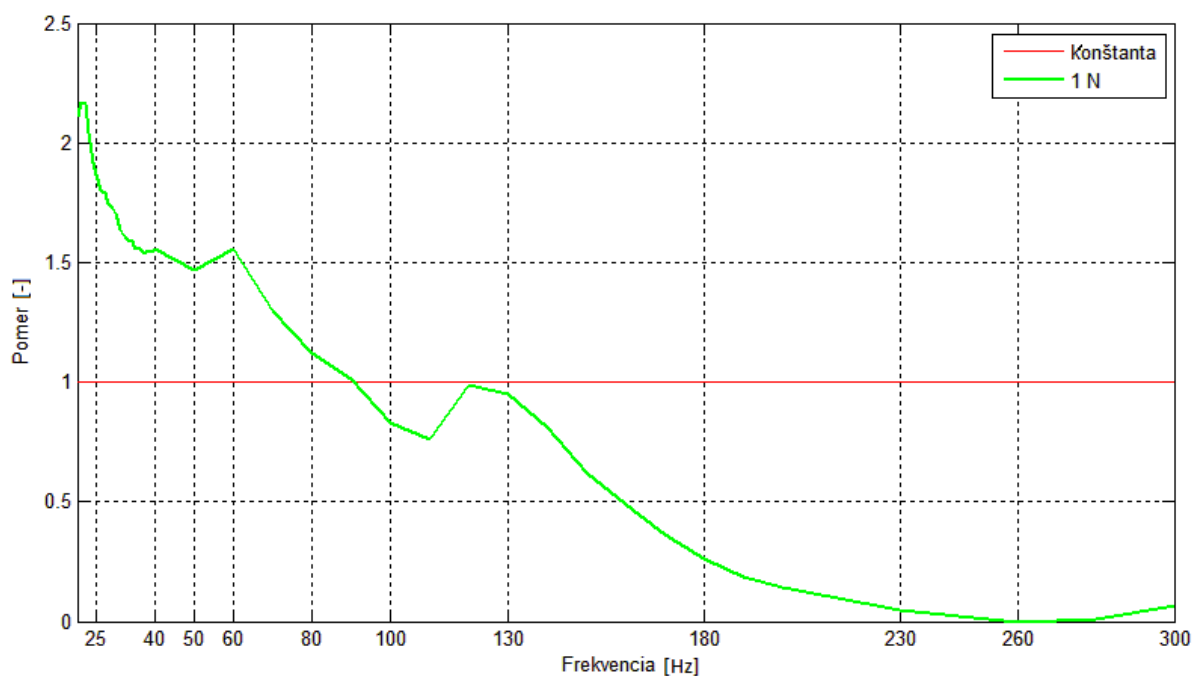
- Laditeľný laser EXFO FLS 2600B
- Patchcordy SC - FC, FC - FC (APC)
- Spojky FC - FC
- Mikroskop NOYES a čistiaca súprava
- Zrealizovaná experimentálna zostava (kapitola č.4)
- Frekvenčný generátor ROHDE&SCHWARZ HMF2550
- Cirkulátor
- Detektor THORLABS PDA10CS - EC
- Karta NI myDAQ
- Notebook ASUS N53SN s Labview, Matlab, MS Office

5.2 Výsledné grafy z merania č.1

5.2.1 Napnutie FBG so silou 1 N

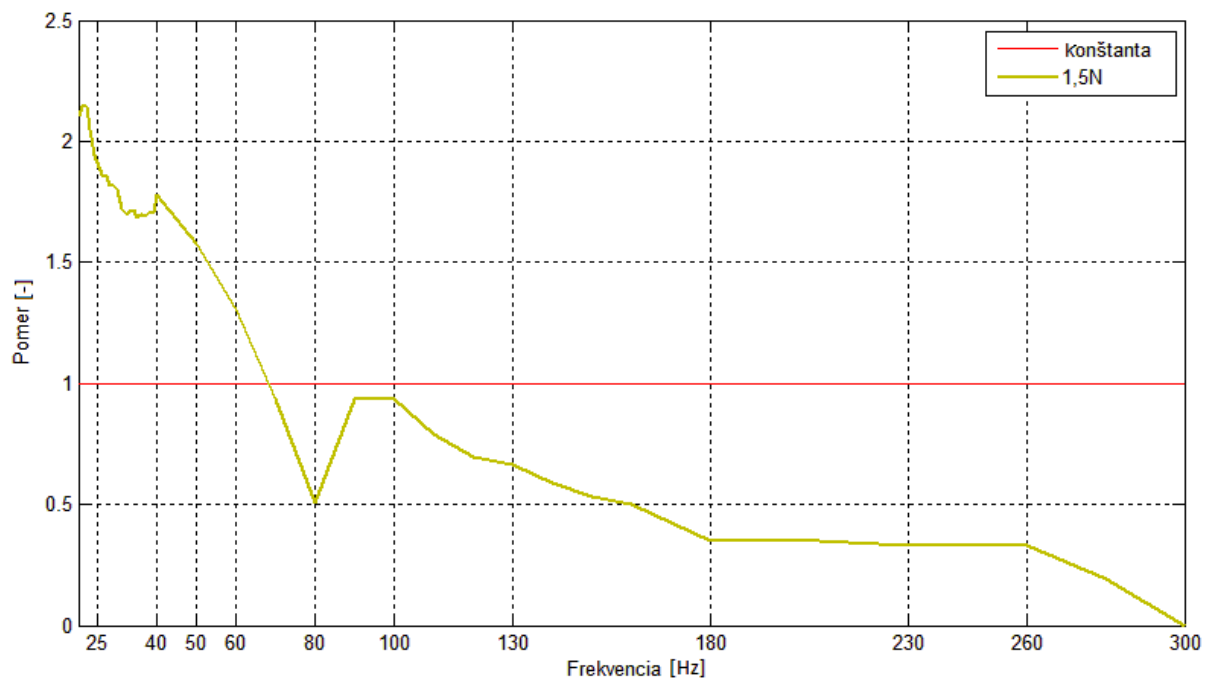


Obr.5.1: Graf citlivosti FBG č.1 pri sile 1 N v strede membrány

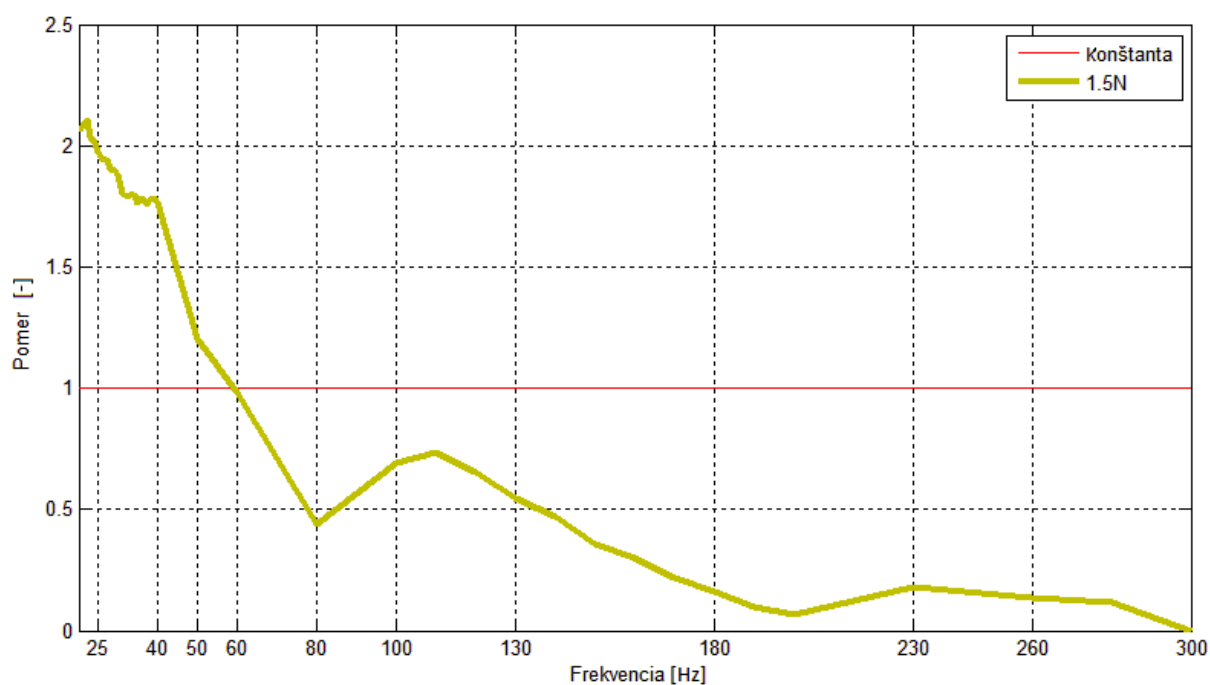


Obr.5.2: Graf citlivosti FBG č.1 pri sile 1 N na okraji membrány

5.2.2 Napnutie FBG so silou 1,5 N

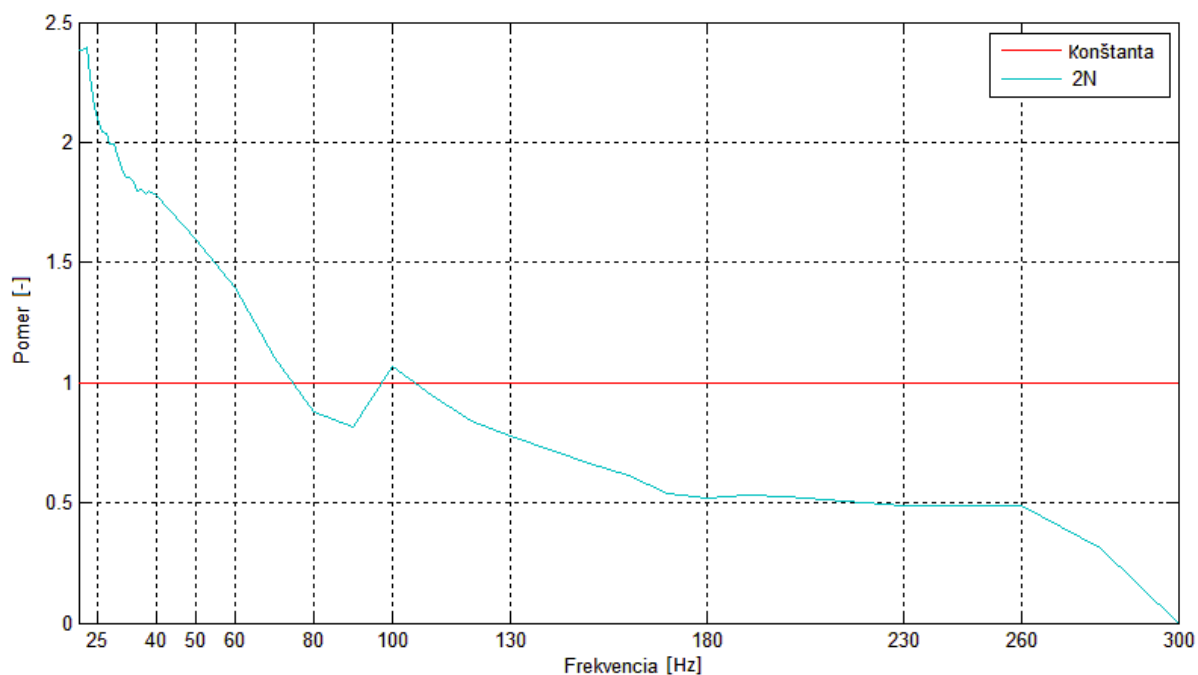


Obr.5.3: Graf citlivosti FBG č.1 pri sile 1,5 N v strede membrány

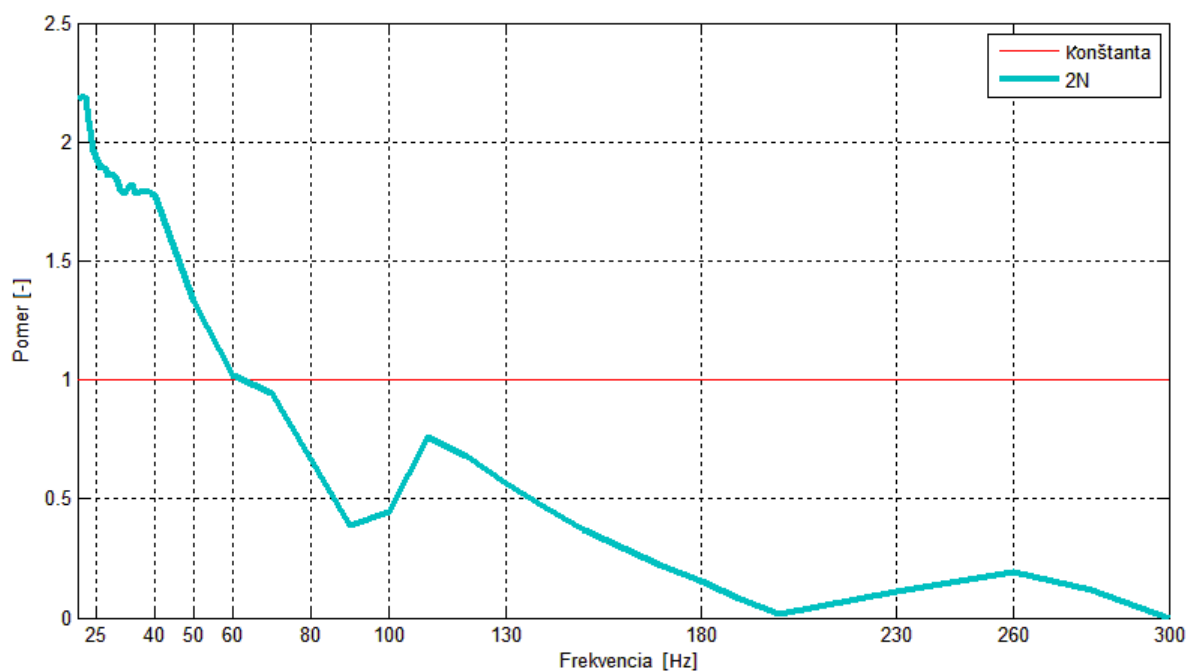


Obr.5.4: Graf citlivosti FBG č.1 pri sile 1,5 N na okraji membrány

5.2.3 Napnutie FBG so silou 2 N

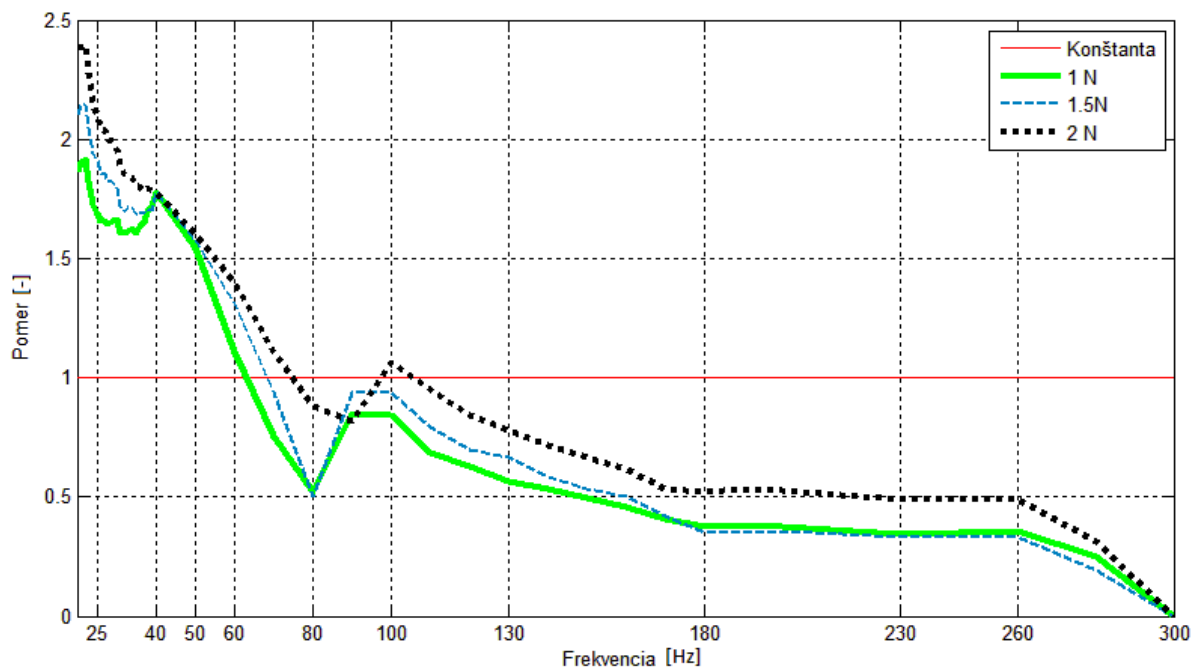


Obr.5.5: Graf citlivosti FBG č.1 pri sile 2 N v strede membrány

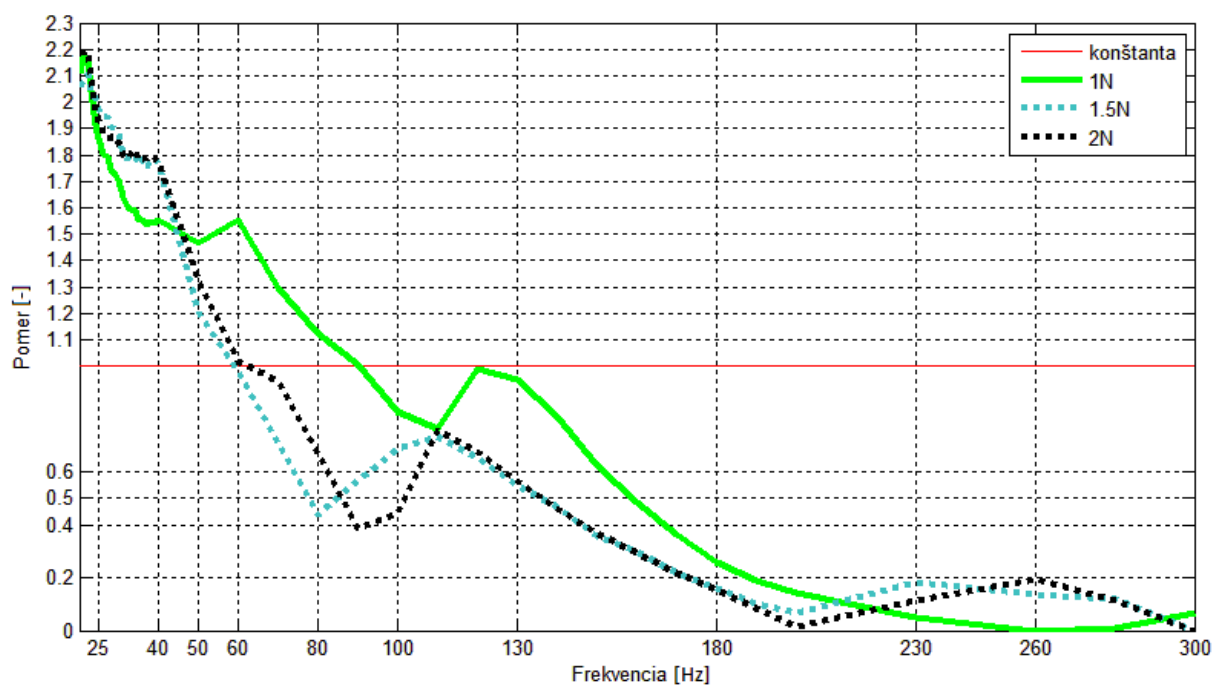


Obr.5.6: Graf citlivosti FBG č.1 pri sile 2 N na okraji membrány

5.2.4 Rôzne napnutia FBG č.1



Obr.5.7: Graf citlivosti FBG č.1 pri rôznych silách v strede membrány, porovnanie



Obr.5.8: Graf citlivosti FBG č.1 rôznych silách na okraji membrány, porovnanie

5.3 Zhodnotenie výsledkov z merania č.1

Meranie č.1 bolo zamerané na umiestnenie vlákna v strede a na okraji membrány s napnutiami vlákna 1 N, 1,5 N a 2 N.

Pri napnutí 1 N a umiestnení vlákna v strede membrány bola frekvenčná odozva od 20 - 60 Hz. Najväčšia odozva z pohľadu percentuálneho pomeru bola na kmitočte 22 Hz, kde hodnota pomeru bola 1,9. Odozva od 20 - 50 Hz sa držala okolo hodnoty 1,6 a na frekvencii 60 Hz bola posledná snímateľná hodnota s pomerom 1,1. Ďalej nasledovalo zvýšenie sily na 1,5 N kde bola odozva taktiež v rozsahu od 20 - 60 Hz, ale maximum z pohľadu pomeru bolo na 21 Hz o hodnote 2,15. Hodnoty v rozsahu 20 - 60 sa mierne zvýšili vďaka väčšej sile napnutia na hodnoty okolo 1,75. Posledná snímateľná hodnota bola na frekvencii 60 Hz s rozdielom oproti napnutiu 1 N v prospech merania so silou 1,5 N o 0,2 pomeru, tj. 1,3. Po zväčšení sily na 2 N, bolo možné vidieť, že frekvenčná odozva sa zväčšila o 10 Hz, tj. v rozsahu od 20 - 70 Hz a pribudla odozva aj na frekvencii 100 Hz. Maximum bolo zaznamenané na 22 Hz s pomerom 2,4. Celkovo sa pomer reakcii na frekvencie zvyšoval so zvyšovaním sily a vďaka tomu sa zväčšoval aj rozsah približne o 10 Hz.

Pre porovnanie bolo potrebné tento postup a vyhodnotenie zopakovať aj pre meranie na okraji reproduktora, kde by bolo možné vidieť trochu odlišné reakcie vďaka rozdielnemu vlneniu membrány oproti stredu na reproduktore. Pri sile 1 N bol rozsah, kde bolo možné zaznamenať odozvu v rozsahu 20 - 80 Hz a maximálna špička bola na 22 Hz. Hodnota citlivosti bola okolo 1,6 v rozsahu od 20 - 50 Hz. Sila 1,5 N spôsobila nárast v citlivosti v rozsahu od 20 - 40 Hz. Zaujímavosťou bolo, že pri 1 N bol snímateľný rozsah väčší, keďže na 1,5 N to bolo od 20 - 50 Hz. Po našponovaní vlákna na 2 N sa rozsah oproti predchádzajúcemu napnutiu zväčšil o 10 Hz.

Vo všeobecnosti k tomuto meraniu je možné povedať, že výsledky sa mierne líšia z pohľadu umiestnenia vlákna na membráne, ale čo sa týka zvyšovania sily pri meraní bolo zistené u tohto konkrétneho vlákna nárast percentuálneho pomeru (citlivosti). Vo väčšine prípadov došlo aj k posunu rozpätia reakcii FBG na dané frekvencie o 10 Hz. Jednotlivé porovnanie je možné vidieť aj na grafoch 5.7 a 5.8.

6 Výsledky merania č.2 a popis

Podobne ako v kapitole č.5 vyhodnotím meranie FBG na membráne reproduktora s mriežkou, ktorá ma slabú odrážavosť a veľmi úzke spektrum.

6.1 Špecifikácie merania č.2

FBG č.2 :

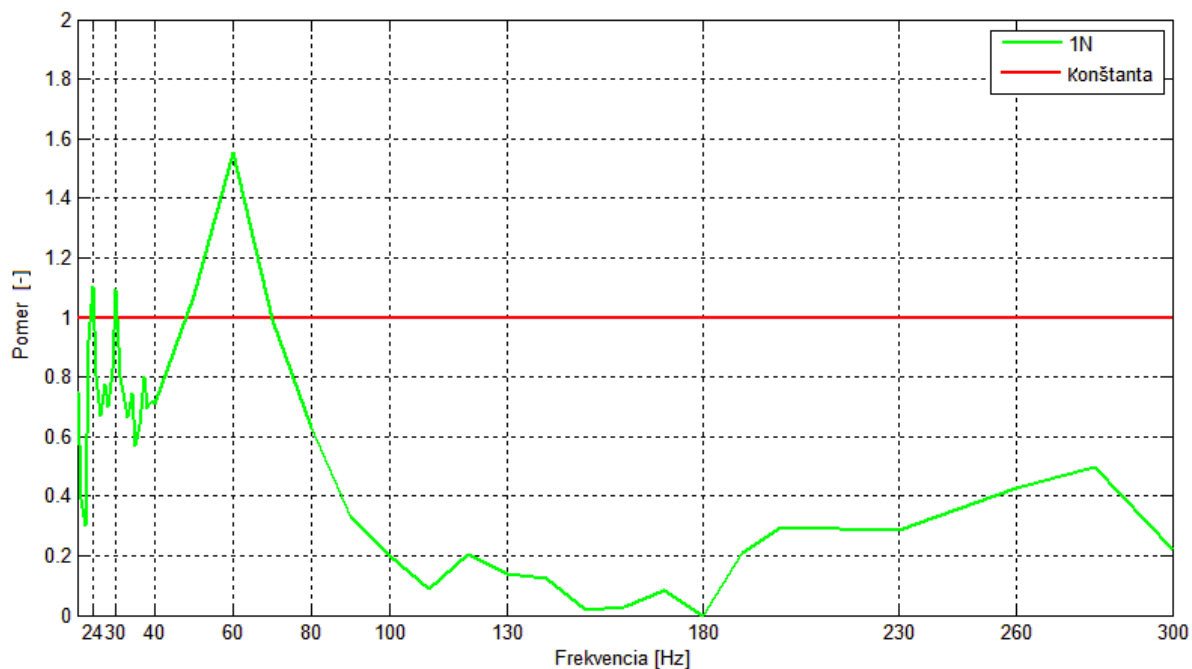
- FBG vlnová dĺžka (nominálna) 1550 nm
- Centrálna vlnová dĺžka 1549, 910 nm
- Centrálna frekvencia 193, 4 THz
- Odrážavosť 24, 3 %
- Šírka spektra pre polovicu maximálnej hodnoty 0, 098 nm

Použité súčiastky :

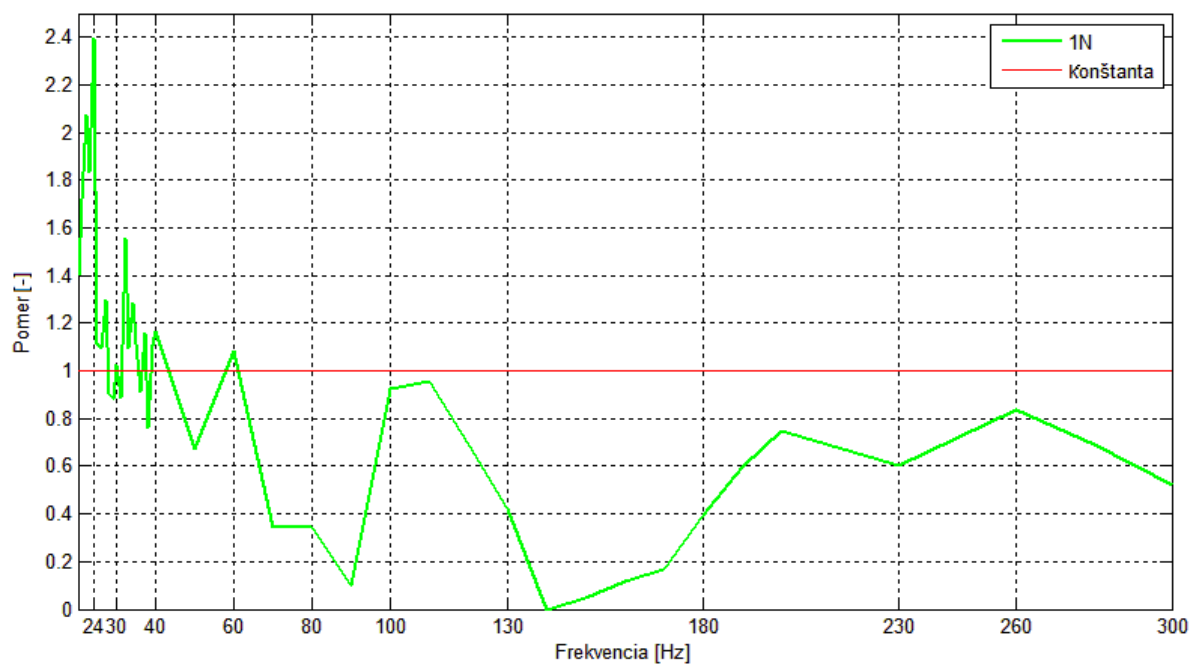
- Laditeľný laser EXFO FLS 2600B
- Patchcordy SC - FC, FC - FC (APC)
- Spojky FC - FC
- Mikroskop NOYES a čistiaca súprava
- Zrealizovaná experimentálna zostava (kapitola č.4)
- Frekvenčný generátor ROHDE&SCHWARZ HMF2550
- Cirkulátor
- Detektor THORLABS PDA10CS - EC
- Karta NI myDAQ
- Notebook ASUS N53SN s Labview, Matlab, MS Office

6.2 Výsledné grafy z merania č.2

6.2.1 Napnutie FBG so silou 1 N

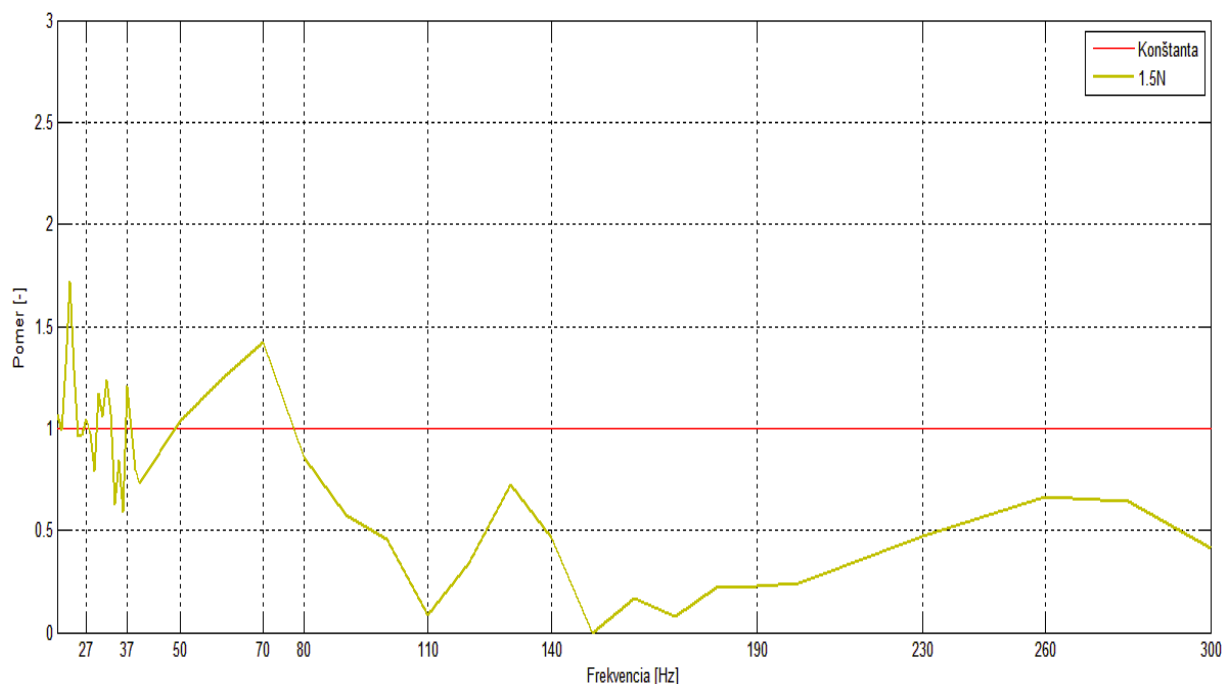


Obr.6.1: Graf citlivosti FBG č.2 pri sile 1 N v strede membrány

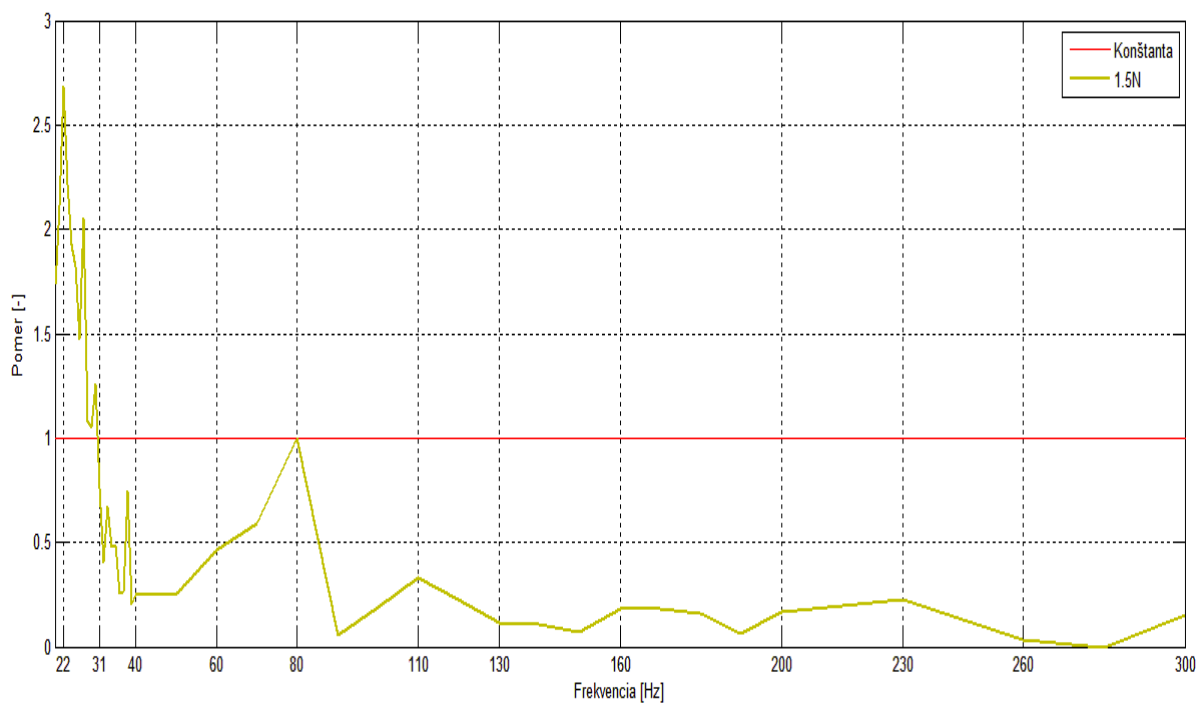


Obr.6.2: Graf citlivosti FBG č.2 pri sile 1 N na okraji membrány

6.2.2 Napnutie FBG so silou 1,5 N

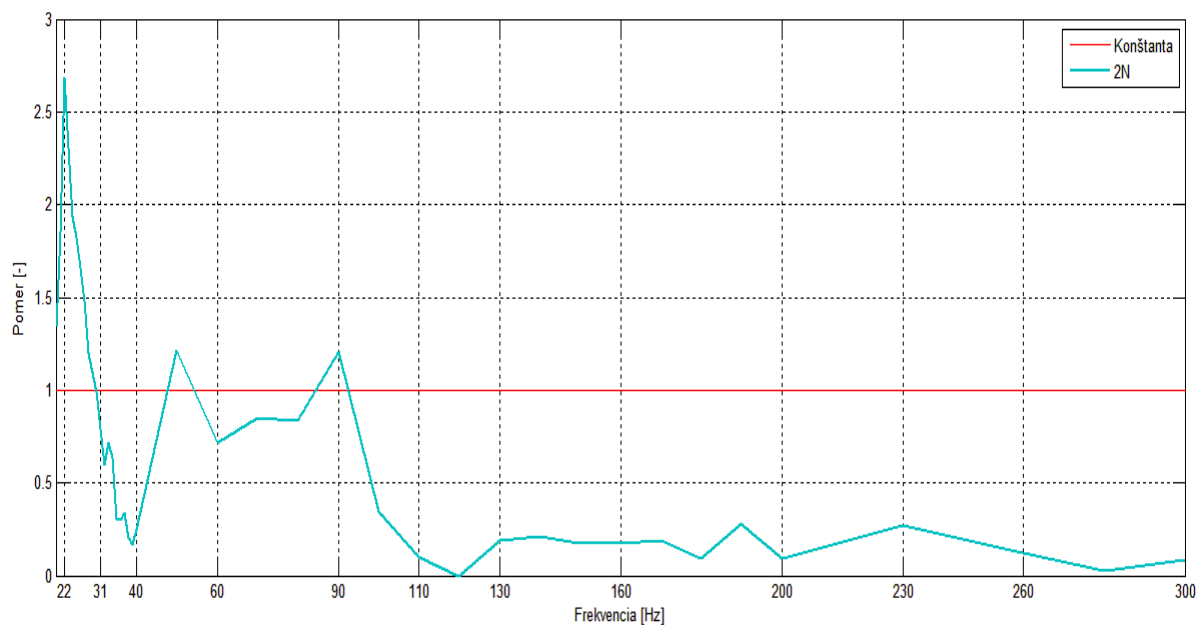


Obr.6.3: Graf citlivosti FBG č.2 pri sile 1,5 N v strede membrány

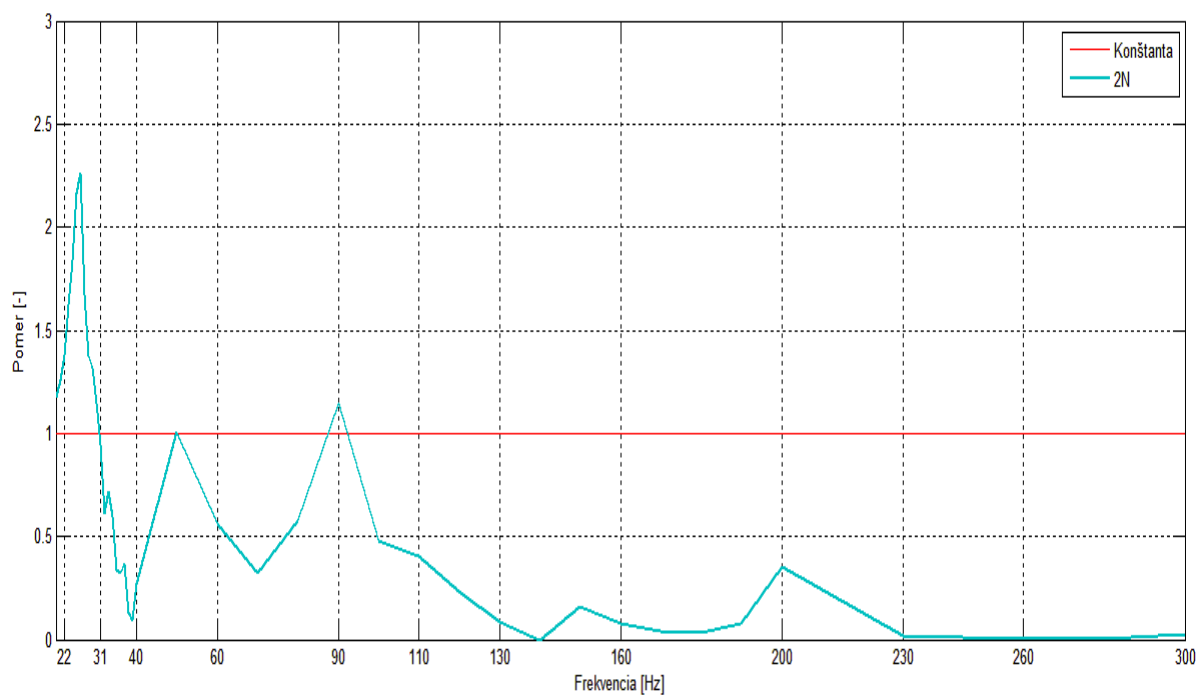


Obr.6.4: Graf citlivosti FBG č.2 pri sile 1,5 N na okraji membrány

6.2.3 Napnutie FBG so silou 2 N

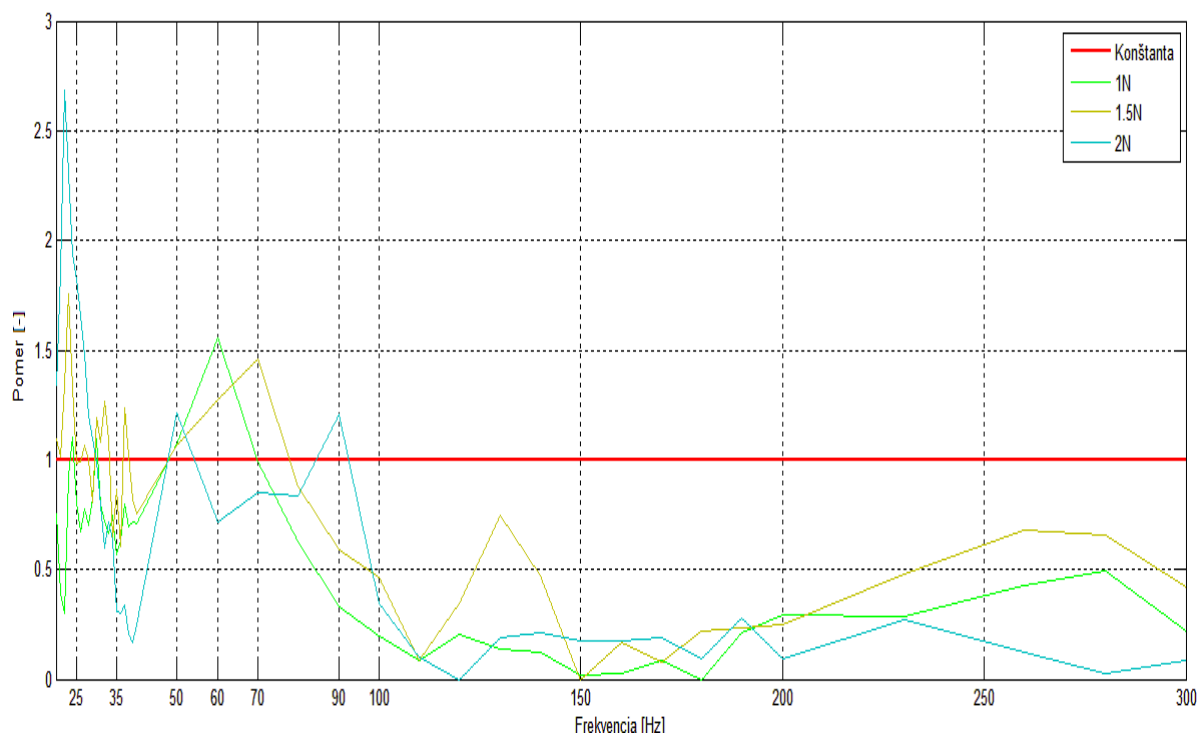


Obr.6.5: Graf citlivosti FBG č.2 pri sile 2 N v strede membrány

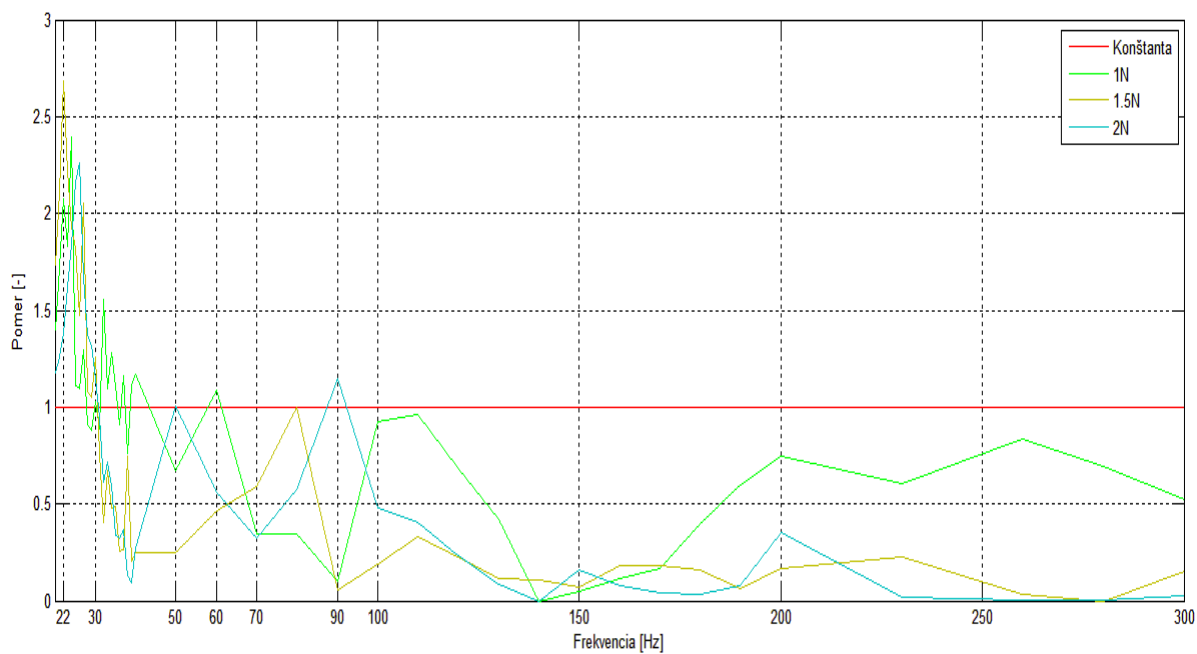


Obr.6.6: Graf citlivosti FBG č.2 pri sile 2 N na okraji membrány

6.2.4 Rôzne napnutia FBG č.2



Obr.6.7: Graf citlivosti FBG č.2 pri rôznych silách v strede membrány, porovnanie



Obr.6.8: Graf citlivosti FBG č.2 rôznych silách na okraji membrány, porovnanie

6.3 Zhodnotenie výsledkov z merania č.2

Toto meranie je uskutočnené na FBG č.2, ktorá ma najnižšiu odrazivosť a úzke spektrum.

Ako prvé popíšem výsledky, kde je vlákno umiestnené v strede membrány. Frekvenčná odozva pri napnutí vlákna 1 N bola len na určitých frekvenciách a to konkrétne 24, 30, 50 Hz a 60 Hz. Špička percentuálneho pomeru je približne na hodnote 1,6. V tomto prípade bol takmer celý rozsah utlmený v šume okrem spomenutých frekvencií. Po napnutí na 1,5 N sa odozva zlepšila, kde mriežka reagovala od 20 - 24 Hz a taktiež reakcia bola na 50 Hz a špička, ktorá bola na 60 Hz u 1 N sa posunula na odozvu pri 70 Hz. U sily 2 N sa dá povedať, že mriežka reagovala od 20 do 30 Hz a ďalšie špičky pomeru sa ukázali na 50 a 90 Hz. Z merania vyplýva, že čím väčšia sila je použitá, tak tým sa zlepši frekvenčná odozva na väčšiu škálu frekvencií.

Pre umiestnenie na okraji pri sile 1 N boli výsledky frekvenčnej odozvy od 20 - 27 Hz a potom jednotlivé špičky na niektorých frekvenciách do 40 Hz. Posledná frekvenčná odozva bola na 60 Hz. Sila 1,5 N zväčšila rozsah po sebe idúcich frekvencií na 20 - 30 Hz a posledná merateľná odozva bola na 80 Hz na hranici detekovania. 2 N spôsobili reakciu 20 - 30 Hz, ale s rozdielom toho, že sa objavila reakcia na 50 a 90 Hz.

Celkovo frekvenčné odozvy namerané na okraji reproduktora boli o niečo slabšie. Veľké množstvo hodnôt z merania (stred, okraj) bolo utopené v šume. Bolo to spôsobené pravdepodobne nízkou odrazivosťou mriežky, ktorá bola iba 24 percent a preto boli aj reakcie odlišné voči meraniu č.1 v kapitole 5. Jednotlivé porovnania je možné vidieť na grafoch 6.7 a 6.8.

7 Výsledky merania č.3 a popis

Posledné meranie bolo s mriežkou, ktorá mala najväčšiu odrazivosť. Podľa výrobcu udaných parametrov ma mať približne 88 %.

7.1 Špecifikácie merania č.3

FBG č.3 :

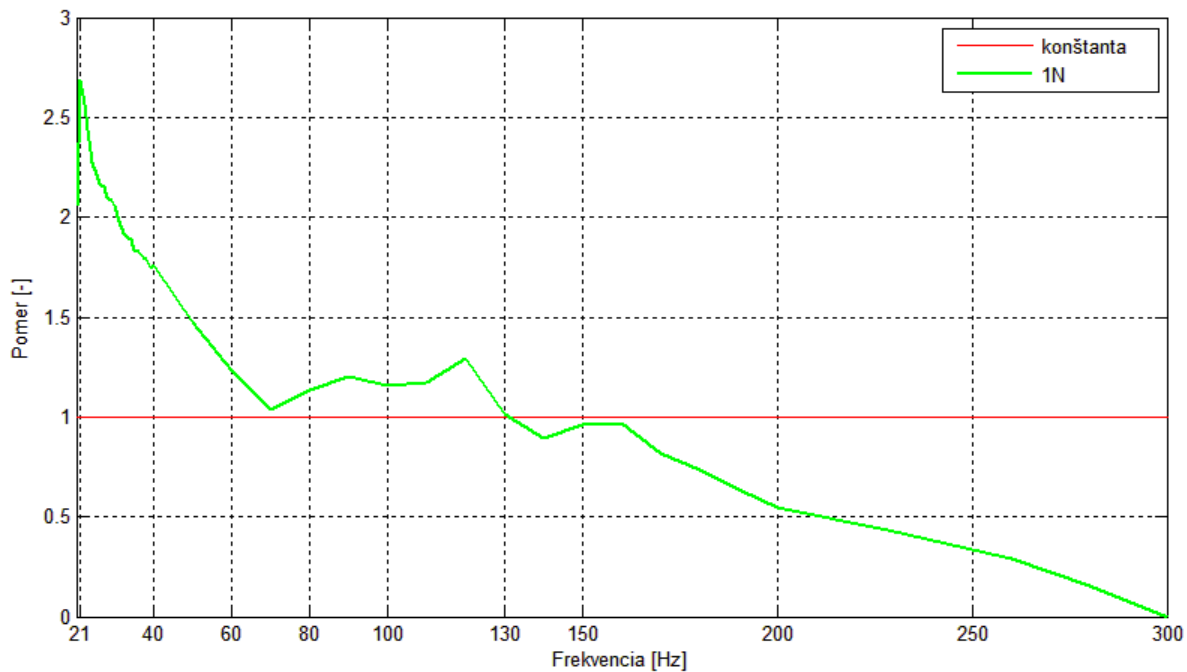
- FBG vlnová dĺžka (nominálna) 1560 nm
- Centrálna vlnová dĺžka 1559, 81 nm
- Centrálna frekvencia 192, 3 THz
- Odrážavosť 88, 55 %
- Šírka spektra pre polovicu maximálnej hodnoty 0, 23 nm

Použité súčiastky :

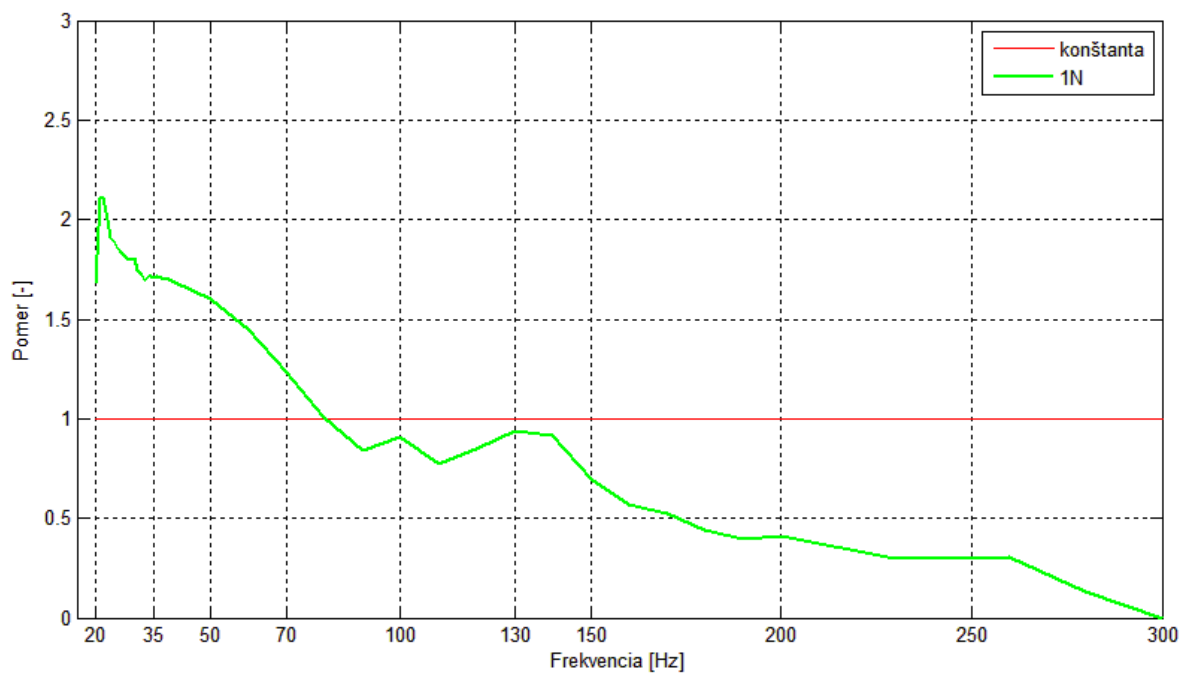
- Laditeľný laser EXFO FLS 2600B
- Patchcordy SC(APC) - FC(PC), FC(APC) - FC(APC)
- Spojky FC - FC
- Mikroskop NOYES a čistiaca súprava
- Zrealizovaná experimentálna zostava (kapitola č.4)
- Frekvenčný generátor ROHDE&SCHWARZ HMF2550
- Cirkulátor
- Detektor THORLABS PDA10CS - EC
- Karta NI myDAQ
- Notebook ASUS N53SN s Labview, Matlab, MS Office

7.2 Výsledné grafy z merania č.3

7.2.1 Napnutie FBG so silou 1 N

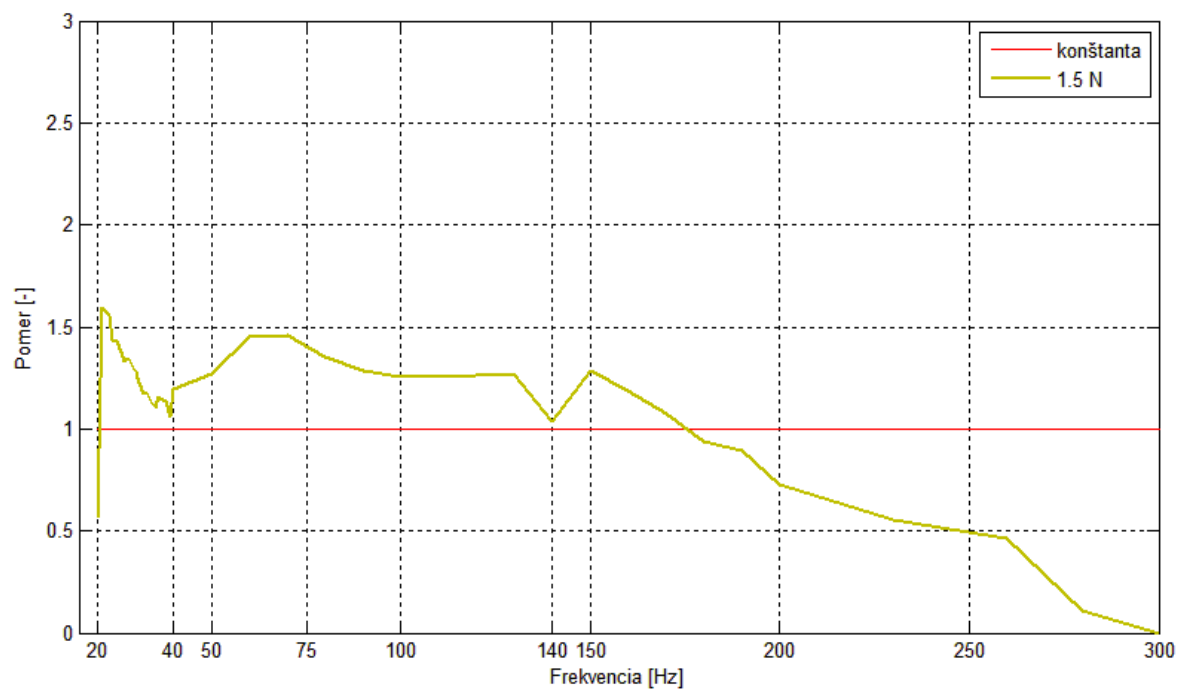


Obr.7.1: Graf citlivosti FBG č.3 pri sile 1 N v strede membrány

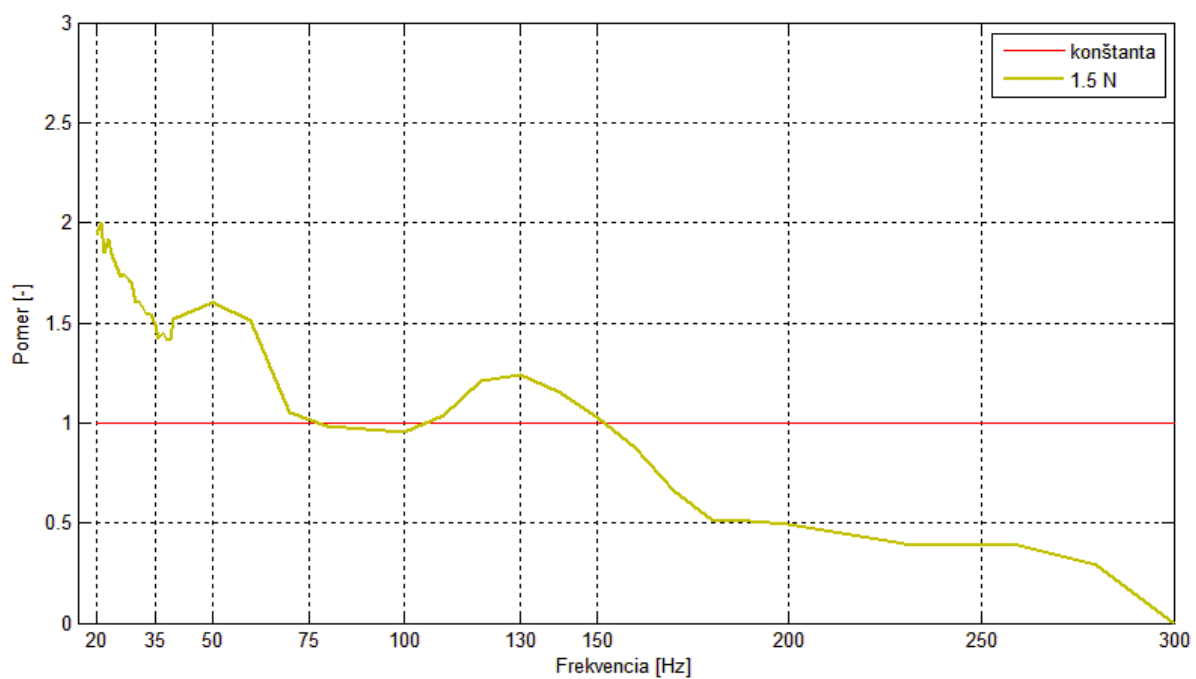


Obr.7.2: Graf citlivosti FBG č.3 pri sile 1 N na okraji membrány

7.2.2 Napnutie FBG so silou 1,5 N

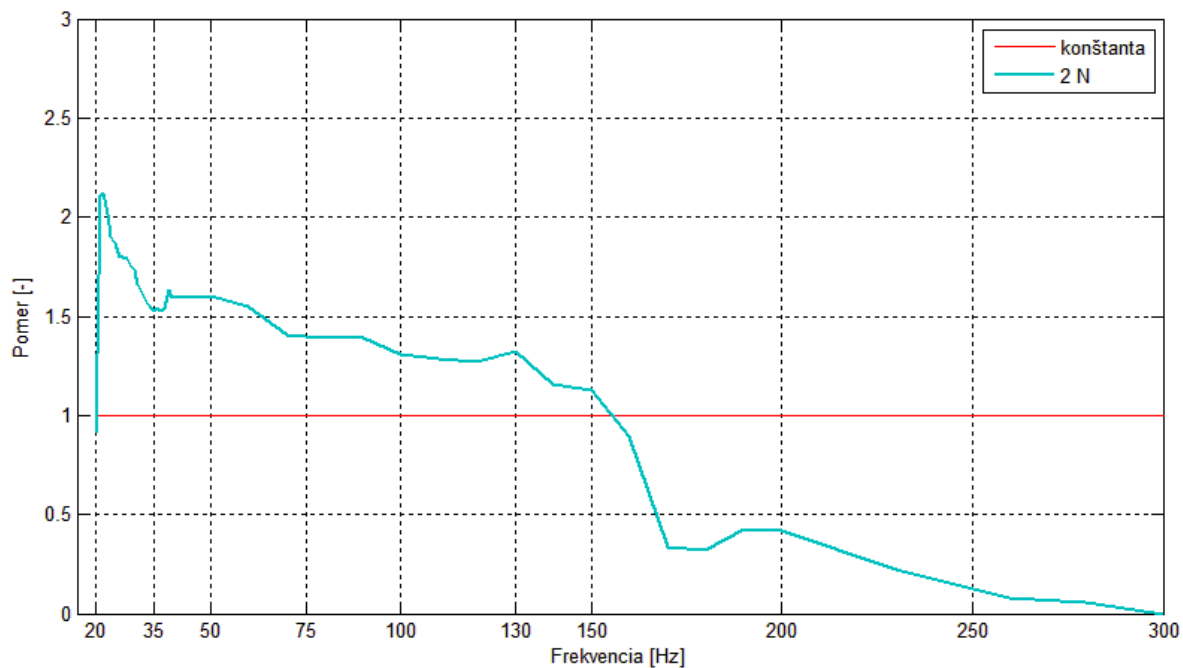


Obr.7.3: Graf citlivosti FBG č.3 pri sile 1,5 N v strede membrány

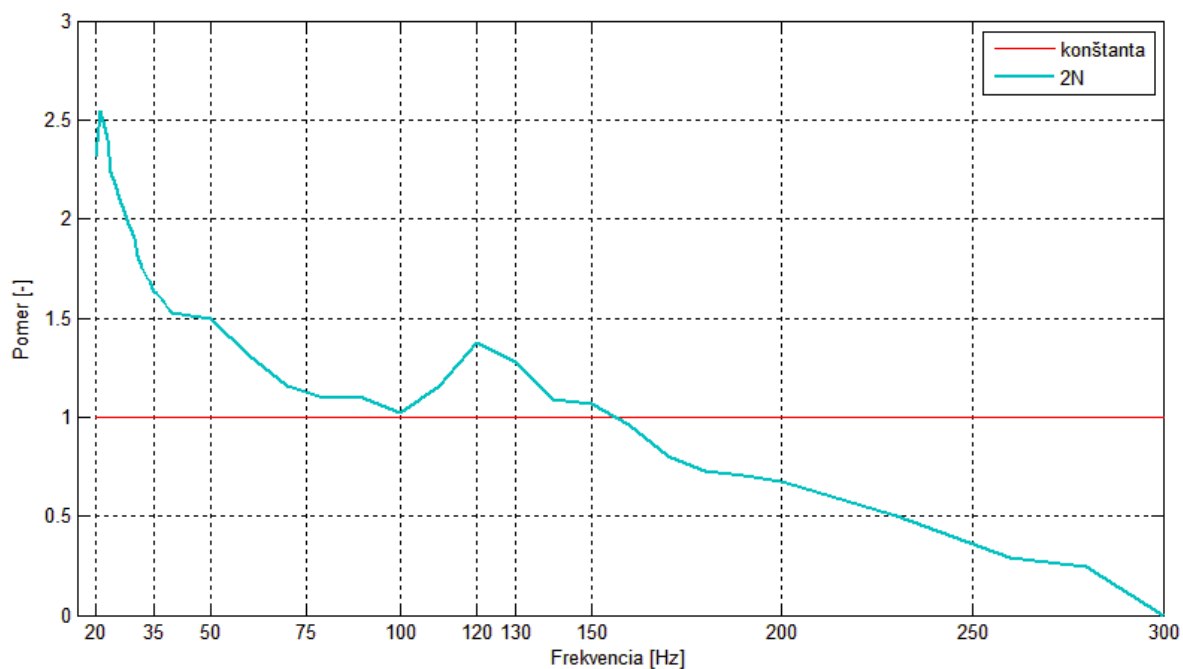


Obr.7.4: Graf citlivosti FBG č.3 pri sile 1,5 N na okraji membrány

7.2.3 Napnutie FBG so silou 2 N

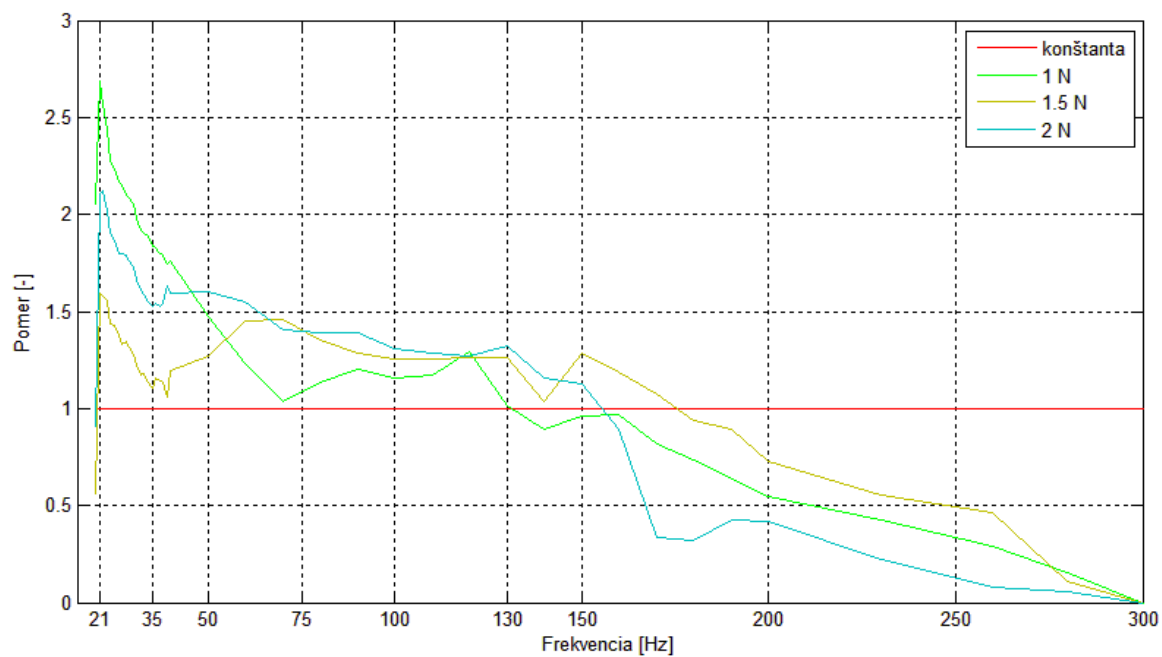


Obr.7.5: Graf citlivosti FBG č.3 pri sile 2 N v strede membrány

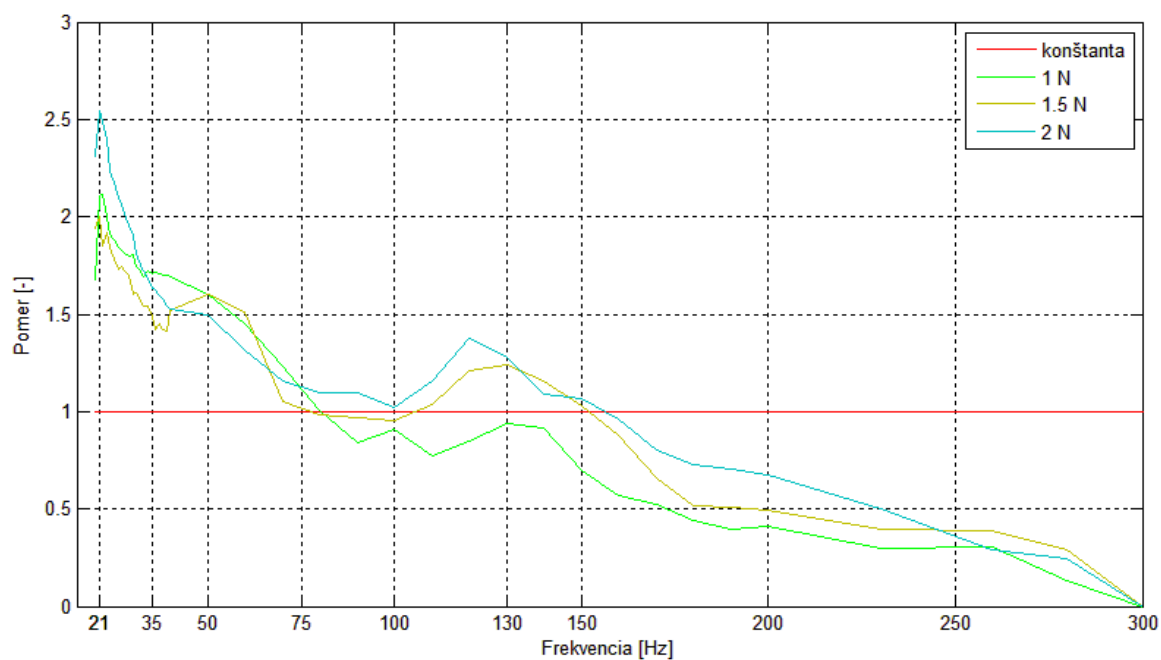


Obr.7.6: Graf citlivosti FBG č.3 pri sile 2 N na okraji membrány

7.2.4 Rôzne napnutia FBG č.3



Obr.7.7: Graf citlivosti FBG č.3 pri rôznych silách v strede membrány, porovnanie



Obr.7.8: Graf citlivosti FBG č.3 rôznych silách na okraji membrány, porovnanie

7.3 Zhodnotenie výsledkov z merania č.3

Posledné meranie bolo uskutočnené na mriežke, ktorá ma odrazivosť vyše 88 %.

Z výsledných grafov je okamžite vidieť, že táto mriežka je najvhodnejšia z pohľadu rozsahu odozvy na oveľa väčšej škále frekvencií oproti meraniam 1 a 2. Už pri sile 1 N a umiestnení v strede membrány bola detekovateľná citlivosť od 20 až do 130 Hz, čo je mnoho násobne viac ako u mriežky s nízkou odrazivosťou. Maximum bolo zaznamenané na 21 Hz. Pri meraní na 1,5 N sa rozsah citlivosti zlepšil a to v rozsahu od 21 do 170 Hz. Pri 2 N sa rozsah mierne posunul z 21 do 150 Hz, ale v grafe je viditeľné, že približne od 50 Hz do 130 Hz bol pomer najvyšší a tým pádom bola citlivosť najlepšia.

Z grafických výsledkoch (Obr.7.7 a 7.8) je vidieť, že aj keď je odrazivosť väčšia aj tak je možné porovnať umiestnenie vlákna na membráne a tým aj tvrdiť, že FBG vždy o niečo slabšie reagovalo na umiestnenie na okraji reproduktora. Dá sa nato poukázať napr. pri napnutí 1 N na okraji, kde rozsah citlivosti bol 20 - 80 Hz a pri umiestnení v strede membrány to bolo od 20 - 130 Hz a k tomu aj celková úroveň percentuálneho pomeru výkonov bola nižšia na okraji. U 1,5 N už bol rozsah od 20 - 150 Hz, kde maximum bolo na 21 Hz. Výnimkou boli frekvencie kde od 80 - 90 Hz boli hodnoty tesne pod úrovňou detekovania. Sila 2 N ako to bolo u každého merania mala v prevažnej väčšine hodnoty s najväčším percentuálnym pomerom. Tu konkrétne v rozsahu od 20 - 150 Hz. Samozrejme táto mriežka sa správala obdobne ako mriežky v predchádzajúcich meraniach, kde vďaka mechanickému napnutiu vlákna sa zmení vlastnosť FBG a jej citlivosť vzrastá priamoúmerne zväčšovaniu sily. Čím bola väčšia sila, tak bol aj rozsah citlivosti väčší v rozsahu zaznamenania.

Vo všetkých meraniach vrátane meraní z kapitoly 5 a 6 je z výsledkoch jasne, že nízke frekvencie okolo 20 - 23 Hz mali vždy najlepšiu citlivosť. Toto je spoločná črta všetkých meraní. Rozdiely sú samozrejme zreteľné v individuálnych meraniach popísané v každom experimente osobitne.

8 Záver

Ako prvým bodom diplomovej práce bolo z dostupnej literatúry získať čo najviac informácií o aplikáciách FBG v praxi, kde sa využívajú ako senzory. Samozrejmosťou bol aj určitý základný popis FBG ako funguje, aké typy Braggových mriežok poznáme a mnoho ďalšieho spomenutého v kapitolách 2 a 3. Vo väčšine prípadov sa tieto vláknové senzory využívajú na snímanie teploty, tlaku a deformácie konštrukcii a štruktúr, kde sa začínajú vo veľkom množstve nahradzovať elektronické súčiastky.

Po teoretických kapitolách som sa zamerlal na realizáciu experimentálnej zostavy. Táto zostava mala mať v sebe obsiahnuté umiestnenie vlákna s Braggovou mriežkou na membránu reproduktora. Ako najpriateľnejšie uchytenie vlákna som zvolil PVC valček na ktorý som natočil vlákno, a následne som ho prišiel aj s FBG na membránu reproduktora. Túto metódu som zvolil z dôvodu potreby vlákno premiestňovať a následné aj vymeniť za ďalšie vlákno pre nové meranie. Vlákno bolo na konci uchytené v čelusti silomera, kde sa menila sila napnutia. Je nutné spomenúť, že zostava bola navrhnutá, tak aby sa reproduktor dal pootáčať o 90° pre získanie dostatočného počtu hodnôt, ktoré sa vo výsledku spriemerovali. Celková zostava obsahovala samozrejme viacero komponentov ako je laditeľný laser, cirkulátor, meracia karta atď. Tieto konkrétne informácie boli uvedené v kapitole 4. Tato kapitola obsahuje aj prepočet výkonov na percenta, z ktorých vo výsledných grafov je vykreslený na osi y percentuálny pomer znamenajúci úroveň frekvenčnej odozvy.

Po určitých prípravách a prepočtov došlo k meraniu odozvy FBG na troch parametrov odlišných mriežkach, kde som vo výsledkoch zistil špecificky hodnoty pre každé meranie. U každého vlákna bol zvolený rozsah od 20 - 300 Hz a sila napnutia 1 až 2 N s krokom 0,5 N. Vlákno bolo premiestňované zo stredu na okraj membrány.

Ako prvé meranie bolo na FBG č.1 na vlnovej dĺžke 1550 nm a odrazivosťou 52,1 % a šírkou spektra 1,548 nm. Pri sile 1 N a uložení v strede membrány vlákno vykazovalo citlivosť v rozsahu 20 - 60 Hz a špička percentuálneho pomeru bola 1,9 na 22 Hz. Pri 1,5 N bola citlivosť v tom istom rozsahu frekvencií, ale maximálna hodnota na 22 Hz narástla na 2,2. Po napnutí vlákna na 2 N sa citlivosť posunula na vyššiu úroveň a zväčšil sa aj snímací rozsah na 20 - 70 Hz a k tomu pribudla špička citlivosti aj na frekvencii 100 Hz. Meranie na okraji reproduktora malo mierne odlišnú citlivosť na frekvencie s rozdielom nižšej úrovne pomeru citlivosti a zmenšil sa rozsah citlivosti.

Po FBG č.1 došlo k výmene vlákna, kde sa použila FBG č. 2 s vlnovou dĺžkou 1550 nm a odrazivosťou iba 24 %. Toto vlákno umiestnené v strede so silou 1 N malo odozvu iba na nejakých frekvenciách a nedá sa povedať o rozsahu citlivosti v určitej škále frekvencií. Konkrétne boli zaznamenané reakcie na 24, 30, 50 Hz a posledná špička bola na 60 Hz. Postupným pridávaním sily sa

vytvoril rozsah citlivosti u 1,5 N od 20 do 24 Hz a posledná odozva na 70 Hz a u 2 N bol rozsah od 20 do 30 Hz a posledná odozva bola na 90 Hz. Čo sa týkalo merania na okraji reproduktora, tak úroveň citlivosti boli oveľa nižšie ako v strede reproduktora, ale rovnako sa posledné zaznamenané špičky posúvali približne o 10 Hz v závislosti na zvyšovaní sily.

Posledné meranie bolo s FBG č. 3 s vlnovou dĺžkou 1560 nm a odrazivosťou 88,55 % a šírkou spektra 0,23 nm. Meranie v strede membrány pri 1 N ukázalo veľký rozsah citlivosti oproti predchádzajúcim meraniam. Konkrétne od 20 do 130 Hz. Po zväčšení sily sa rozsah zmenil od 21 do 170 Hz. Toto vlákno reagovalo najlepšie z pohľadu citlivosti. Pri meraní na okraji, tomu bolo podobne s miernym úbytkom citlivosti, ale tento fakt sa ukázal pri všetkých meraniach.

K celkovému zhodnoteniu tejto práce je dobre povedať, že z troch vlákien mala najlepšiu citlivosť mriežka č. 3 s najväčšou odrazivosťou. Ako najhoršia bola mriežka č. 2 s odrazivosťou okolo 24% a úzkym spektrom. Čo sa týka umiestenia vlákna na membráne, najlepšie odozvy boli prevažne v strede membrány reproduktora.

V tomto experimente som sa celkovo zoznámil s problematikou ohľadom FBG a naučil som sa pracovať so sofistikovanými prístrojmi a získal som širší obzor vo vláknových senzoch. Zistil som, že mechanické namáhanie FBG má vplyv na frekvenčnú odozvu. Experiment by bolo možné v budúcnosti rozšíriť o napríklad veľký basový reproduktor, ktorý by mal frekvenčnú charakteristiku už od 1 Hz, kde by bolo možné simulovať tlkot srdca a tak zistiť aké FBG by boli najvhodnejšie pre frekvencie okolo 1 Hz.

Použitá literatúra

- [1] ELECTRONICDESIGN. *Fiber Bragg Gratings: The Dispersion Compensation Technology For 40G And 100G Optical Transport*. [online] [16.3. 2016]. Dostupné taktiež z: <http://electronicdesign.com/communications/fiber-bragg-gratings-dispersion-compensation-technology-40g-and-100g-optical-transpor>
- [2] ELECTRONICDESIGN. *The ABCs Of Fiber Bragg Gratings*. [online] [16.3. 2016]. Dostupné taktiež z: <http://electronicdesign.com/interconnects/abcs-fiber-bragg-gratings>
- [3] I. Bennion, J. A. R. Williams, L. Zhang, K. Sugden and N. J. Doran: UV-written in-fibre Bragg gratings. *Optical and Quantum Electronics*, 1996. ISSN 0306-8919
- [4] KASHYAP, Raman. *Fiber Bragg gratings*. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, c2010. ISBN 0123725798.
- [5] ORC. *Photosensitivity*. [online] [25.3. 2016]. Dostupné taktiež z: http://www.orc.soton.ac.uk/publications/theses/3539_ijgs/3539_ijgs_5.pdf
- [6] OTHONOS, Andreas a Kyriacos KALLI. *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. 1. Boston, Mass.: Artech House, c1999. ISBN 0890063443.
- [7] DUŠEK, Martin a Michal MAZANEC. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů*. [online] [2.4. 2016]. Dostupné taktiež z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf
- [8] ROHDE-SCHWARTZ. *25Mhz [50Mhz] Arbitrary Function Generator HMF2525 [HMF2550]*. [online] [30.3. 2016]. Dostupné taktiež z: http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_dashboards/pdf_1/HAMEG_DB_EN_HMF2525_2550.pdf
- [9] PLOTDIGITIZER. *Plot Digitizer*. [online] [1.4. 2016]. Dostupné taktiež z: <http://plotdigitizer.sourceforge.net/>

Zoznam príloh na CD:

Priloha1.xlsx

Priloha2.xlsx

Priloha3.xlsx

Priloha4.xlsx