

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Štěpán Polreich



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

PODÉLNÉ INDEXOVÉ STRUKTURY V OPTICKÝCH VLÁKNECH

LONGITUDINAL INDEX STRUCTURES IN OPTICAL FIBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Polreich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Urban

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Štěpán Polreich

ID: 164772

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Podélné indexové struktury v optických vláknech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je porovnání způsobů vytváření indexových změn v optických vláknech. Student se zaměří na působení ultrakrátkých optických pulsů s vysokou intenzitou. V práci budou navrženy měřicí struktury s optickými vlákny realizovatelné femtosekundovým laserem pro mikroobrábění s cílem ověření a zjištění geometrie a velikosti indexových změn v experimentálních vzorcích. Vyhodnoťte experimentální vzorky a posuďte možnosti konstrukce senzorických struktur založených na této technologii.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Kashyap R.: Fiber Bragg Gratings, second edition. Academic Press, 2010.

[2] FILKA, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. František Urban

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce popisuje základní pojmy, principy a vlastnosti optických vláken. Značná část je věnována vláknovým mřížkám, které jsou tvořeny změnou indexu lomu v jádře optického vlákna. V této práci je uveden popis, princip, metoda výroby a rozdělení mřížek na Braggovy mřížky, mřížky s dlouhou periodou a chirpované mřížky. Dále jsou v této práci popsány různé typy laserů a jejich výhody oproti ostatním laserům. Velká část se zabývá popisem femtosekundového laseru, se kterým budou později vytvářeny struktury do materiálu. Dále jsou popisovány režimy laseru, jedná se o režim mikroobrábění a modifikace, neboli změna indexu lomu v objemu materiálu. Poslední část se zabývá změnou indexu lomu v planární technologii, vytvořením drážky pro upevnění vlákna a prováděnými pokusy o zápis mřížky do optického vlákna. Vzniklé senzory s vláknovou mřížkou jsou testovány při změně teploty a také v tahu. Nakonec jsou uvedena i praktická využití senzorů vytvořených femtosekundovým laserem a výhody oproti mřížkám tvořenými UV laserem a technikou fázové masky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optická vlákna, senzor, Braggova mřížka, femtosekundový laser, snímač tlaku, snímač teploty

ABSTRACT

This thesis describes basic concepts, principles and properties of optical fibers. Considerable part is devoted to fiber gratings that are created by a change in the refractive index in the optical fiber core. In this work is described description, principle, method of production and distribution of gratings on Bragg gratings, gratings with long period and chirped gratings. In this thesis are also presented different types of lasers and their advantages over other lasers. A large part deals with the description of the femtosecond laser, with which the structures will be later made into the material. In addition, the laser modes are differentiated, this is a mode of micro-machining and modification or a change in refractive index of the material. The last part deals with change the refractive index in planar technology, the creation of a groove for fastening the fiber and attempts to write the gratings into the optical fiber. Created fiber sensor are tested for temperature and tensile changes. Finally, the practical use of sensors made by femtosecond laser and the advantages over UV laser and phase mask techniques are presented.

KEYWORDS

Optical fibers, sensor, Bragg grating, femtosecond laser, strain sensor, temperature sensor

POLREICH, Štěpán *Podélné indexové struktury v optických vláknech*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 94 s. Vedoucí práce byl Ing. František Urban

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Podélné indexové struktury v optických vláknech“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Urbanovi, za odbornou pomoc a konzultace při zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jakubu Somerovi za cenné rady, trpělivost a vedení během zpracovávání praktické části této diplomové práce.

Na závěr věnuji diplomovou práci mému tatínku Miroslavovi, který podlehl těžké nemoci a nemohl se tak dožít dokončení této práce. Během celého studia mě společně s celou rodinou podporoval.

V Brně dne

.....

(podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Technicka 12, CZ-61600 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



**OP Výzkum a vývoj
pro inovace**

OBSAH

1	Úvod	14
1.1	Přehled současného stavu problematiky	14
1.2	Cíle diplomové práce	15
2	Problematika optických vláken	16
2.1	Princip šíření světla optickým vláknem	16
2.2	Zdroje optického záření	16
2.3	Druhy optických vláken	17
2.4	Výrobní technologie optických vláken	18
2.4.1	Tažení vlákna	19
2.4.2	Metoda dvojitého kelímku	20
2.4.3	Plynná fáze	20
3	Vláknové mřížky	22
3.1	Braggovy vláknové mřížky	22
3.2	Mřížky s dlouhou periodou	28
3.3	Chirpované vláknové mřížky	29
4	Typy laserů a princip činnosti	31
4.1	Princip činnosti laseru	31
4.2	Typy laserů	32
4.2.1	Kapalinové lasery	33
4.2.2	Pevnolátkové lasery	34
4.2.3	Plynové lasery	35
4.2.4	Polovodičové lasery	35
5	Femtosekundový laser	37
5.1	Princip femtosekundového laseru	38
5.2	Femtosekundová mikroablace a mikroobrábění	39
5.3	Možnosti zápisu femtosekundovým laserem	40
6	Laboratorní pracoviště FemtoLab	43
6.1	Laser Pharos	47
6.1.1	Pracovní režimy oscilátoru femtosekundového laseru Pharos	48
6.1.2	Režimy vysílání pulsu - frekvence vs. hustota vs. burst	49
6.2	Ovládací programy laseru	51
6.2.1	Pharos software	52
6.2.2	SCA program pro mikroobrábění	52

7	Experimentální výroba Braggovy mřížky pomocí femtosekundového laseru	54
7.1	Měřicí pracoviště	54
7.2	Jednotlivé testy	56
7.2.1	Planární technologie	56
7.2.2	Vytváření „V“ drážky	67
7.2.3	Zápis Braggové mřížky do optického vlákna	68
7.3	Výsledky měření vlastností zapsané mřížky	74
7.3.1	Měření změny vlnové délky vytvořených Braggových mřížek v závislosti na teplotě	74
7.3.2	Měření změny vlnové délky a mechanického napětí zapsaných mřížek v závislosti na tahu	76
7.3.3	Měření změny vlnové délky vytvořených Braggových mřížek v závislosti na vysoké teplotě	81
7.4	Aplikace Braggových mřížek tvořených femtosekundovým laserem . .	84
7.4.1	Vysoké teploty	84
7.4.2	Prostředí s vysokým ionizujícím zářením	84
7.4.3	Multiparametrové snímání v drsných prostředích	85
7.4.4	Vysoký tlak	85
7.4.5	FBG pro detekci rázových vln v energetických materiálech . .	86
8	Závěr	88
	Literatura	91
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	94

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Jednovidové optické vlákno	18
2.2	Mnohavidové optické vlákno	18
2.3	Tažení vlákna	19
2.4	Metoda dvojitého kelímku	20
2.5	MCVD technologie	21
2.6	PCVD technologie	21
3.1	Schematický nákres Braggovy vláknové mřížky [1]	22
3.2	Průběh homogenní vláknové mřížky, kde n_c je index lomu jádra, δ_n je hloubka modulace a Λ je perioda [1]	23
3.3	Charakteristika spektrální odrazivosti vláknové mřížky	23
3.4	Schéma systému pro vytváření Braggových mřížek při použití metody fázové masky [8]	25
3.5	Schéma systému pro výrobu Braggových mřížek za použití techniky bod po bodu [8]	26
3.6	Schéma systému pro výrobu Braggových mřížek za použití interferometrické metody [9]	27
3.7	Porovnání Braggovy mřížky a mřížky s dlouhou periodou [7]	28
3.8	Zobrazení spektrální odezvy chirpované mřížky [1]	29
3.9	(a) Schematické zobrazení chirpované mřížky s aperiodickým rozložením. (b) Zjednodušená mřížka spojením více mřížek s jinou periodou do série a vytvářející jeden celek.	30
4.1	Základní schéma laseru [10]	31
4.2	Rozčlenění laserů [11]	33
4.3	Princip polovodičového laseru [11]	36
5.1	Schéma ukazující rozdíl mezi (a) konvenčním mikroobráběním a (b) obráběním femtosekundovým laserem [13]	38
5.2	Restrukturalizace vazby v As_2S_3 pomocí femtosekundového laseru [13]	39
5.3	Povrchový profil (a) fáze, (b) reliéfu mřížky zapsané mikroobráběním [13]	40
5.4	Line-by-line metoda zápisu mřížky femtosekundovým laserem [14]	41
5.5	a) metoda Fázové masky, b) metoda Bod po bodu [15]	41
6.1	Náhled na laserovou stanici FemtoLab [16]	43
6.2	Přední pohled na stanici FemtoLab [16]	45
6.3	Optické trasy vlnových délek 1030 a 515 nm [16]	46
6.4	Femtosekundový laser Pharos [17]	47

6.5	Pracovní režimy oscilátoru femtosekundového laseru Pharos a jejich spektrum [18]	49
6.6	Ilustrace laserového vzorkování v módu hustoty a frekvenčním módu [19]	50
6.7	Ilustrace polohovací rychlosti a laserové výstupní spouště v módu hustoty, frekvenčním módu a burstu [19]	51
6.8	Ovládací software laseru Pharos	52
6.9	Software SCA pro mikroobrábění	53
7.1	Schéma zapojení měřicího pracoviště	54
7.2	Měřicí pracoviště	55
7.3	Měřicí pracoviště FemtoLab	56
7.4	Braggova mřížka zapsaná do planárního vzorku	60
7.5	Snižování velikosti mezery - slitá struktura Braggovy mřížky	62
7.6	Závislost velikosti energie pulsu na hloubce zápisu pod povrch	64
7.7	Křížení Braggových mřížek	65
7.8	a) Teoreticky navržená „V“ drážka, b) průběh vytváření drážky	67
7.9	Schematické zobrazení soustavy držení vlákna pro zápis Braggovy mřížky	68
7.10	Odražené spektrum zapsané Braggovy mřížky	70
7.11	Spektrum v průchodu zapsané Braggovy mřížky	70
7.12	Zapsaná Braggova mřížka v optickém vlákne	71
7.13	Metoda dvou period	71
7.14	Odražené spektrum chirpované Braggovy mřížky	73
7.15	Odražené spektrum Braggovy mřížky	74
7.16	Schematické zobrazení pracoviště pro měření vlastností mřížek při změně teploty	75
7.17	Ohřívač vody s termostatem [20]	75
7.18	Nastavení teploty a odečítání vlnové délky zapsaných mřížek	76
7.19	Závislost vlnové délky zapsaných mřížek na teplotě	76
7.20	Stanice LDS 2.5 firmy NETWORK GROUP s.r.o. [21]	77
7.21	Nastavení natažení senzoru se zapsanou mřížkou a následné odečítání vlnové délky a mechanického napětí vlákna	78
7.22	Změna vlnové délky a mechanického napětí měřené mřížky v tahu	79
7.23	Schematické zobrazení vlákna v klidovém stavu, nataženého a stlačeného vlákna [22]	80
7.24	Sušicí pec značky Memmert pro měření vlastností při nižších teplotách [23]	81
7.25	Pec pro zkoumání vlastností mřížek pod vlivem vysokých teplot [24]	82

7.26	Tabulka naměřených hodnot změny vlnové délky v závislosti na změně teploty až do 1000 °C	83
7.27	Závislost vlnové délky zapsaných Braggových mřížek na změně teploty ($T_{max} = 1050$ °C)	83

SEZNAM TABULEK

6.1	Vysvětlení jednotlivých prvků z obr. 6.2	44
7.1	Nastavení hodnot pro test č. 1	57
7.2	Nastavení hodnot pro test č. 2	58
7.3	Nastavení hodnot pro test č. 3	59
7.4	Nastavení hodnot pro test č. 4	60
7.5	Nastavení hodnot pro test č. 5 - změna pulsu a změna počtu cyklů . .	61
7.6	Nastavení hodnot pro test č. 6 - snižování velikosti mezery	62
7.7	Nastavení hodnot pro test č. 7 - snižování hodnoty energie pulsu . . .	63
7.8	Vliv energie pulsu na hloubku zápisu	64
7.9	Nastavení hodnot pro test č. 9 - snižování hloubky ostření pulsu . . .	66
7.10	Nastavené hodnoty hloubky laserem a změřené hodnoty hloubky mi- kroskopem	66
7.11	Nastavení hodnot pro test č. 1 - zápis mřížek do vláken	69
7.12	Nastavení hodnot pro test č. 5	73

1 ÚVOD

Základními strukturami vytvářenými změnou indexu lomu v optických vláknech jsou Braggovy mřížky. V poslední době se stále více používá k tomuto účelu femtosekundový laser, který je v mnoha ohledech lepší, a můžeme vytvořit v daném vzorku téměř libovolnou strukturu. Vláknové mřížky se stávají klíčovou součástí v mnoha optických systémech, protože nám otevírají dveře do zcela nových optických zařízení. Mřížky mají v telekomunikacích mnoho využití, např. se používají jako optické úzkopásmové filtry pro systémy s vlnovým dělením a nebo kompenzátory chromatické disperze. Stále nové možnosti nalézají vláknové mřížky především v sensorové technice, kde se mohou nejčastěji využít v oblasti měření tlaku a teploty. Speciální struktury těchto mřížek se poté uplatňují ve vláknových laserech a nebo zesilovačích [1].

1.1 Přehled současného stavu problematiky

První náznak vytváření vláknové mřížky nastal již v roce 1978, kdy Hill a spol. demonstrovali, že pomocí dvou interferujících světelných svazků lze v jádře optického vlákna zapsat stálou mřížku. V následujících dvaceti letech bylo provedeno mnoho pokusů o výrobu a využití těchto vláknových mřížek, ale princip mikroskopických změn indexu lomu jádra vlivem ultrafialovým ozáření nebyl úplně pochopen. Až postupem času bylo zřejmé, že ve vláknech dopovaných germaniem jsou zásadním prvkem k fotocitlivosti na ultrafialové záření germanium-oxidová deficitní centra [1].

V této době jsou již při výrobě vláknové mřížky používány postupy, jako např. boční expozice UV zářením s velkou intenzitou. Pro výrobu těchto mřížek se typicky využívá druhá harmonická Argonového laseru v kontinuálním režimu a nanosekundové impulsní lasery KrF a ArF. Ve standardních vláknech s malým obsahem GeO je malá UV absorpce a tím i fotoindukovaná změna indexu lomu [1].

V praxi se setkáváme se dvěma typy vláknových mřížek. Prvním typem je mřížka s dlouhou periodou (Long Period Fiber Gratings – LPFGs), která má periodu až $500\ \mu\text{m}$. Dalším typem jsou Braggovy vláknové mřížky (Fiber Bragg Gratings – FBGs) s periodou přibližně $1\ \mu\text{m}$. Rozdíl mezi mřížkami je nejen v délce jejich periody, ale také v principu výroby. Zatímco FBGs se většinou vytváří přímým osvětlením interferujících svazků přes fázovou masku, LPFGs se vyrábí osvětlením z boční části vlákna skrz amplitudovou masku [1].

Vláknové mřížky se mohou vyrábět i metodou „bod po bodu“ pomocí femto-

sekundového laseru, který má ale velkou spektrální šířku pulsů a vhodnější metody zatím zůstávají pomocí fázové nebo amplitudové masky. I přes tyto nevýhody femtosekundového laseru se však LPFGs vyrábějí. V několika studiích je uvedena výroba mřížek s dlouhou periodou s použitím 800 nm femtosekundových pulsů z titan-safírového laseru. U těchto vláknových mřížek byla pozorována vysoká teplotní stabilita [1].

1.2 Cíle diplomové práce

Vláknové mřížky jsou stále více využívány v senzorce a pro zlepšení citlivosti při snímání se hledají nové způsoby výroby těchto mřížek a její zefektivnění. S rozvojem vláknových mřížek se dostává do popředí i femtosekundový laser, jehož vlastnosti a využití ještě nejsou zcela prozkoumány. Cílem této diplomové práce je seznámit se s ovládáním femtosekundového laseru a jeho možnostmi pro výrobu funkčních struktur pro telekomunikační techniku a sensoriku. Dále je cílem navrhnout a vytvořit v daném vzorku strukturu se změnou indexu lomu pomocí femtosekundového laseru a ověřit vlastnosti dané struktury.

První část práce zahrnuje obecné poznatky o optických vláknech, jejich rozdělení a využití každého typu vlákna. Jsou zde popsány i principy výroby optických vláken nejčastěji využívanými postupy. V další části se věnuji definici vláknových mřížek, jejich rozdělení a rozdíly. Třetí kapitola je věnována obecně laserům, jejich typům a rozdělení. Dříve se značně používaly plynové lasery CO_2 , nyní převážně pevnolátkové lasery s krystalem a v poslední době se objevuje využitelnost i laseru femtosekundového. Tento laser je podrobně popsán v samostatné kapitole, protože právě s ním budou prováděny veškeré pokusy na vzorcích a později i na optických vláknech. V praktické části této diplomové práce se zabývám zápisem struktur do planárních vzorků a optických vláken. Následně budou proměřeny vlastnosti senzorů vytvořených zápisem mřížek do optických vláken. Na závěr jsou shrnuty výsledky práce a využití takto vytvořených senzorů přímo v praxi.

2 PROBLEMATIKA OPTICKÝCH VLÁKEN

V poslední době se stále více nahrazují metalické kabely optickými vlákny, které vykazují lepší vlastnosti při přenosu signálu. Do budoucna se předpokládá, že téměř všechna metalická vedení se zamění v mnoha ohledech pokročilejšími optickými vlákny, které již nyní tvoří páteřní sítě mnoha systémů. Velká výhoda vysílání signálu přes optická vlákna je vysoká přenosová kapacita sítě, malý útlum signálu a malé průměry vláken. Mezi další klady patří přenos signálu na delší vzdálenosti, pro které je metalický kabel již nevhodný, a také je velkou výhodou odolnost vůči elektromagnetickému rušení, které u metalických kabelů vzniká. Nevýhodou je zatím složitější technologie výroby a díky tomu i vyšší náklady na pořízení a stavbu optické sítě [2].

Optická vlákna se uplatnila především v telekomunikacích, neboť zkvalitnila a zrychlila přenos dat. Využití nalézájí také při propojení jednotlivých budov. Optická vlákna totiž poskytují galvanické oddělení. Později také bylo zjištěno, že optická vlákna najdou výborné využití i v oblasti sensorové techniky jako snímače tlaku, teploty a jiných veličin. Velkou předností je jejich vysoká snímací citlivost, díky které se v dnešní době používají v sektorech, jako je např. vojenská technika, chemický průmysl, medicína, a nebo také v senzorech využívaných v jaderných elektrárnách [2].

2.1 Princip šíření světla optickým vláknem

Optické vlákno slouží k přenosu signálu v podobě světla od zdroje záření k detektoru. Zdrojem optického záření může být LED dioda, ale mnohem více se používá laser pro svou vysokou rychlost přenosu. Detektorem se rozumí fotorezistor, fotodiody, anebo fototranzistor. Způsob přenosu světla je triviální. Vyslaný světelný paprsek dopadá na rozhraní dvou odlišných prostředí, kde každé z prostředí má jinou optickou hustotu a také jiný index lomu. Paprsek se ve vlákně tedy zčásti láme a prostupuje z jedné části do druhé, a zčásti se odráží od stěn vlákna a vrací se zpět do prostředí, ze kterého přichází [2].

2.2 Zdroje optického záření

Zdroj optického záření má za úkol transformovat elektrický signál na světelné impulsy, které bude možné vysílat pomocí optických vláken ke vzdálenému detektoru. Za zdroj záření lze teoreticky považovat jakékoliv zařízení, které vyzařuje světelný

paprsek. Pokud bychom chtěli dosáhnout nízkého útlumu a vysoké účinnosti, je velice vhodné k tomu využít přímo určené speciální zdroje záření. Takových zdrojů je více a každý z nich má jiné vlastnosti, výhody a nevýhody, podle kterých rozlišujeme, pro jaký segment použití jsou nejvhodnější. Nejčastěji využívanými zdroji jsou LED dioda, nebo laserová dioda [2].

LED dioda

LED dioda je polovodičová elektroluminiscenční dioda, která funguje na principu P–N přechodu polarizovaného v propustném směru. Tato dioda vyzařuje infračervené záření s vlnovou délkou přibližně 850 nm. Vstupní elektrický kód se mění na výstupní proud infračervených impulsů, které jsou vyzařovány do optického vlákna. LED diody patří k levným zdrojům světla a většinou jsou využívány spolu s multimódovými vlákny vzhledem k jejich nízké intenzitě výkonu a velké šířce pásma. Používají se v digitálních systémech s nižší přenosovou rychlostí [2].

Laserová dioda

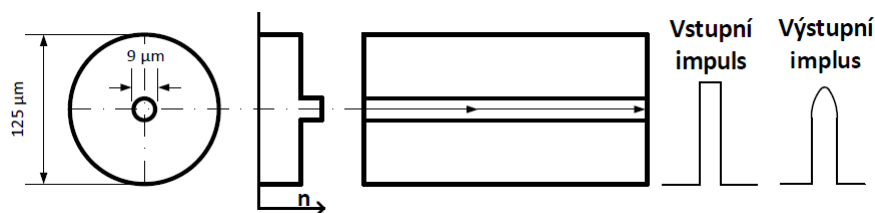
Tento zdroj záření je založen na zesilování světla pomocí stimulované emise záření. Laserová dioda používaná pro přenos signálu optickými vlákny je vyrobena z fosfoarsenidu gallia. Laser s velikostí zrnka písku může produkovat výkon asi 10 mW. Vyznačuje se velmi úzkou vyzařovací charakteristikou a velkou intenzitou, vlnová délka se pohybuje přibližně kolem 1 až 2 nm nebo ještě méně. Laserové diody nacházejí uplatnění v přenosu signálu jednovidovými vlákny a v systémech, kde se kladou požadavky na vysokou bitovou rychlost přenosu [2].

2.3 Druhy optických vláken

V telekomunikacích se využívají především vlákna, která jsou určena na delší vzdálenosti. Tato vlákna vykazují nízký měrný útlum. Metalické páteřní sítě se již delší dobu nahrazují optickými vlákny z důvodu menších průřezů kabelů, ale především kvůli vysoké rychlosti optických sítí. Další výhodou je také odolnost vůči elektromagnetickému rušení.

- **Jednovidová optická vlákna**

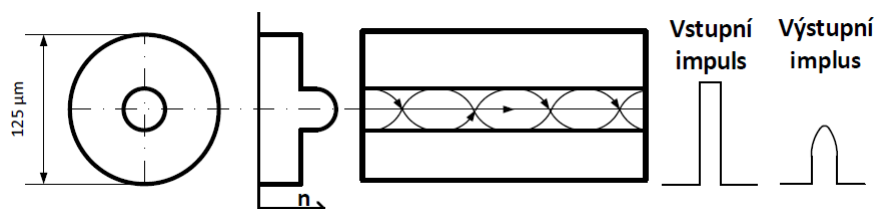
Největší výhodou těchto vláken je jejich nízký měrný útlum, který se pohybuje okolo 0,20 db/km. Další výhodou je také vysoká přenosová kapacita. Tato vlákna mají konstantní index lomu jádra a skokovou změnu indexu lomu pláště. Vláknem se šíří pouze jeden vid, a proto je průměr jádra zmenšen na hodnotu rovnou jen několika vlnovým délkám, nejběžnější jsou 1310 a 1550 nm. Tato vlákna se nejvíce používají v sensorice a pro přenosy dat na dlouhé vzdálenosti.



Obr. 2.1: Jednovidové optické vlákno

- **Mnohavidová optická vlákna**

Mnohavidová vlákna najdou svá uplatnění především na kratší vzdálenosti, protože se u nich projevuje vidová disperze. Z toho důvodu jsou přenosy dat pomocí těchto vláken realizovány pouze na několik stovek metrů. Tato vlákna se používají hlavně v průmyslovém sektoru.



Obr. 2.2: Mnohavidové optické vlákno

2.4 Výrobní technologie optických vláken

Výroba skleněného optického vlákna je technologicky velmi náročný a nákladný proces. Od optického vlákna je očekáván malý útlum, aby jím mohl procházet světelný signál na dlouhé vzdálenosti v řádu několik stovek kilometrů. Pro výrobu optického vlákna je proto důležitý výběr vhodného typu skla a minimalizace nečistot [2].

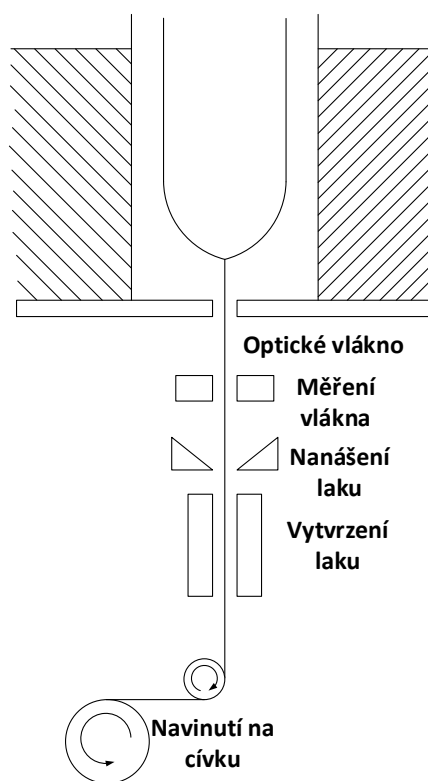
Jakékoliv nehomogenity v geometrii vlákna způsobují nežádoucí odrazy, rozptyly, absorpce a ztráty signálu. Pro předcházení těchto nežádoucích vlivů je výrobní proces pečlivě monitorován a následně regulován tak, aby nedocházelo k jejich náhodným změnám [2].

Základním materiálem pro výrobu optického vlákna je čisté křemičité sklo SiO_2 . V infračervené spektrální oblasti má tento materiál tzv. telekomunikační okna. Ve velkých vlnových délkách útlum křemenného skla prudce klesá, minimální útlum má přibližně kolem vlnové délky 1550 nm. Od vlnové délky 1600 nm útlum opět

začíná vzrůstat. V grafické závislosti útlumu na vlnové délce najdeme vrcholy, které jsou způsobené především OH ionty, tedy disociovanou vodou nacházející se uvnitř materiálu vlákna. Optická vlákna jsou díky tomu vysoce citlivá na navlhnutí a před vlhkostí musí být pečlivě chráněna ochrannými vrstvami bezprostředně po procesu tažení vlákna. Pro správnou funkčnost optického vlákna musí mít jeho jádro index lomu vyšší než jeho plášť. Z tohoto důvodu se jádro vlákna nevyrábí z čistého křemenného skla, ale ze směsi křemenného a germaniového skla GeO_2 , které má vyšší index lomu [2].

2.4.1 Tažení vlákna

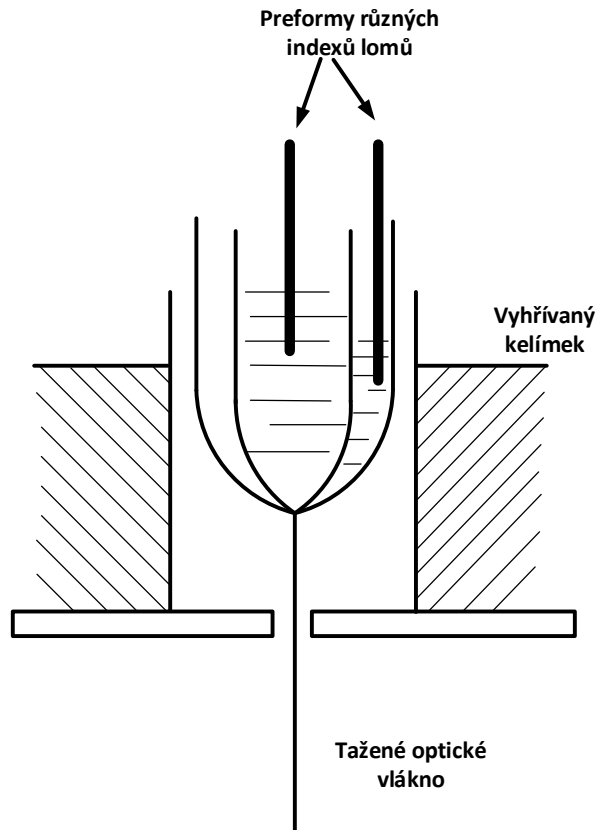
Proces tažení využívá zemské gravitace, kdy je preforma ve svislém stavu a zahřátím se vytvoří kapka táhnoucí za sebou vlákno. Teplota je snížena, vlákno se upne do navíjecího zařízení a kapka na konci se odlomí. Dále se na vlákno umístí laserový optický měřič, který kontroluje přesnost požadovaného průměru vlákna. Pokud hodnota neodpovídá a tažené vlákno je moc silné, zvýší se teplota ohřevu. Než se jádro navine na cívku, doplní se ještě o ochrannou, vodě nepropustnou vrstvu, která je tvořena lakem. Lak je poté vytvrzován působením UV záření z výbojek umístěných podél cesty vlákna. Nakonec je nanesena sekundární ochrana [4, 3, 2].



Obr. 2.3: Tažení vlákna

2.4.2 Metoda dvojitého kelímku

V této metodě se využívá principu tažení ze dvou kelímků, ve kterých je preforma o jiném indexu lomu. Na dno kelímku září laser, který určuje teplotu a rychlost tavení. Tato metoda umožňuje vytvářet velmi dlouhá vlákna při vysoké rychlosti tažení. Ještě před navinutím na cívku se musí na jádro nanést primární ochrana.



Obr. 2.4: Metoda dvojitého kelímku

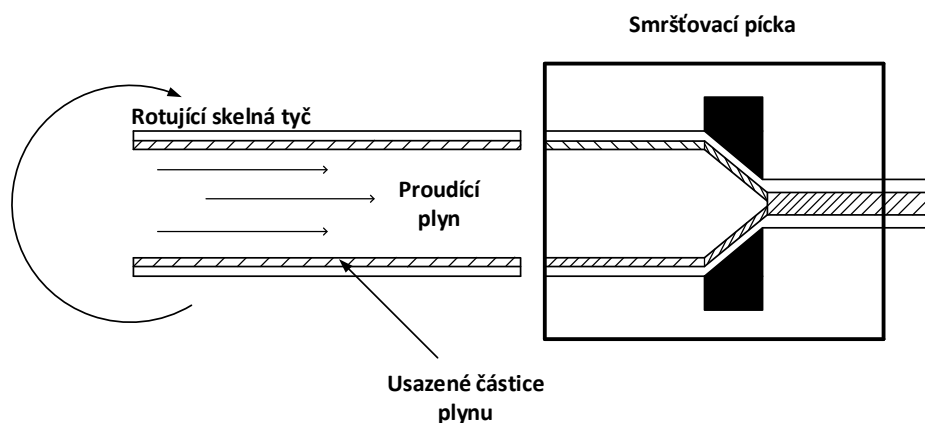
2.4.3 Plynná fáze

Preforma pro výrobu optického vlákna je trubice vyrobená ze skel požadovaných vlastností pro jádro a plášť budoucího vlákna. Jak dlouhé vlákno v kuse bude možno vytáhnout, ovlivňuje velikost preformy. Běžné jsou průměry od 1 do 5 cm a délky od 30 cm do několika metrů. Z větších preforem je možné vytáhnout vlákno o délce až několik set kilometrů [2].

Technologie výroby:

MCVD (Modified chemical vapour deposition)

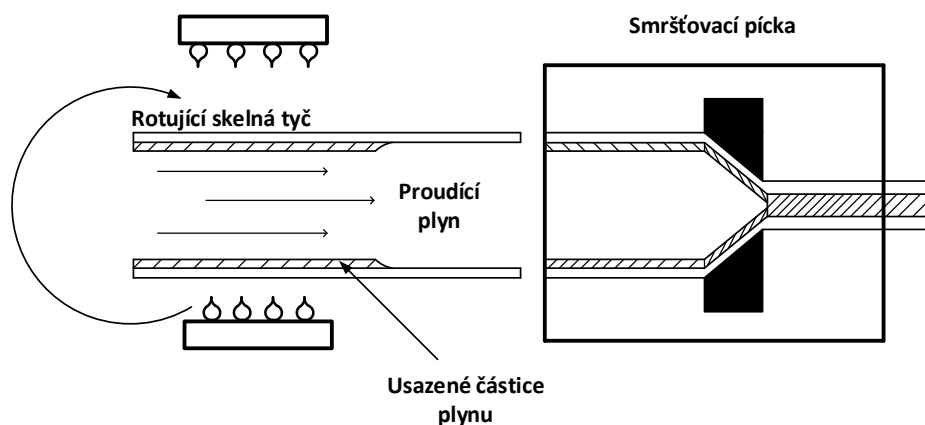
Technologie MCVD je velmi moderní a vyrábí se pomocí ní velice kvalitní vlákna. Chemický plyn je vpouštěn do komory, ve které se nachází rotující skelná tyč. Požadovaný index lomu je vytvářen usazováním tohoto plynu po obvodu vlákna. Nakonec se po této depozici preforma smrští v peci [5, 4, 2].



Obr. 2.5: MCVD technologie

PCVD (Plasma-activated chemical vapour deposition)

Tato metoda výroby je velmi podobná metodě MCVD. Rozdíl je v tom, že nanášený plyn se usazuje pouze na místech se zvýšenou teplotou. Díky tomu se jedná o vysoce jakostní technologii výroby optických vláken. V praxi se ale moc nepoužívá, protože je pomalá a velice nákladná [6, 4, 2].



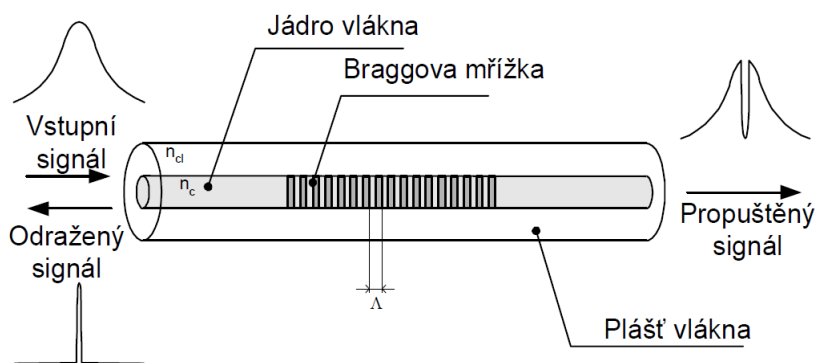
Obr. 2.6: PCVD technologie

3 VLÁKNOVÉ MŘÍŽKY

Hlavní vlastností struktur vláknových mřížek v optickém vlákně je rozptýlení světla v závislosti na rozložení změn indexu lomu. Ve vlákně se tak vytváří difrakční maxima a minima průchodu, či odrazu světla. Vláknové mřížky můžeme rozdělit na dvě základní skupiny. První skupinu tvoří Braggovy mřížky, jejichž řád je roven jedné a jejich perioda odpovídá polovině Braggovy rezonanční vlnové délky. U běžných aplikací se tato perioda pohybuje okolo hodnoty $1\ \mu\text{m}$. Druhou skupinu tvoří mřížky s dlouhou periodou, tzv. LPFG, u kterých se využívá zejména vyšších řádů period. Perioda u těchto vláknových mřížek dosahuje hodnoty desítek až stovek μm . Obě skupiny vláknových mřížek jsou si v principu velmi podobné, záleží ale na technologických možnostech výroby a na požadavcích pro aplikaci [1].

3.1 Braggovy vláknové mřížky

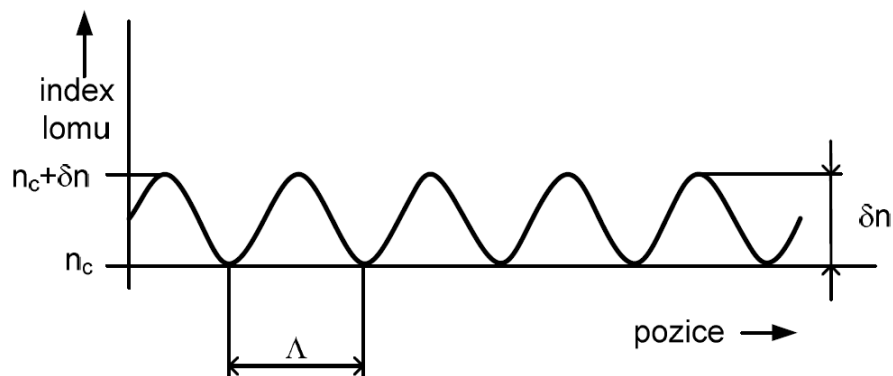
Vláknové mřížky jako struktury se změnou indexu lomu jsou využívány již několik let, ale zájem o jejich využití v sensorice a biosenzorech neustále vzrůstá. Jako Braggovu mřížku popisujeme periodickou změnu indexu lomu jádra podél osy vlákna s délkou několika milimetrů vytvořenou vystavením jádra UV záření, které proniká přes fázovou masku. Periodická struktura poté tvoří rozložené Braggovo zrcadlo, které váže procházející a odražené optické záření [1].



Obr. 3.1: Schematický náčrt Braggovy vláknové mřížky [1]

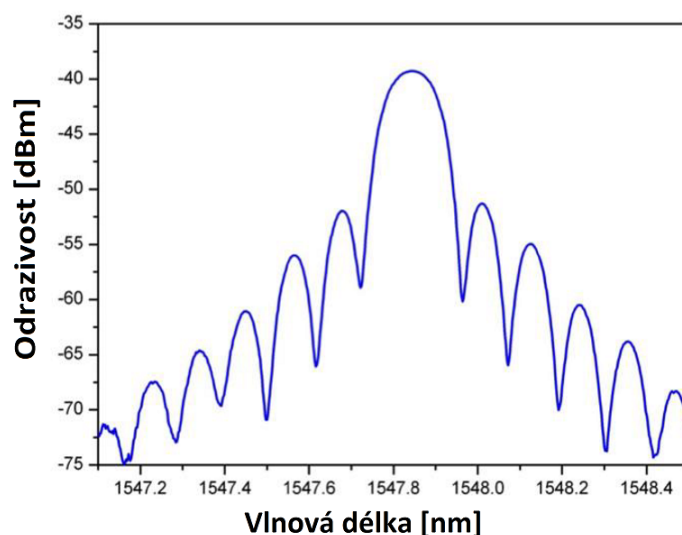
Velmi zjednodušeně bychom mohli říct, že vláknové mřížky pracují jako optické pásmové filtry, které odráží optické záření o vlnové délce blízké Braggově rezonanční vlnové délce. Záření ostatních vlnových délek propouští. Ve skutečnosti je ale přenos mřížky ovlivněn mnoha vstupními parametry. Vhodnou změnou těchto vstupních

parametrů můžeme dosáhnout požadované odezvy. V tom nejjednodušším případě můžeme uvažovat, že má mřížka přes celou svojí délku konstantní periodu Λ a změnu indexu lomu δ_n . Takovou vlnovou mřížku označujeme jako homogenní [1].



Obr. 3.2: Průběh homogenní vláknové mřížky, kde n_c je index lomu jádra, δ_n je hloubka modulace a Λ je perioda [1]

Spektrální charakteristiku odrazivosti takové mřížky můžeme potom pro lepší názornost vidět na obr. 3.3. Střed hlavního maxima odpovídá Braggově rezonanční vlnové délce a představuje požadované pásmo, které má daná vlnová mřížka odrážet. Velký vliv na maximální odrazivost a šířku tohoto hlavního maxima mají parametry, jako např. délka mřížky, změna indexu lomu jádra a vlastnosti daného vlákna, do kterého je mřížka vytvořena.



Obr. 3.3: Charakteristika spektrální odrazivosti vláknové mřížky

Výroba Braggových mřížek

Nejdůležitější vlastnost pro výrobu vláknové mřížky se nazývá fotocitlivost, která nám umožňuje vytvářet stálé změny indexu lomu v jádru optického vlákna. Tato stálá změna nastává na základě osvitu vlákna zářením o vhodné vlnové délce a intenzitě. Původně byla fotocitlivost možná pouze ve vláknech s germaniem dopovanými vlákny z křemičitého skla a osvitem ultrafialovým zářením o velké intenzitě. Později však byla objevena fotocitlivost i v dalších vláknech, která již germanium neobsahovala téměř vůbec. V dnešní době jsou vlákna s germaniem dopovaným jádrem nejpoužívanější při výrobě vláknových mřížek. Příměsy germania v jádru vlákna nejsou zvoleny náhodně. Bylo zjištěno, že germaniem dopovaná jádra vykazují největší fotocitlivost [1, 7].

Výroba vláknových mřížek nezávisí pouze na účelu využití, ale také musíme vhodně zvolit typ vlákna, a od toho se odvíjí i jeho fotocitlivost. Pro sensoriku by bylo nejvhodnější použití standardních telekomunikačních optických vláken, které ale vykazují velmi nízkou fotocitlivost. Ke zlepšení fotocitlivosti ve vláknech jsou využívány různé technologické postupy, jako je např. zvyšování obsahu germania v jádru vlákna, hydrogenizace nebo žárové žíhání [1, 7].

Zřejmě nejpoužívanější metodou pro zvýšení fotocitlivosti je zvyšování obsahu germania v jádru optického vlákna. Fotocitlivost přímo souvisí s vytvářením defektních center v jádru vlákna. Tyto centra se vyskytují ve spojitosti s absorpcí světelného záření na vlnové délce okolo hodnoty 240 nm a jsou charakteristické výskytem chybných spojů, Ge-Ge vazeb. Se zvyšující se koncentrací germania roste i výskyt těchto chybných spojů, který vede ke zvyšování fotocitlivosti ve vlákne [1, 7].

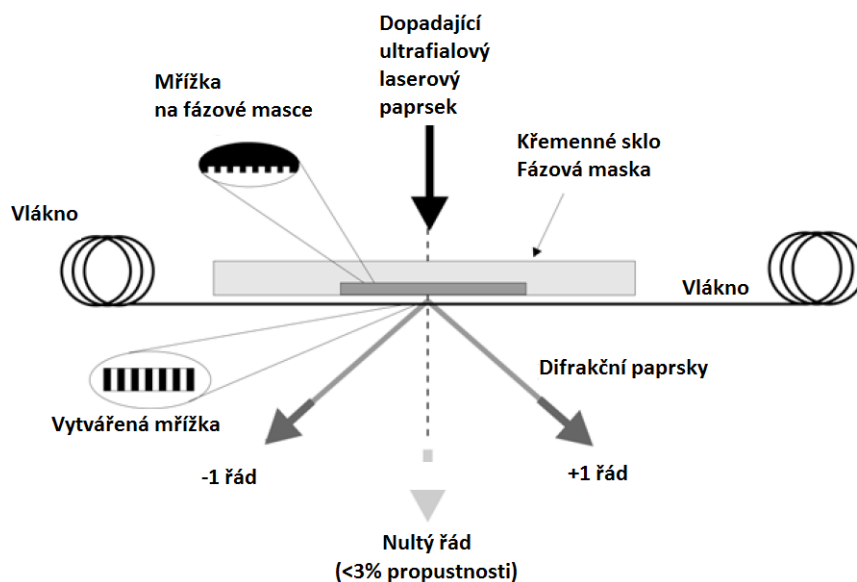
Druhou metodou pro zvýšení fotocitlivosti ve vláknech je hydrogenizace. Tato metoda je založena na principu difúze molekul vodíku do struktury jádra. Vláknem se při tomto procesu umístí po dobu několika dní až týdnů do tlakové komory, která obsahuje plynný vodík. Hydrogenizační proces probíhá uvnitř tlakové komory při teplotě v rozmezí 20 – 75 °C a tlaku přibližně 150 atm. Uvedený postup způsobí vpravení molekul vodíku do jádra vlákna. K difúzi vodíku do jádra dochází již při teplotách okolo 22 °C a to až v 95 % případů. Princip hydrogenizace je výhodný z toho důvodu, že je možné takto zvýšit fotocitlivost téměř u všech druhů vláken [1, 7].

Další metodou je metoda žárového žíhání. Je to jednoduchá a velice efektivní metoda ke zvýšení fotocitlivosti v germanio-křemičitých vláknech. Optické vlákno opakovaně zahříváme vodíkovým hořákem, který dosahuje teploty až 1700 °C. Během tohoto procesu dochází k difúzi vodíku do jádra a tvoří se defektní centra. Tento

postup probíhá přibližně 20 minut. Standardní telekomunikační vlákno může zvýšit svojí citlivost na více než 10-ti násobek. Výhodou této metody oproti hydrogenizaci je možnost zvýšení fotocitlivosti lokálně pomocí malého hořáku. Nevýhodou však je oslabování vlákna v důsledku vystavování vysokým teplotám [1, 7].

Technika fázové masky

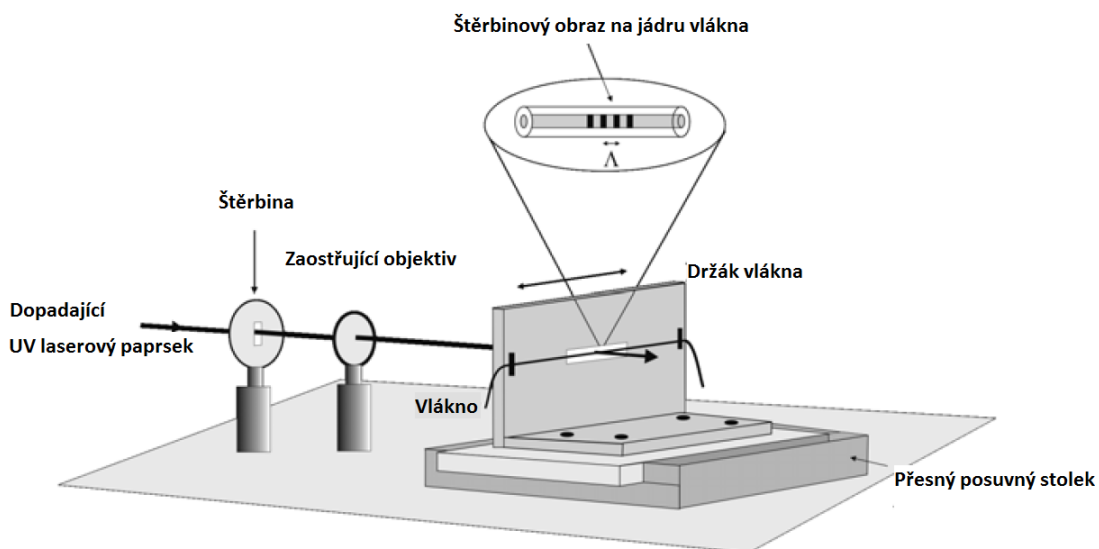
Jedna z nejúčinnějších metod pro zapisování Braggových mřížek do fotosenzitivních vláken je technika fázové masky. Fázové masky mohou být vytvářeny holograficky nebo elektronovou litografií. Mřížka fázové masky je vyrobena jednorozměrnou povrchovou reliéfní strukturou z vysoce kvalitního taveného křemene, propouštějící UV paprsky. Vytvořený reliéf ve fázové masce zajišťuje zpoždění mezi výstupky a drážkami mřížky přesně 180° , to znamená $\lambda/2$. Vláknová mřížka poté vzniká ozařováním optického vlákna koherentním UV zářením přes reliéf fázové masky. Vystupující světlo z tohoto reliéfu interferuje a vytváří minima a maxima intenzity, které jsou od sebe vzdálené polovinu periody optické mřížky na masce. Optické vlákno, které se nachází přímo pod reliéfní mřížkou masky, je exponováno právě těmito světelnými maximy. Výhodou této metody je exponování celé mřížky současně. Nevýhodou je nutnost vytváření individuální fázové masky pro každou mřížku s odlišnou Braggovou vlnovou délkou. Výrobní technologie fázové masky je velice nákladná a složitá [1, 7].



Obr. 3.4: Schéma systému pro vytváření Braggových mřížek při použití metody fázové masky [8]

Bod po bodu

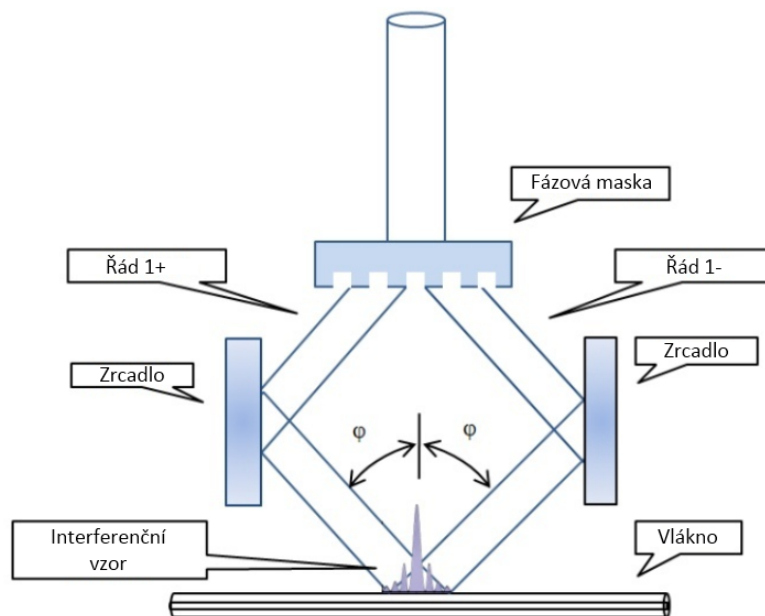
U této metody využíváme vysoce výkonný laser, který má svazek upraven pomocí soustavy čoček do velmi tenkého nerozbíhavého paprsku. Tento paprsek následně prostupuje štěrbinou, která jeho průměr upravuje na požadovanou velikost. Optické vlákno se nachází na posuvném stolku pod štěrbinou, kterou proniká laserový paprsek. Vzdálenost maxim indexu lomu a periody mřížky je určena frekvencí impulsů a rychlostí posuvu vlákna. Pomocí této metody můžeme vyrábět mřížky s dlouhou periodou nebo s proměnnou periodou, tzv. chirpované mřížky [1, 7].



Obr. 3.5: Schéma systému pro výrobu Braggových mřížek za použití techniky bod po bodu [8]

Interferometrická metoda

Při této metodě využíváme vysoce koherentní kontinuální laser. Paprsek tohoto laseru se rozdělí na dva stejně výkonné svazky, které se následně promítnou pomocí soustavy zrcadel na optické vlákno. V této oblasti optického vlákna svazky interferují a vytvoří interferenční obrazec periodicky se střídajících maxim a minim. Vzdálenost maxim a minim můžeme měnit úhlem dvou interferujících svazků. Nevýhodou této metody je vysoká citlivost na chvění nebo i na proudění vzduchu [1, 7].



Obr. 3.6: Schéma systému pro výrobu Braggových mřížek za použití interferometrické metody [9]

Ostatní metody pro výrobu vláknových mřížek

Výše uvedené techniky výroby vláknových mřížek patří mezi nejznámější a nejpoužívanější, ale existují ještě další metody, kterými lze vláknové mřížky také vytvářet. V podstatě se jedná o modifikaci předchozích uvedených metod výroby, popř. se jedná o jejich kombinaci.

První technikou je *interferometr s fázovou maskou*, která slouží k rozdělení primárního UV svazku. Následně jsou pomocí soustavy zrcadel přivedeny na vlákno difrakční řády +1 a -1 pod požadovaným úhlem, ve kterém interferují. Cílem této metody je použití prvku definovaného vlnovou délkou v sestavě interferometru. Polohou zrcadel je potom možné měnit Braggovu rezonanční délku zapisované mřížky [1].

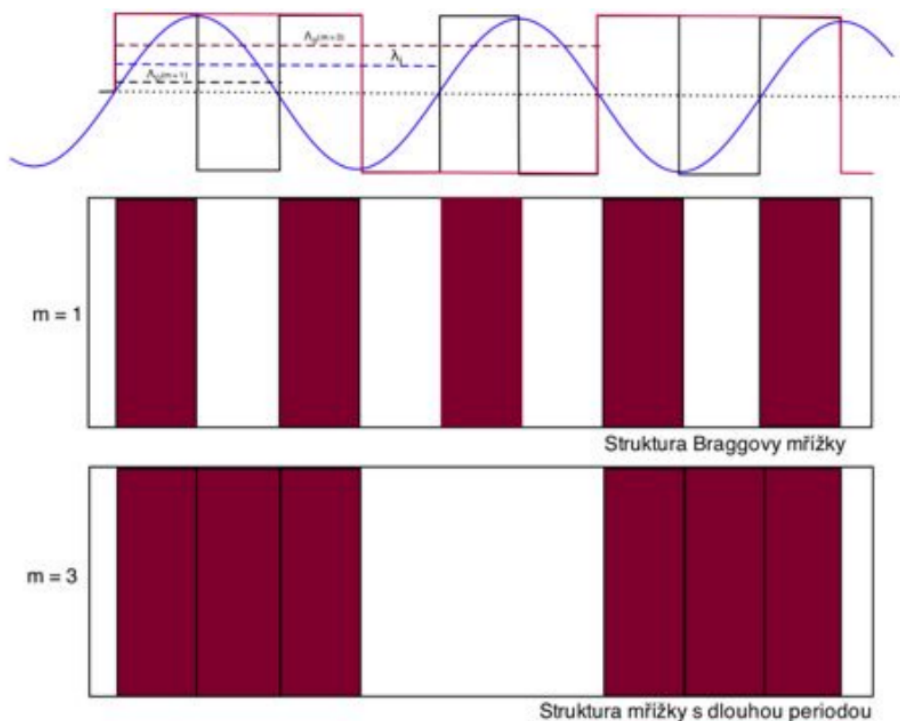
Další možnost, jak lze vytvářet vláknové mřížky, je pomocí *Lloydova zrcadlového interferometru*. Tato technika výroby využívá pouze jedno zrcadlo. Oproti tomu u klasické interferometrické metody je paprsek nejprve rozdělen na dva svazky, které jsou následně pomocí soustavy zrcadel spojeny. Na zrcadlo dopadá přicházející UV svazek, který je následně pod daným úhlem částečně odražen přes dráhu svazku. Tímto dochází k interferenci v oblasti, ve které se překrývá dopadající a odražený paprsek. Tato metoda je velice jednoduchá a má snadné použití. Omezení však spočívá v tom, že interferenční pruhy vznikají pouze v oblasti, jejíž

délka odpovídá polovině šířky svazku [1].

Poslední technikou je *skenování přes fázovou masku*. Omezujícími faktory pro tuto metodu jsou délka použité fázové masky a její kvalita. Při výrobě masky pomocí elektronové litografie dochází ve struktuře fázové masky k poruše periodicity z důvodu nepřesnosti spojování jednotlivých exponovaných sekcí. Ačkoliv je tato spojovací chyba náhodná a lze konečný dopad zprůměrovat, ovlivňuje výslednou charakteristiku propustnosti zapsané mřížky. Zapsané spojovací chyby a poruchy do vlákna způsobují rušení v přenosovém pásmu mřížky. K omezení těchto případných poruch periodicity během zápisu mřížky je možné použít metodu UV ořezávání. Změnou intenzivity osvětlení v místě poruchy dojde k přizpůsobení indexu lomu v optickém vlákne a tím i ke korekci periody mřížky vlivem změny délky optické dráhy [1].

3.2 Mřížky s dlouhou periodou

Princip těchto mřížek můžeme vidět na obr. 3.7. Pro porovnání zde máme zobrazeny dvě mřížky. První znázorňuje strukturu Braggovy mřížky a druhá strukturu mřížky s dlouhou periodou.



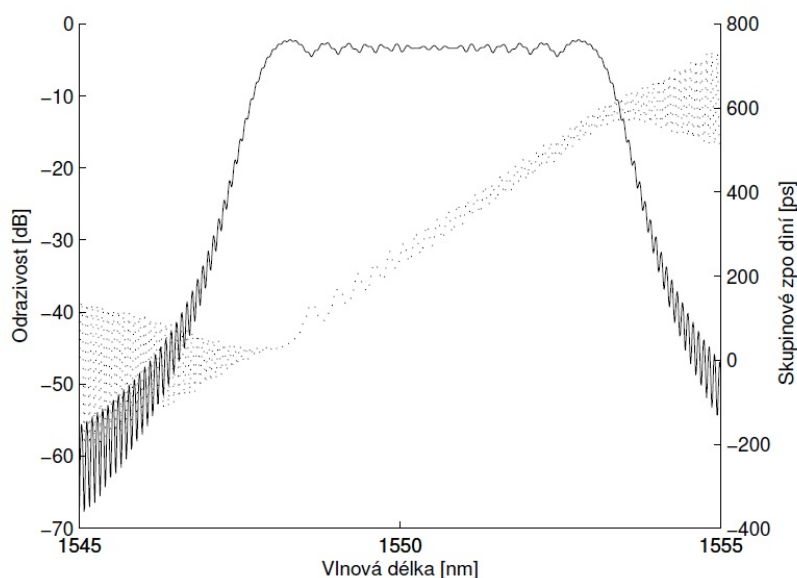
Obr. 3.7: Porovnání Braggovy mřížky a mřížky s dlouhou periodou [7]

Základní rozdíl mezi těmito dvěma typy můžeme rozpoznat podle průběhů jejich změn indexu lomu v jádře. Braggově mřížce, která je první strukturou na daném obrázku a je označena jako $m = 1$, odpovídá průběh příslušné změny indexu lomu jádra s periodou Λ_0 ($m = 1$). Na obrázku můžeme vidět, že mřížka splňuje Braggovu podmínku, její perioda odpovídá polovině Braggovy rezonanční vlnové délky. Druhá ze struktur uvedených na tomto obrázku je mřížka s dlouhou periodou, která je zde označena indexem $m = 3$ a Λ_0 ($m = 3$). Tato mřížka musí obsahovat v jedné periodě indexu lomu celistvý násobek poloviny délky vlny v optickém vláknu, abychom mřížku mohli nazvat mřížkou s dlouhou periodou [7].

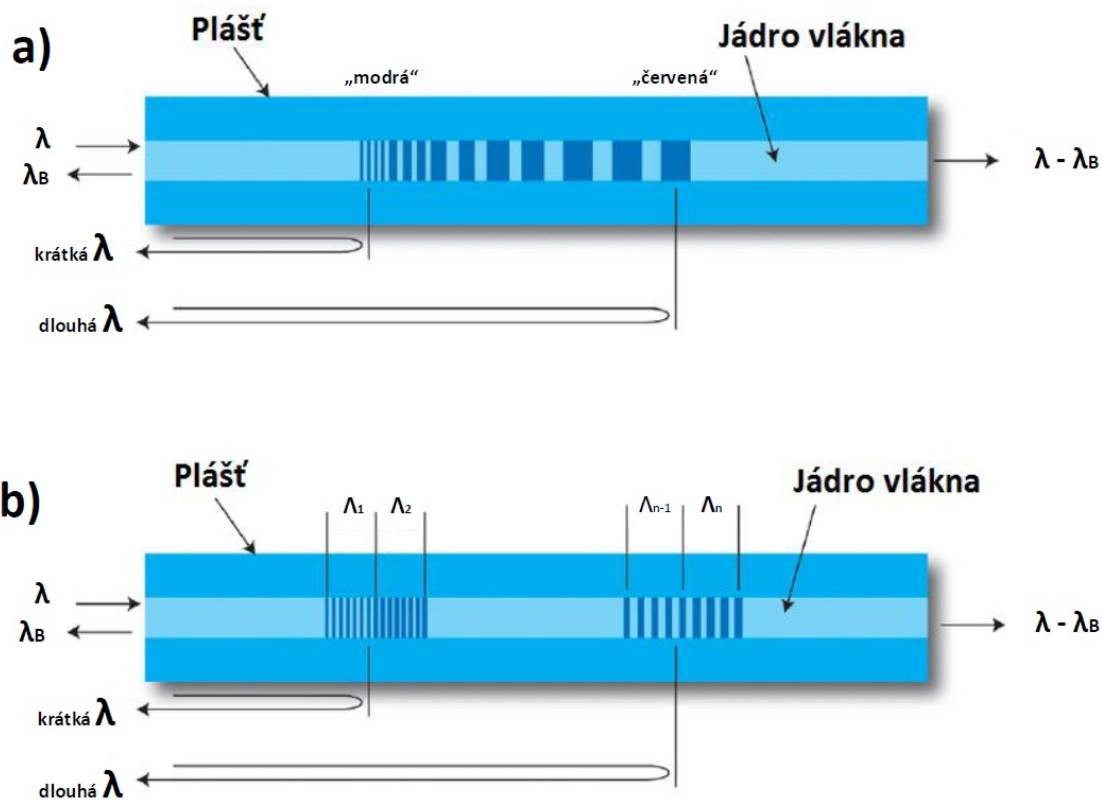
Rozdíly mezi mřížkou s dlouhou periodou a Braggovou mřížkou nalezneme i v technologickém postupu při výrobě. U Braggových mřížek se využívají fázové masky a následně i potřebné interference. Mřížky s dlouhou periodou můžeme vytvářet pouhým zápisem změn indexu lomu individuálních čar do optického vlákna. Zápisem individuálních čar do vlákna je možné velmi snadno realizovat mřížky s proměnnou periodou [7].

3.3 Chirpované vláknové mřížky

Jedny z nejzajímavějších struktur Braggových mřížek s okamžitou aplikací v telekomunikacích jsou tzv. chirpované Braggovy mřížky. Tato mřížka má monotoničtěji kolísavou periodu, jak je znázorněno na obr. 3.9.



Obr. 3.8: Zobrazení spektrální odezvy chirpované mřížky [1]



Obr. 3.9: (a) Schematické zobrazení chirpované mřížky s aperiodickým rozložením. (b) Zjednodušená mřížka spojením více mřížek s jinou periodou do série a vytvářející jeden celek.

Chirpovanou mřížku si lze představit jako několik různých Braggových mřížek zařazených do série, které následně tvoří funkční celek. Při odrazu světelného paprsku na této mřížce proto dochází k tomu, že jednotlivé složky světla urazí různou dráhu a dojde k jejich časovému posunu. Tato struktura je výhodná pro aplikace v telekomunikační a senzorové technologii a využívá se např. jako kompenzace disperze [8].

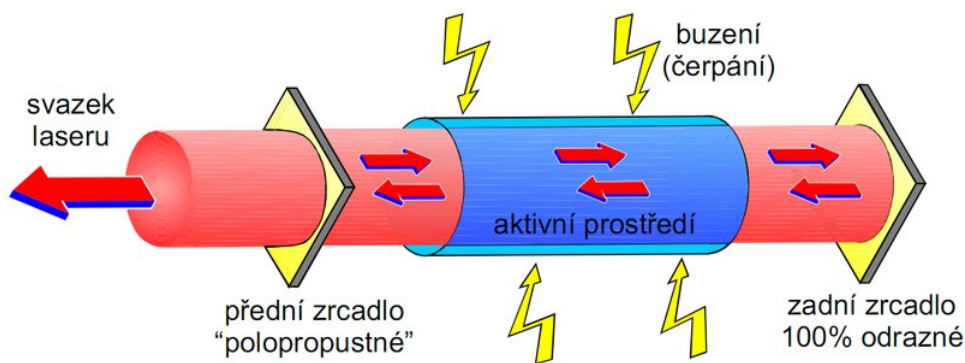
4 TYPY LASERŮ A PRINCIP ČINNOSTI

Zařízení označené jako „laser“ se objevuje poprvé v roce 1954 a vzniká jako zkratka z anglického názvu **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, která by se dala přeložit jako „zesilování světla stimulovanou emisí záření“ [10].

Od sestavení a uvedení do provozu prvního laseru již uplynulo několik desítek let. Za tuto dobu proběhl v této oblasti velký pokrok, při kterém došlo ke zdokonaňování parametrů prvních laserů a vývoje dalších typů. V současné době již existuje mnoho druhů laserů, které se od sebe liší svými vlastnostmi a oblastí využitelnosti. Lasery nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích, nejčastěji je však nalezneme ve vědě, průmyslu nebo zdravotnictví. V každé oblasti je výhodné využívat určitý typ laseru, který nejlépe splňuje zadané požadavky. Nelze používat na všechny oblasti pouze jeden typ. Lasery je možné rozdělit do kategorií podle aktivního materiálu v prostředí nebo buzení [10].

4.1 Princip činnosti laseru

Laser se skládá celkově ze tří základních součástí: *laserové aktivní prostředí*, *zdroj čerpání* a *rezonátor*. Základní schéma laseru je zobrazeno na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Základní schéma laseru [10]

Princip laseru je založen na stimulované emisi fotonů v aktivním prostředí. Za standardních podmínek se většina atomů tvořící aktivní prostředí nalézá v nejnižší energetické hladině. Vlivem působení vnějšího zdroje excitují atomy do vyšší energetické hladiny. Při přechodu zpět do původní energetické hladiny vyzařují nekoherentní světelné záření. Jako vnější zdroj může být např. elektrický výboj. Tyto přechody částic se dějí samovolně a prostředí se snaží zajistit nejnižší možnou energii. Takový stav je nazýván *termodynamická rovnováha*. Stimulovanou emisí fotonů

nám zajišťuje stav *inverzní populace*, díky kterému je dosaženo nadbytku populace na vyšší energetické hladině, který pokryje ztráty aktivního prostředí [10, 11].

Pro řízení směru laserového záření je aktivní prostředí tvarováno do dlouhého válce, ve kterém se nachází optický rezonátor. Tento rezonátor je tvořen dvojicí zrcadel. Jedno je polopropustné a druhé nepropustné. Mezi zrcadly se pohybují emitované fotony [10, 11].

Základní části laseru [10]

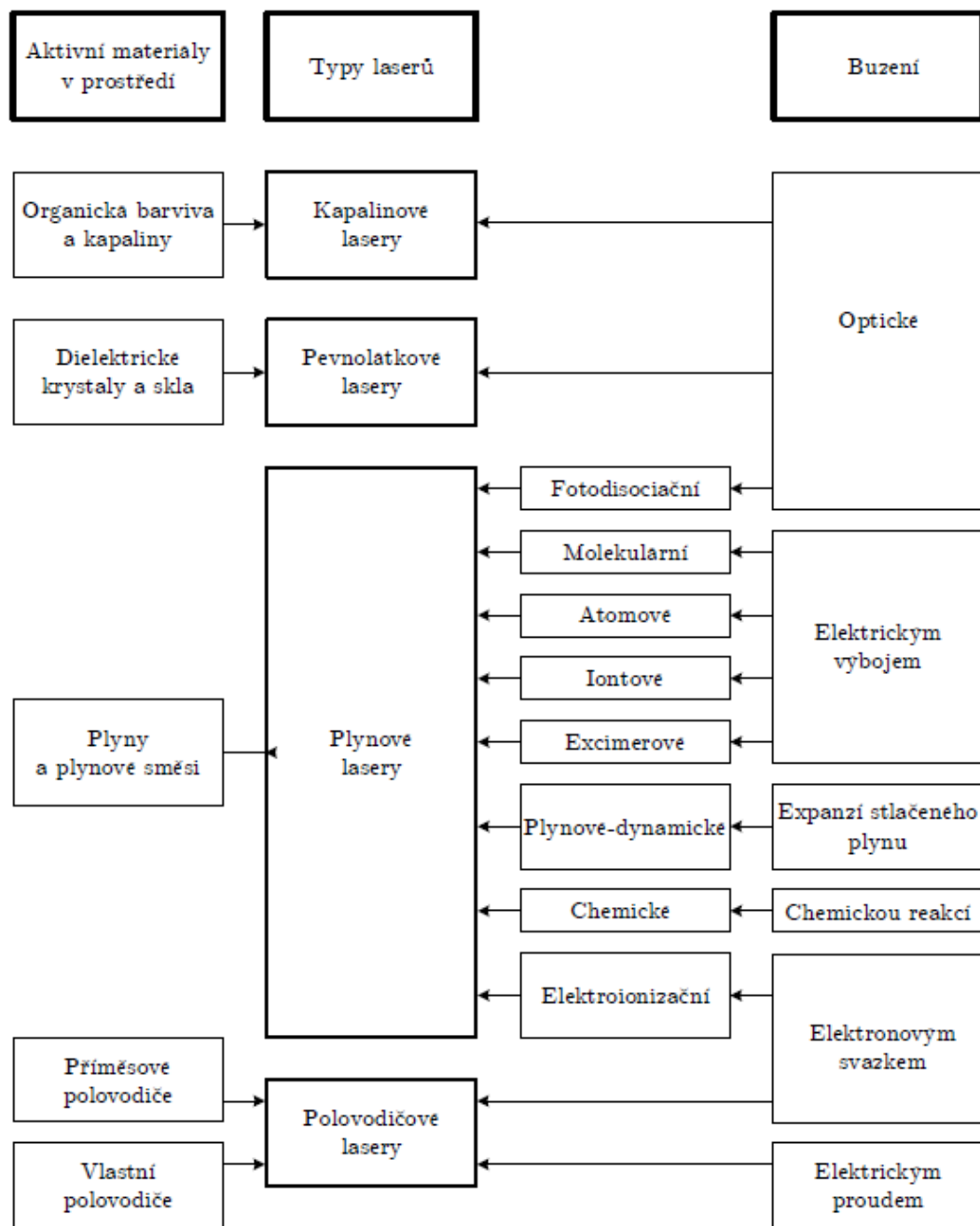
- Aktivní zesilovací prostředí – atomy schopné excitace a zajištění stavu inverze populace
- Zdroj energie – vyvolává excitaci atomů
- Optický rezonátor – zajišťuje odraz fotonů od zrcadel optického rezonátoru a díky tomu dochází k zesílení laserového záření

Základní rozdělení laseru [10]

- Aktivní prostředí – pevnolátkové, plynové, kapalinové lasery
- Vyzařovaná vlnová délka – submilimetrové, infračervené, viditelné, rentgenové, ultrafialové lasery
- Kvantové přechody – lasery molekulární, elektronové, jaderné
- Prostorová struktura laserového svazku – jednomódové, mnohamódové lasery
- Způsob čerpání – lasery opticky čerpané, čerpané elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, tepelnými změnami, chemicky
- Časový provoz laseru – pulsní, kontinuální lasery
- Délka generovaného pulsu – lasery s krátkými pulsy, s velmi krátkými pulsy

4.2 Typy laserů

Od vývoje prvního laseru v roce 1954 se jednotlivé typy laserů zdokonalovaly a bylo vyvinuto i několik dalších typů, které se od sebe liší svými vlastnostmi a použitím. Rozvoj laserových technologií dosáhl takové úrovně, že je v mnoha případech nepředstavitelné nahradit laser jinými metodami. Máme k dispozici opravdu velké množství typů, z nichž každý vyniká v nějaké specifické oblasti a každý je vhodný na něco jiného [10, 11]. Základní rozdělení podle použitého aktivního materiálu v prostředí je zobrazeno na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Rozčlenění laserů [11]

4.2.1 Kapalinové lasery

U kapalinových laserů se využívá roztoků iontů organických barviv jako aktivního prostředí. Nejčastěji se jedná o kapaliny, jako jsou např. glycerin, aceton, benzen toluen a další. Jejich konstrukce umožňuje měnit vlnovou délku vyzařovaného paprsku v rozmezí od 300 nm do 1500 nm. Při zvolení vhodného barviva použitého

jako aktivní prostředí je možné získat koherentní záření v podstatě na jakémkoliv vlnové délce z této oblasti. Díky této vlastnosti se jim přezdívá „přeladitelné lasery“ [10, 11].

Nejnámějším představitelem této skupiny je laser rhomadový, který může generovat pulsní záření od zelené po červenou oblast spektra. Největší nevýhodou tohoto laseru je toxicita a velmi nízká životnost aktivního prostředí, které se vlivem tepelného a světelného účinku rozkládá. V mnoha případech dochází k jejich nahrazování lasery pevnolátkovými [10, 11].

4.2.2 Pevnolátkové lasery

Do této skupiny řadíme všechny lasery, jejichž aktivní prostředí se nachází v pevném stavu. Aktivní prostředí je tvořeno ze skla nebo umělého krystalu, jako např. rubín, yttrium-vanadát, yttrium-aluminium granát, anebo křemíkové sklo. Toto aktivní prostředí je nejčastěji dopováno příměsími vzácných zemin, jako jsou neodym, ytterbium, erbium, holmium a thulium.

Jedním z nejrozšířenějších a technologicky nejvíce pokročilých zástupců pevnolátkových laserů je laser Nd:YAG. Aktivním materiálem je izotropní krystal yttrium-aluminium granátu dopovaný ionty neodymu. Barva monokrystalu je světle růžová až fialová v závislosti na koncentraci atomu neodymu. Vyzařuje neviditelné infračervené záření na vlnové délce 1064 nm, s menší účinností může emitovat záření i o jiných vlnových délkách. Buzení tohoto laseru zajišťuje nejčastěji xenonová výbojka nebo laserová dioda. Laser Nd:YAG má díky vysokému výkonu a vhodné vlnové délce výborné uplatnění. Výkon se pohybuje řádově v několika stovkách wattů. Využití tak nalezne v medicíně, vědě, biologii a průmyslu [10].

Laser Yb:KGW

Krystal Yb:KGW je jedním z nejslibnějších laserových aktivních materiálů. Jeho aktivním prostředím je ytterbiem dopovaný krystal draslíku a gadolinia tungstate. Tungstate je chemická sloučenina, která obsahuje oxoanion wolframu nebo směsný oxid obsahující wolfram. Jednoduchá dvouúrovňová elektronická struktura iontu ytterbia zabraňuje nežádoucím ztrátovým procesům, jako je konverze, excitovaná absorpce stavu a potlačení koncentrace.

Ve srovnání s běžně používaným krystalem Nd:YAG, dosahuje krystal Yb:KGW mnohem větší absorpční šířky pásma, má třikrát nebo čtyřikrát delší životnost emisí u podobných hostitelů s vylepšenou kapacitou uložení. Další výhodou je nižší kvantová vada, navíc je vhodnější pro diodové čerpání než tradiční neodymem dopované systémy. Menší Stokesův posuv snižuje ohřívání a zvyšuje účinnost laseru. V porovnání s jinými ytterbiem dopovanými laserovými krystaly, jako jsou Yb:YAG

a Yb:YCOB, Yb:KGW má mnohem vyšší (13-17 krát) absorpční průřez a nižší kvantovou chybu (4%). Další výhody krystalu Yb:KGW je širší emisní pásmo než u Yb:YAG, vysoký nelineární koeficient lomu světla a nejvyšší účinnost zešikmení (87%). S těmito výkonnostními výhodami se očekává, že krystaly Yb:KGW nahradí krystaly Nd:YAG a Yb:YAG v laserových systémech s vysokým výkonem. Krystal Yb:KGW má také velký příslib pro vytváření femtosekundových laserů s vysokým výkonem, krátkou impulsní délkou a jejich široké aplikace [12].

4.2.3 Plynové lasery

Plynové lasery mají aktivní prostředí tvořené atomy, ionty a molekulami v plynné fázi. Velká většina těchto laserů pracuje v kontinuálním nebo pulsním režimu, které se od sebe liší především dosahujícím výkonem. U kontinuálního režimu laser může dosahovat výkonu v rozmezí od jednotek mW až po desítky kW, u pulsního režimu je možné dosahovat výkonu maximálně několik stovek W. Mezi velké výhody těchto laserů patří vysoká účinnost, která se pohybuje kolem hodnoty 40%. Další předností paprsku je vysoká stabilita frekvence a malá rozbíhavost. Nevýhodou výkonných plynových laserů je jejich rozměr, neboť výkon je přímo úměrný velikosti aktivního prostředí [10, 11].

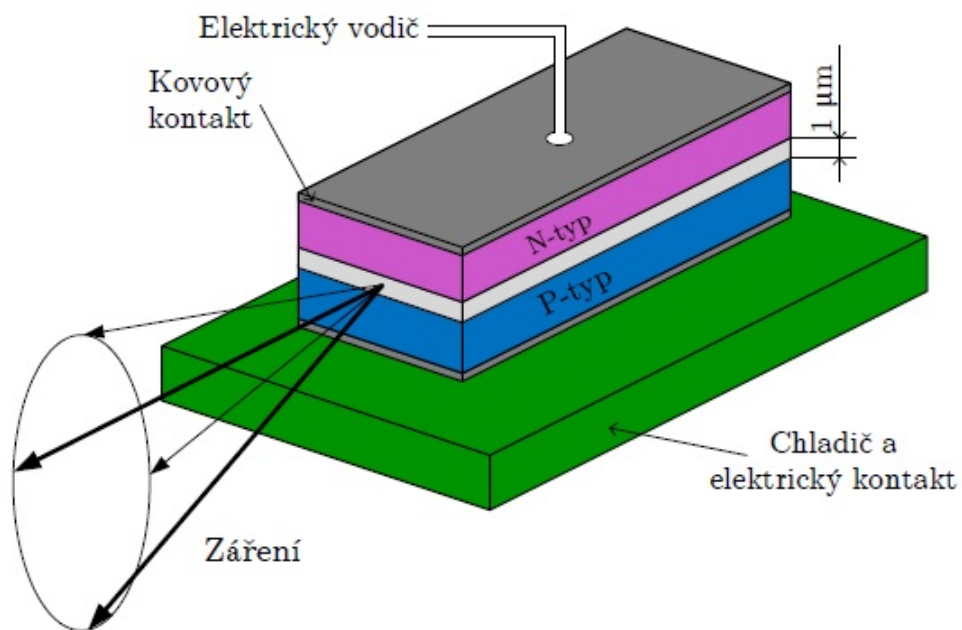
Laser CO₂

Tento typ laseru řadíme mezi nejvýznamější zástupce plynových laserů. Aktivní prostředí je tvořeno molekulami CO₂ (oxidu uhličitého). Účinnost plynových laserů se pohybuje kolem hodnoty 20% a jsou často využívány v průmyslovém odvětví. Tento typ laseru může pracovat v kontinuálním nebo pulsním režimu a výkon se běžně pohybuje od 0,5 do 20 kW, maximální hodnota výkonu dosahuje až 200 kW [10, 11].

4.2.4 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery patří v dnešní době k nejrozšířenějším laserům. Velmi často je lze dohledat pod označením jako laserová dioda. Největší rozdíl oproti ostatním typům se nachází v principu činnosti. Nepracují s přechodem elektronů mezi hladinami, ale vyskytují se u nich přechody elektronů mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Laserový paprsek je možné snadno řídit pomocí změny budícího proudu. Jejich velkou předností je vysoká účinnost, která se běžně pohybuje kolem 50% a mohou dosahovat vysokých výstupních výkonů. Polovodičové lasery se nejvíce používají v počítačové technice vzhledem k jejich miniaturním rozměrům a nízkému

výkonu. Uplatnění naleznou např. v DVD přehrávačích nebo laserových tiskárnách [10, 11].



Obr. 4.3: Princip polovodičového laseru [11]

Jako příklad polovodičových laserů, které jsou buzené svazkem elektronů a s polovodičem jako aktivní prostředím, můžeme uvést:

- galium arsenid (Ga-As)
- galium antimon (Ga-Sb)
- galium nitrid
- kadmium sulfid (Cd-S)
- kadmium selenid (Cd-Se)
- indium fosfid

5 FEMTOSEKUNDOVÝ LASER

Femtosekundové lasery vyzařují velice krátké pulsy, které jsou menší než 1 pikosekunda. Jejich název je odvozen od předpony „femto“, jejíž hodnota je 10^{-15} . Takto krátké impulsy soustřeďují svoji energii do velmi malého prostoru. Dochází zde k vysoké energetické hustotě a může dojít k vytvoření elektronového plazmatu a odpaření materiálu. Tento typ laseru spadá do skupiny pevnolátkových laserů a vyzařuje paprsky mimo viditelné spektrum [11].

V posledních několika letech bylo dosaženo rychlého pokroku ve vývoji přímého zápisu mikrostruktur vytvořených pomocí femtosekundového laseru a vlnovodné psací techniky v různých materiálech, zejména polovodičových a ostatních fotosenzitivních sklech. Tato technologie má značný potenciál, aby se stala převratnou ve výrobě fotonických zařízení a vedla k vývoji zařízení, která se obtížně vyrábějí jakoukoliv jinou technikou [13].

Femtosekundové laserové mikroobrábění, zpracování materiálů a mikrostruktury se staly důležitými v posledních letech pro mnoho oblastí, včetně mikroelektroniky, mikrooptiky, mikrochemie a mikrobiologie. Laserová ablace umožňuje mikroobrábění a vytváření vzorů na povrchu materiálu s minimální mechanickou a tepelnou deformací. Pro velkou část těchto aplikací poskytuje femtosekundový laser značné výhody oproti laseru nanosekundovému, které spočívají v jeho schopnosti přisunu energie do materiálu ve velmi krátkém časovém rozmezí a ještě před tepelnou difúzí. V důsledku toho může nastat tepelně ovlivněná zóna, ve které může docházet k tavení a opětovnému tuhnutí. Tato oblast je výrazně potlačena a vede ke strukturovaným vlastnostem, jako je menší velikost, vyšší poměr stran a větší prostorová přesnost. Navíc při intenzitách pod ablačními prahovými hodnotami existuje mnoho materiálů nelineární absorpce, která vede ke změnám struktury, a to na povrchu, nebo v objemu materiálu. Nyní jsou tyto procesy a efekty rozlišované a mohou být využity k řadě zajímavých a potenciálně užitečných mikrozařízení. To je zejména případ mikrooptických komponent. Laserem vytvořené vlnovody mohou vést k vytvoření 3D struktury v průhledných médiích, aktivních zařízení ve vlnovodech a možná v nedaleké budoucnosti k výrobě kompletního optického systému na jediném čipu. Další výhodou mikroobrábění femtosekundovým laserem je jeho všestrannost v rozsahu materiálů, se kterými lze pracovat. Femtosekundové laserové mikroobrábění je použitelné na kovy, polovodiče, polymery, oxidovou keramiku, křemičité aerogely, optická skla a krystaly. Pomocí tohoto laseru mohou vznikat fotonické krystaly, datová úložiště, vlnovody, mřížky a jednořadové spojky [13].

5.1 Princip femtosekundového laseru

Femtosekundová laserová ablace

Mechanismy, které určují femtosekundovou laserovou ablaci, mohou být komplikované. Vždy záleží na použitém režimu. Obecně platí, že vázané a volné elektrony na povrchové vrstvě jsou narušeny multifotonovou absorpcí a následně jsou generovány horké elektrony. Materiál začne ionizovat a plazma vytvoří povrch materiálu. Energie se poté přemístí do mřížky prostřednictvím přerušení vazby a rozpínavosti materiálu. Tento proces můžeme vidět na obr. 5.1 [13].

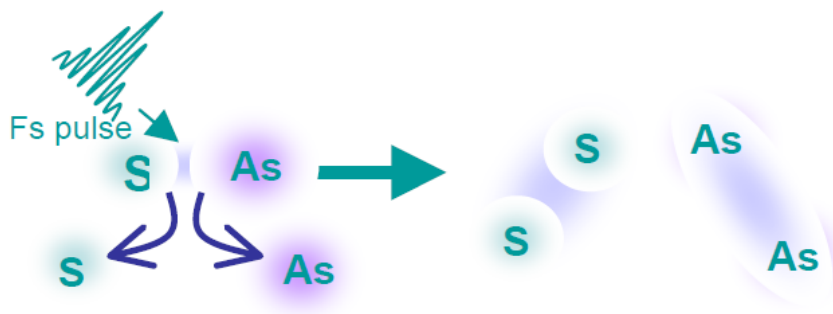


Obr. 5.1: Schéma ukazující rozdíl mezi (a) konvenčním mikroobráběním a (b) obráběním femtosekundovým laserem [13]

Výše popsané procesy se vyskytují v pikosekundovém časovém měřítku, proto je tepelná difúze do materiálu téměř zanedbatelná. Tepelná relaxace je charakterizována délkou teplotní difúze D , která se vztahuje k šířce impulsu τ_p podle vzorce $D = \kappa\tau_p^{1/2}$, kde κ je tepelná difuzivita materiálu. Pokud je teplotní difúze D kratší než absorpční délka, ablace předchází tepelnou difúzi a materiál nemá čas se roztavit a znovu ztuhnout. V důsledku toho lze dosáhnout vyšší přesnosti ve strukturálním mikroobrábění. Kromě toho je v režimu nanosekundové techniky obecně známo, že ablace začíná ionizací povrchových nosičů, a to jsou obvykle vady nebo nečistoty. Vzhledem k nerovnoměrnému rozložení povrchových nosičů i dielektriku, experimenty prokázaly, že neexistuje přesně definovaná mez poškození způsobená laserem pro laserové impulsy delší než 10 ps. Naproti tomu ultrakrátké laserové impulsy (<200 fs), často s cílovou intenzitou vyšší než 10^{12} W/cm², jsou schopny uvolnit vázané elektrony prostřednictvím multifotonové ionizace. Experimenty ukázaly, že laserem vyvolaná prahová hodnota poškození ultrakrátkého laserového impulsu, je přesná hodnota odpovídající počátku multifotonové ionizace, která je zcela určena energií ionizačního pásu energií cílové oblasti [13].

Modifikace materiálů femtosekundovým laserem

V režimu laseru, ve kterém nastává materiálová modifikace, zahrnují procesy mnohem více materiálových specifikací a také závisí na podmínkách ozáření. Vhodné jsou pro toto použití chalkogenidová skla. Tyto materiály As–S a As–Se mají vazební struktury přizpůsobitelné ke změně orientace ozáření femtosekundovým laserem [13].



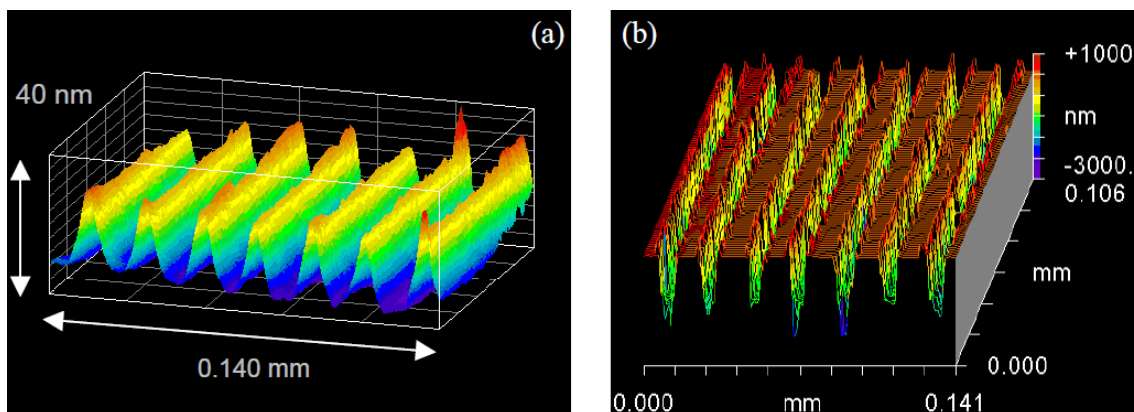
Obr. 5.2: Restrukturalizace vazby v As_2S_3 pomocí femtosekundového laseru [13]

Podrobnosti o procesech přeskupení atomů v materiálech lze získat několika technikami. Nevhodnější technika je zřejmě prostorové řešení Ramanovy spektroskopie, která poskytuje spektrální popis vazeb struktury v modifikované oblasti. Touto diagnózou bylo zjištěno, že ve vlnovodu zapsaného do materiálu původního uskupení As_2S_3 , se reorganizují vazby z As–S tak, že vytvářejí vazby As–As a S–S, a tím se mění hustota materiálu a index lomu. Tento proces přeskupení vazeb je znázorněn na obr. 5.2 [13].

5.2 Femtosekundová mikroablace a mikroobrábění

Femtosekundové lasery se zdají být velmi dobrým nástrojem pro mikroobrábění optických materiálů. Bylo prokázáno, že jednoduché femtosekundové lasery by mohly vytvářet optický rozklad a strukturální změny v objemu průhledných materiálů za použití úzce zaměřeného pulsu hodnoty pouhých 5 nJ [13].

Bylo provedeno mnoho výzkumů, které zkoumaly rozdíly v nastavení laseru pro objemové nebo pro povrchové obrábění. Pokud udržujeme intenzitu pulsů pod prahem ablace, daný obrazec se zapisuje do objemu materiálu. Tento proces je doprovázen mírnou fotoexpanzí, která byla pozorována pomocí interferometrického mikroskopu. Druhý režim nastane, když držíme intenzitu pulsů nad prahem ablace. V tomto případě vzniká reliéfní mřížka s drážkami na povrchu materiálu. Na obr. 5.3 je zobrazen výsledek tohoto procesu.



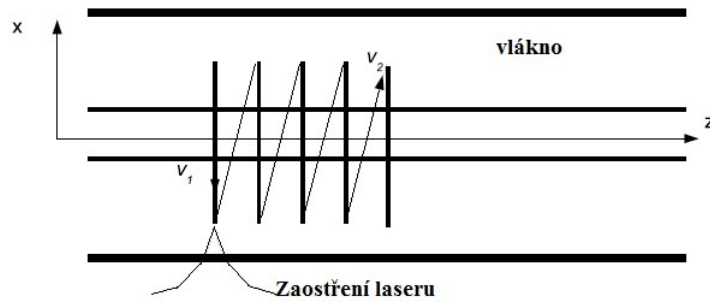
Obr. 5.3: Povrchový profil (a) fáze, (b) reliéfu mřížky zapsané mikroobráběním [13]

5.3 Možnosti zápisu femtosekundovým laserem

V kapitole 3.1 je uvedeno několik technik, jak je možné zapsat Braggovu mřížku do optického vlákna. V dnešní době se nejčastěji tento zápis mřížky provádí osvětlením vlákna UV paprskem přes fázové masky a během záření laseru dopujeme jádro vlákna částicemi germania. Tímto procesem se zvýší fotocitlivost a vytváří se defektní centra. Zřejmě nejmodernější technikou se ale nyní stává výroba vláknových mřížek za pomoci femtosekundového laseru. Tato metoda ještě není zcela prozkoumána a využívána v takové míře jako předchozí zmíněná technika. Předpokládá se, že postupem času zřejmě femtosekundový laser nahradí UV laser a fázové masky, protože takto vytvořená mřížka pomocí femtosekundového laseru poskytuje řadu výhod.

Metoda řádek po řádku

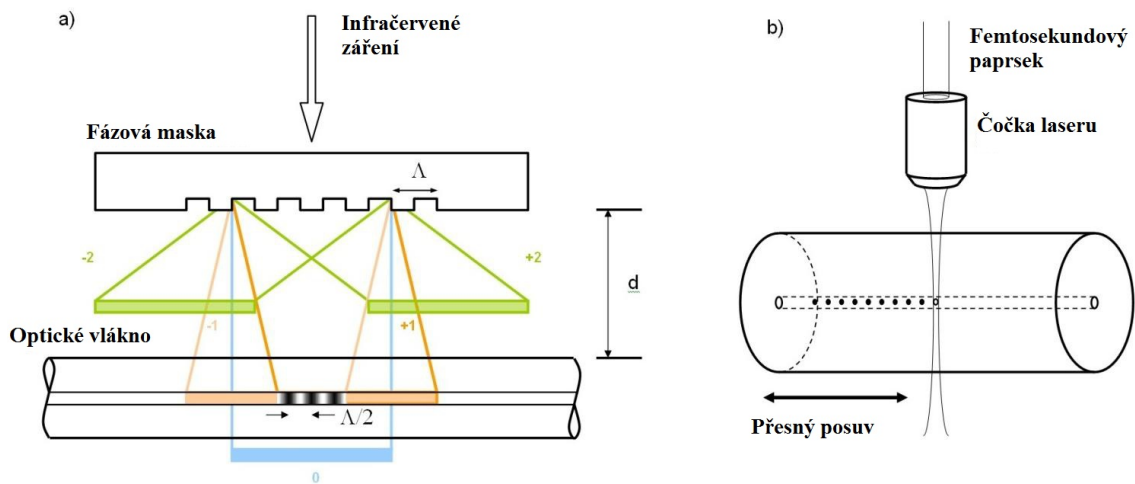
Femtosekundový laser umožňuje zápis mřížek hned několika způsoby. Jako první metoda je Line-by-line, to by se dalo přeložit jako „řádek po řádku“. Při této technice zápisu je nejprve potřeba správné zaostření laseru na jádro vlákna, dále zvolit vhodnou délku čar a vzdálenost jednotlivých čar od sebe. Právě touto vzdáleností, neboli šířkou mezery, je dán řád vláknové mřížky. Snižováním nebo zvyšováním mezery je také možné posouvat vytvářenou mřížku ve spektru. Na obr. 5.4 je zobrazen průběh zápisu, kdy laserem uděláme čáru kolmo přes jádro vlákna, posuneme se o velikost mezery a následně vytváříme další čáru. Během zápisu není potřeba dopovat jádro vlákna žádnými dalšími příměsemi, protože je v jádru vlákna vytvářena okamžitá změna indexu lomu.



Obr. 5.4: Line-by-line metoda zápisu mřížky femtosekundovým laserem [14]

Metoda Bod po bodu

Druhá metoda zápisu mřížky pomocí femtosekundového laseru je z anglického názvu Point-by-Point, neboli „bod po bodu“. V tomto případě pomocí kamery zaostříme na optické vlákno a laserem zapisujeme pouze body do jádra. Opět se posouváme o vypočítanou hodnotu mezery podle vzorce v závislosti na ostatních parametrech. Těmito parametry je myšlena vlnová délka a zvolený řád Braggovy mřížky. Stejně jako v předchozím případě je vytvářena okamžitá změna indexu lomu jádra a není potřeba dopování germaniem. Změna indexu lomu se vytváří přeskupením molekulových vazeb daného materiálu a změnou hustoty jádra optického vlákna. Bližší popis modifikace materiálů femtosekundovým laserem byl v kap. 5.1. Na obr. 5.5 je znázorněn rozdíl mezi metodami zápisu pomocí UV laseru s fázovou maskou a technika Bod po bodu pomocí femtosekundového laseru.



Obr. 5.5: a) metoda Fázové masky, b) metoda Bod po bodu [15]

Metoda fázové masky

Mřížky lze také vytvářet pomocí techniky fázové masky, která byla uvedena v kap. 3.1. Místo UV laseru se v tomto případě využívá laser femtosekundový, avšak rozdíl mezi těmito metodami je v tom, že jádro nemusí být během procesu ozařování dopováno germaniem. Změny indexu lomu jsou vytvářeny modifikací materiálu, neboli přeskupením vazební struktury materiálu, jak bylo popsáno v kap. 5.1.

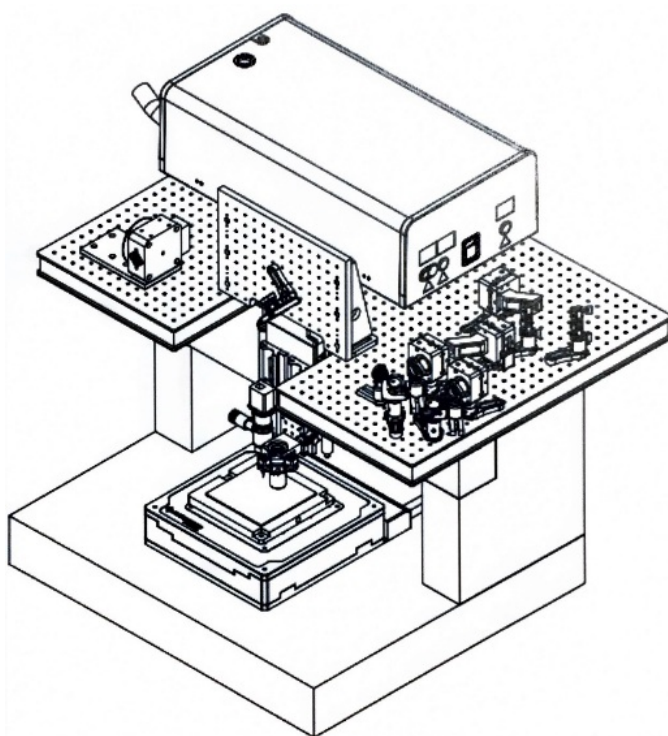
Problém zápisu pomocí femtosekundového paprsku a fázové masky je ten, že spektrální obsah femtosekundového pulsu je veliký. Když puls prochází fázovou maskou, tento spektrální obsah pulsu je široce rozptýlený a energie se rozkládá na velkou plochu. Použití fázových masek s rozsahem, který je daleko větší než vlnová délka dopadajícího záření, snižuje účinek šíření velkého spektrálního obsahu pulsu. Tímto způsobem se dá úspěšně použít maska nultého řádu k zápisu vysoce kvalitní Braggovy mřížky s vysokou indexovou modulací ve standardních telekomunikačních vláknech.

Výhody zápisu mřížky pomocí femtosekundového laseru oproti vytváření mřížek metodou fázové masky a UV laseru

- **Teplotní stálost** - mřížky vytvořené pomocí techniky fázové masky nejsou teplotně stálé a nad teplotu zhruba 800 °C jsou již v podstatě nepoužitelné, protože mřížka zaniká. Femtosekundový laser vytváří trvalé změny indexu lomu, díky kterým jsou takové senzory použitelné i při vlivu vysokých teplot.
- **Vlnová délka** - není potřeba vytvářet fázové masky pro každou vlnovou délku. V případě požadavků na jiné vlnové délky stačí pozměnit program a parametry pro zápis mřížky.
- **Volitelnost struktury** - je možnost naprogramovat téměř jakoukoliv strukturu, kterou je potřeba do vlákna zapsat. Během chvilky tak lze zapisovat chirpované mřížky, klasické mřížky, jejich kombinace nebo cokoli jiného.
- **Trvalé změny indexu lomu** - femtosekundový laser vytváří do vlákna trvalé změny indexu lomu, naproti tomu mřížka zapsaná pomocí UV laseru a fázové masky se postupem času vytrácí, až mřížka nakonec zcela zanikne.

6 LABORATORNÍ PRACOVNÍ STANICE FEMTOLAB

Všechny pokusy a testy uvedené v této diplomové práci jsou provedené pomocí femtosekundového laseru patřící společnosti NETWORK GROUP s.r.o. Celá femtosekundová pracovní stanice FemtoLab je sestavena litevskou společností Workshop of Photonics, která se kompletací těchto laserových systémů zabývá. FemtoLab patří mezi nejlepší zařízení tohoto druhu na světě, která jsou vyráběna zejména pro výzkumné a vývojové laboratorní účely. Stanice je vybavena precizními lineárně polohovacími stolky, výkonným laserem značky Pharos a pokročilým softwarem pro řízení systému.



Obr. 6.1: Náhled na laserovou stanici FemtoLab [16]

Vlastnosti systému FemtoLab

- Možnost obrábění pomocí 1. a 2. harmonické frekvence
- Vysokorychlostní přesné mikroobrábění
- Kvalitní průmyslový high-end laser
- Obrábění složitých objektů se submikronovou přesností
- Minimální zahřívání obráběného místa (bez opalování a natavování)
- Nanometrová přesnost polohování objektů

Využitelnost systému FemtoLab

- Povrchové mikro a nanoobrábění
- Gravírování
- Mikro-vrtání
- Laserová litografie a multifotonová polymerizace
- Změna indexu lomu v objemu materiálu
- Selektivní odstraňování vrstev
- Řezání křehkých materiálů
- Výroba vlnovodů

Celý systém FemtoLab se skládá z několika velice důležitých částí. Hlavní součástí celé stanice je laser pod označením Pharos, který generuje záření na dvou vlnových délkách, 1030 a 515 nm. Součástí je také celá řada zrcadel tvořící optickou trasu od laseru k zaostřovací čočce. K přesnějšímu nastavení hodnoty energie pulsu, kterou chceme daný vzorek obrábět, je pro každou vlnovou délku ještě přiřazen do optické trasy automatický atenuátor a polarizační rotátor. Všechny tyto prvky jsou situovány na vrchní desce. V tab. 6.1 se nachází seznam použitých komponent na vrchní desce v systému FemtoLab.

Označení komponenty	Popis
ATT.1	Útlumový člen pro vlnovou délku 1026 nm
ATT.2	Útlumový člen pro vlnovou délku 513 nm
M1.1	Nastavitelné zrcadlo (1026 nm)
M2.1	Nastavitelné zrcadlo (513 nm)
M2.2	Nastavitelné zrcadlo (513 nm)
M12	Sestupné zrcadlo (1026 nm i 513 nm)
FL.1	Nastavitelné magnetické zrcadlo (1026 nm)
PR.1	Polarizační rotátor
PR.2	Polarizační rotátor
APP1	Uzavíratelná clonka
Aspher	Asférická čočka

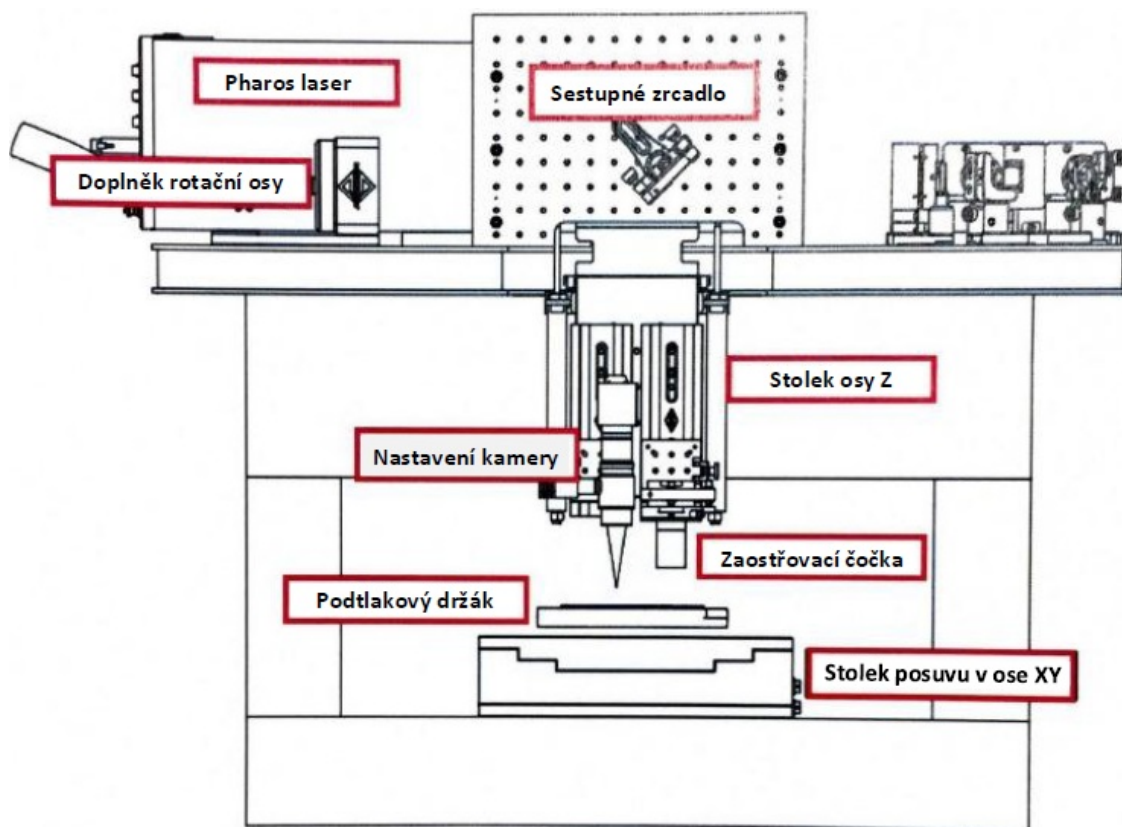
Tab. 6.1: Vysvětlení jednotlivých prvků z obr. 6.2

Jak již bylo uvedeno, vyslaný optický svazek prochází přes optickou trasu, na které se odráží od jednotlivých zrcadel. Pomocí sestupného zrcadla je poté přesměrován dolů na čočku, která daný paprsek zaostří na vzorek umístěný na pohyblivém stolku. Čočka obsahuje mechanickou clonku, pomocí které lze vyzařovaný svazek vycentrovat. Tato clonka je velice užitečná pro kontrolu vystředění paprsku v případě

změny vlnové délky, kdy je zapotřebí nasadit magnetické zrcadlo, protože je možné s nějakým prvkem maličko pohnout a paprsek již nebude ve středu čočky.

Zaostřovací čočka se spolu s kamerou CCD nachází na stolku, který se pohybuje pouze ve směru osy Z. Pohyb ve směru osy X a Y je zajištěn stolkem umístěným pod touto kamerou. Všechny stolky jsou vyráběné firmou Aerotech a vyznačují se vysokou přesností posuvu, která se udává kolem 3 nm. Vzorek je na porézním kameni přidržován pomocí vakuového držáku, aby mohlo být obrábění co nejpřesnější a bez sebemenšího nežádoucího pohybu. Promítání obrazu obráběného předmětu do programu počítače je řešeno vysoce kvalitní kamerou CCD s několikanásobným přiblížením objektu.

Stanice FemtoLab navíc ještě obsahuje odsavač kouře z celého systému. Během procesu obrábění se mohou vytvářet odpadní plyny nebo prach. Pro takové účely je součástí i vakuové sací čerpadlo, které tyto plyny odstraňuje.

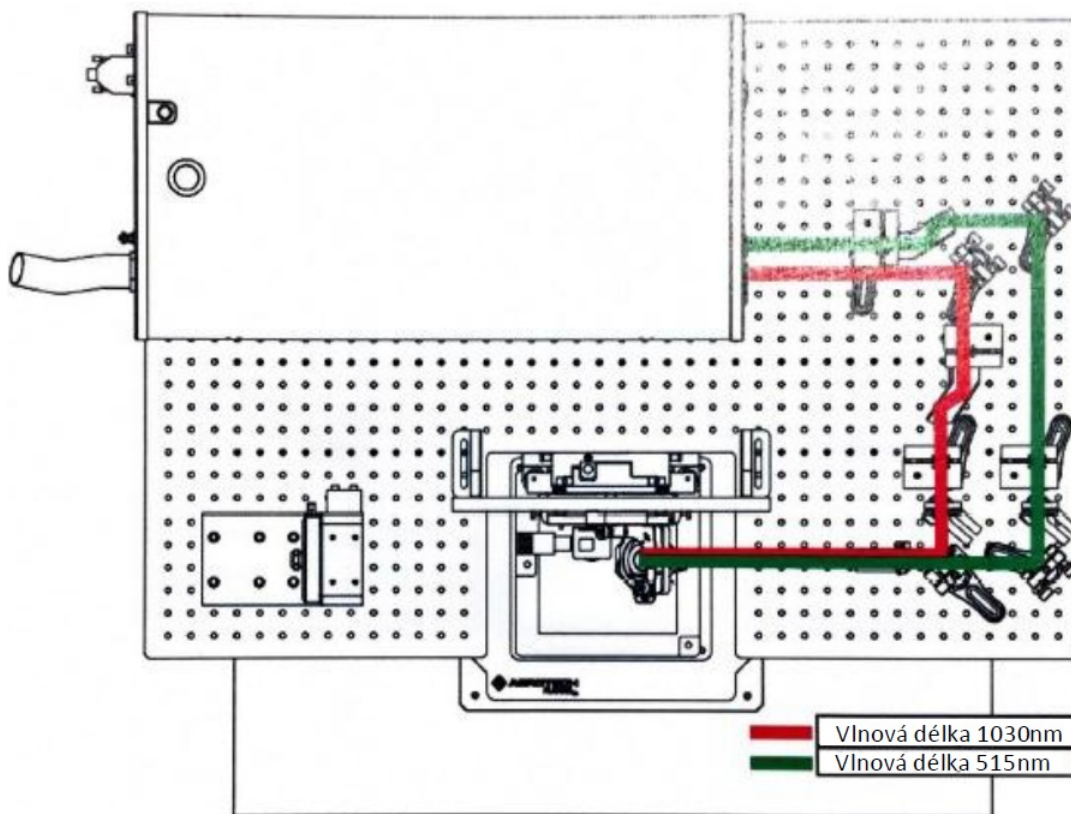


Obr. 6.2: Přední pohled na stanici FemtoLab [16]

Pracovní vlnové délky

Tento konkrétní typ laseru označením Pharos od výrobce „Light conversion“ využívá záření paprsku na třech vlnových délkách. Lze je jednoduše nastavit pomocí soustavy zrcadel, konkrétně přidáním magnetického zrcadla do optické trasy, pokud chceme využívat pracovní vlnovou délku 1030 nm. Tato hodnota vlnové délky je první harmonická, druhá harmonická vlnová délka má hodnotu 515 nm a poslední je na hodnotě 360 nm. Jednotlivé optické trasy jsou zobrazeny na obr. 6.3.

Z obrázku je patrné, že laserový paprsek může být veden dvěma trasami a každá z nich odpovídá jiné vlnové délce. První trasa je vyhrazena vlnové délce 1030 nm a je znázorněna na obrázku červenou barvou. Zelenou barvou je následně vykreslena trasa pro druhou harmonickou vlnovou délku 515 nm. Pro přenastavení pracovní vlnové délky se v první řadě musí sejmut nebo nasadit magnetické zrcadlo a dále je potřeba provést změny v ovládacím programu laseru.



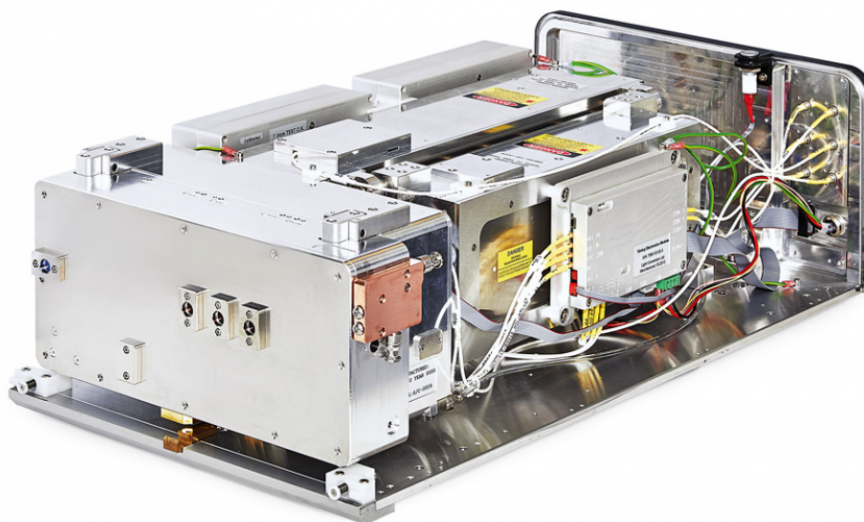
Obr. 6.3: Optické trasy vlnových délek 1030 a 515 nm [16]

6.1 Laser Pharos

Pharos je kompaktní vysokofrekvenční femtosekundový laserový systém založen na technice zesílení pulsu, která využívá ytterbiem dopovaný krystal draslíku a gadolinium tungstate (Yb:KGW) jako aktivní prostředí. Tento krystal byl podrobněji popsán v kap. 4.2.2.

Laserový systém Pharos se skládá z oscilátoru, regenerativního zesilovače, kompresoru, chladiče a v neposlední řadě z napájecí jednotky, která zajišťuje napájení pro výše uvedené části laseru a pro laserové diody. Použití pevnolátkových laserových diod pro čerpání Yb prostředí výrazně snižuje náklady na údržbu a poskytuje dlouhou životnost laseru. Systém také obsahuje vestavěný elektro-optický pulsní sběrač, který umožňuje pohodlné ovládání výstupu laseru v režimu „puls na vyžádání“. Provoz celého systému je automaticky řízen časovacím elektronickým modulem. Kompaktní, ale zároveň i robustní desing usnadňuje výměnu těchto modulů.

Většinu výstupních parametrů lze snadno nastavit během pár vteřin pomocí počítače a ovládací aplikace laseru. Mezi nastavitelné parametry se řadí např. doba trvání impulsu (290 fs - 10 ps), opakovací frekvence (1 kHz - 1 MHz), energie pulsu (do 0,2 mJ) a průměrný výkon (v této verzi do 6 W). Jeho výkon je dostatečný pro většinu aplikací i při vysoké rychlosti obrábění.



Obr. 6.4: Femtosekundový laser Pharos [17]

Laser Pharos obsahuje tyto dané moduly

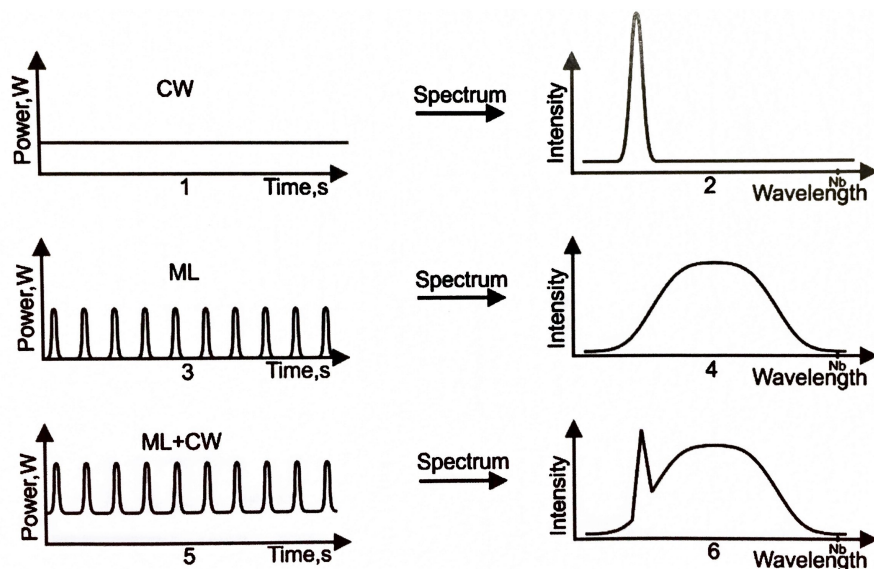
- Oscilátor
- Regenerativní zesilovač
- Kompresor
- Časovací elektronický modul
- Vysokonapěťový zdroj pro regenerativní zesilovač
- Vysokonapěťový zdroj pro pulsní sběrač
- Ovladač pro regenerativní zesilovač
- Ovladač pro pulsní sběrač

6.1.1 Pracovní režimy oscilátoru femtosekundového laseru Pharos

Oscilátor zabudovaný do laserového systému Pharos může pracovat ve čtyřech různých režimech:

- **Režim kontinuální vlny (CW).** Aktivní prostředí oscilátoru je čerpané kontinuální vlnou laserové diody. Aktivní prostředí během čerpání kontinuálním vlnovým zářením teoreticky vytváří kontinuální vlnové emise. Pokud pracujeme v tomto režimu, podélné módy rezonátoru oscilují nezávisle a bez fázového vztahu. Tyto kmity mají za následek průměrnou až téměř konstantní výstupní intenzitu v čase. Viz obr. 6.5 průběh 1 a spektrum 2.
- **Režim uzamčeného módu (ML).** Za určitých podmínek oscilátor začne pracovat v uzamčeném módu. Pokud pracuje v tomto režimu, podélné módy rezonátoru, které jsou kompletně fázové, mají zkušenost s konstruktivní interferencí a v důsledku toho jsou z výstupu vyzařovány periodické impulsy. Typické trvání pulsu oscilátoru Pharos je několik desítek femtosekund a typická opakovací frekvence je kolem 76 MHz, viz obr. 6.5 část 3 a 4.
- **Kombinace uzamčeného módu a režimu kontinuální vlny (ML+CW).** Třetí pracovní režim oscilátoru je kombinace obou předchozích módů. Oscilátor pracuje v pulsním režimu a současně se vysílá konstantní složka kontinuální vlny. Provozní režim oscilátoru se nedoporučuje pro zesilovač, protože nepředvídatelný zlomek zesílené energie je přenesen na nanosekundové impulsy a laserová operace se stane nestabilní. Je doporučeno vyhnout se práci v tomto módu, a proto je důležité si určit, za jakých podmínek se dostává do aktivní pozice. Znázornění tohoto operačního režimu a jeho spektra je na obr. 6.5 část 5 a 6.

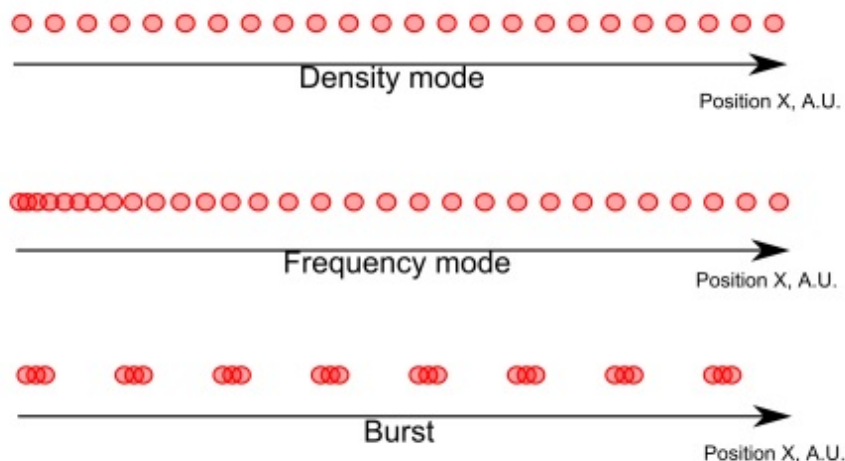
- **Dvojitý pulsní režim.** Čtvrtým módem oscilátoru je dvojitý pulsní režim, který je méně častý a předvídatelný. V tomto režimu jsou vysílány dva pulsy při nějakém náhodném časovém posuvu ven z oscilátoru.



Obr. 6.5: Pracovní režimy oscilátoru femtosekundového laseru Pharos a jejich spektrum [18]

6.1.2 Režimy vysílání pulsu - frekvence vs. hustota vs. burst

Protože některé zařízení podporují pozici synchronizovaný výstup (PSV) a některé ne, jsou možné odlišné způsoby obrábění s různými polohovacími zařízeními. S využitím funkce PSV mohou být výstupní spouštěče spojeny s prostorovou polohou. Ve frekvenčním módu je laserový výstup pouze časově závislý a nevztahuje se na zrychlení, tím vzniká proměnná hustota pulsu na vzorku. Pokud je využíván režim hustoty s typickými galvanicky skenovacími zařízeními, umožňuje uživateli nastavit hustotu pulsu, když už dosahují skenovací zrcadla skeneru nějaké rychlosti. Vzhledem k tomu, že u většiny systémů založených na skeneru není k dispozici rychlost v reálném čase nebo zpětná vazba, nevytváří požadovanou hustotu pulsů v oblastech trajektorie, kde zrcadla stále zrychlují. V podstatě tato volba umožňuje uživateli spouštět laser s libovolnou frekvencí až do maximální frekvence laseru, zatímco frekvenční dělič může být pouze celé číslo, a proto jsou volby spouštění frekvence omezeny.

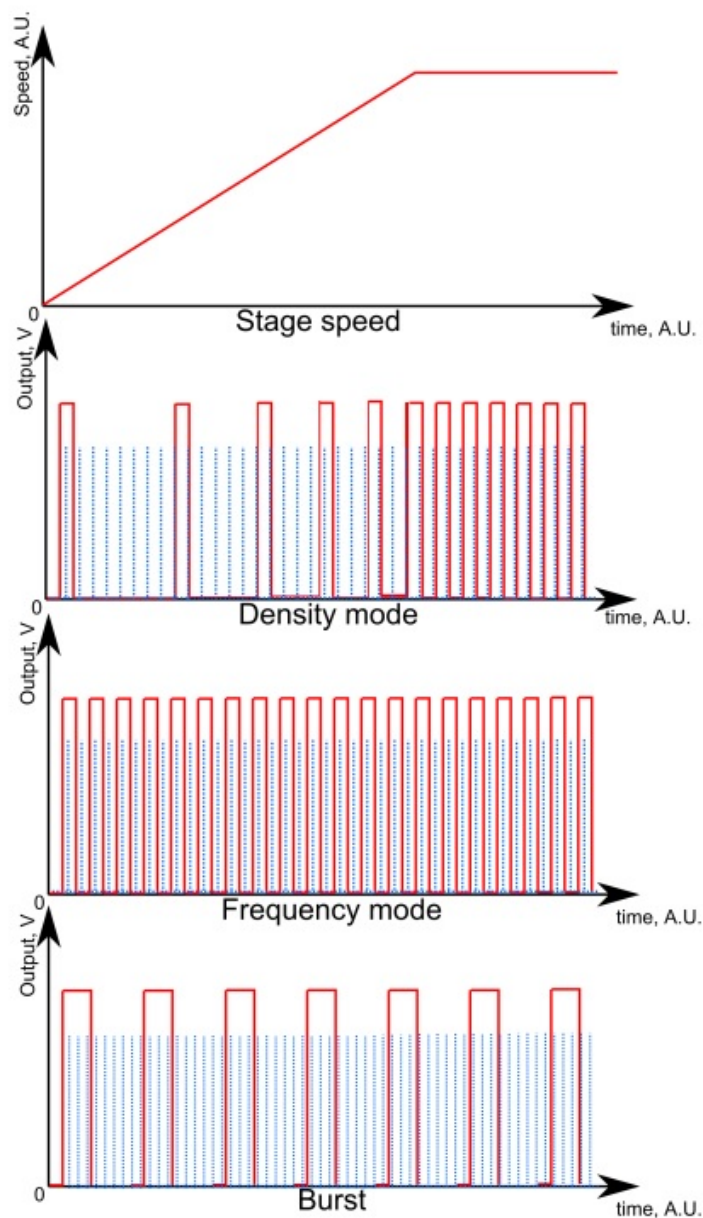


Obr. 6.6: Ilustrace laserového vzorkování v módu hustoty a frekvenčním módu [19]

Při využití zrychlujících okrajů můžeme částečně vyřešit problém příliš vysokého překrývání impulsů u počátečních a koncových trajektorií značením ve frekvenčním módu. Toto řešení nenahrazuje trvale režim hustoty, protože pozice označených míst zůstávají nedefinované.

V případě konstantního výstupu frekvence laseru není optický pulsní tok monitorován automaticky programem SCA, proto jakákoli nesrovnalost mezi laserovým pulsním časováním a časováním laserového hradla ohrozí přesnost umístění pulsů. Tato skutečnost nejvíce ovlivní laserové systémy s vysokou rychlostí pohybu a nízkou výstupní frekvencí. Např., pokud je hradlový puls $1/F_{rep}$, pro laserový systém s výstupní frekvencí 10 kHz, bude doba trvání $100 \mu s$. Při rychlosti pohybu 97 mm/s je dosažená pozice v délce trvání vratného impulsu $9,7 \mu m$, to je pulsní posunutí polohy, které lze očekávat pro takto nastavenou kombinaci parametrů.

Parametr burst udává počet laserových pulsů najednou na výstup. Ve frekvenčním módu nesmí zadaná frekvence vynásobená burstem překročit pracovní frekvenci laseru. V režimu hustoty musí být rychlost, hustota a burst také pod pracovní frekvencí laseru.



Obr. 6.7: Ilustrace polohovací rychlosti a laserové výstupní spouště v módu hustoty, frekvenčním módu a burstu [19]

6.2 Ovládací programy laseru

Kompletní nastavení laseru a jeho součástí zajišťují dva programy. Prvním je Pharos Service, kterým obsluhujeme laser, oscilátor, napájecí jednotku a jiné součásti. Druhým softwarem je SCA, pomocí kterého lze ovládat pohyblivé stolky a vytvářet program, podle kterého má laser obrábět materiál.

6.2.1 Pharos software

Naprostá kontrola parametrů laseru Pharos je dostupná pomocí počítačového programu od jeho výrobce. Tato aplikace může být také využita pro monitorování stavu, vizualizaci a protokolování.

Na obr. 6.8 je možné vidět rozložení oken programu Pharos Service. V levé a prostřední části se nastavují hodnoty oscilátoru a regenerativního zesilovače, v pravé části je možnost kontroly výstupního výkonu laseru, nastavení opakovací frekvence, pracovní vlnové délky a časování.



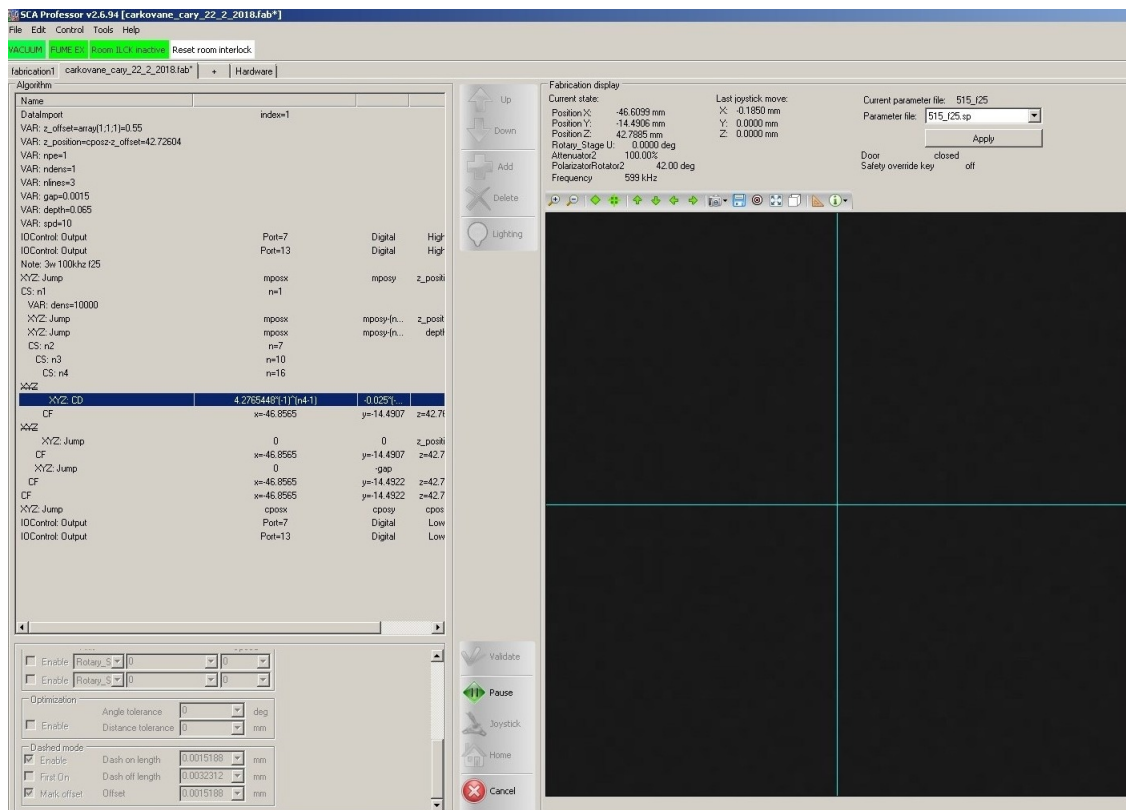
Obr. 6.8: Ovládací software laseru Pharos

Aplikace Pharos Service je navržena jako sada nemožných oken. Každé okno obsahuje ovladače a indikátory seskupené podle funkce.

6.2.2 SCA program pro mikroobrábění

SCA je software pro řídicí procesy obráběcích strojů a je určený především pro laserové mikroobráběcí aplikace. Má modulární architekturu, která umožňuje integraci

různých zařízení a jejich použití pomocí flexibilních příkazů. Tyto příkazy mohou být uspořádány do algoritmů poskytující možnosti složitého procesního skriptování a zároveň dokáží udržet jednoduchou a kompaktní reprezentaci algoritmu.



Obr. 6.9: Software SCA pro mikroobrábění

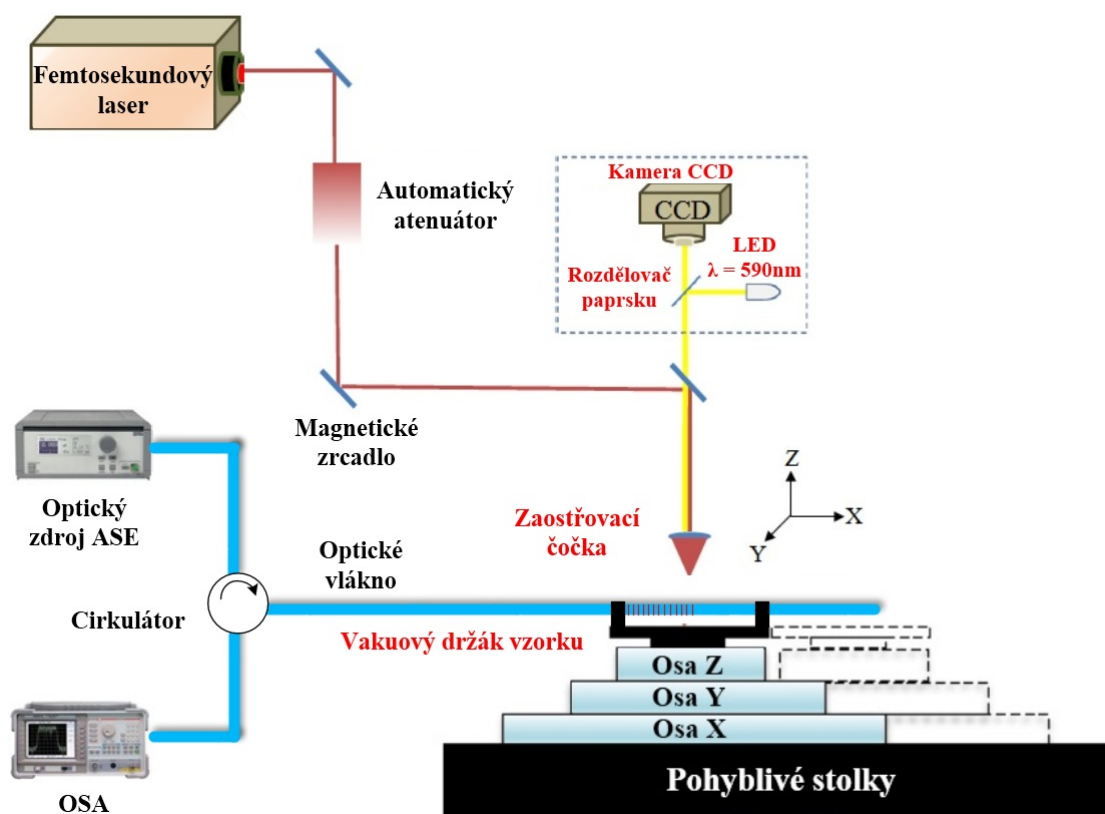
SCA software využívá grafické uživatelské rozhraní pro skriptovací algoritmy, mění nastavení hardwaru, ovládá připojená zařízení a vizualizuje proces obrábění. Skriptovací algoritmus se programuje v levé horní části této aplikace, spodní část zobrazuje nastavené parametry. V pravé horní části aplikace se nachází aktuální souřadnice, kam je laserový paprsek orientován. Pod těmito údaji se nachází okno, které slouží k náhledu na obráběný vzorek. Obraz je v systému FemtoLab snímán kamerou CCD s několikanásobným přiblížením a je následně vykreslen i v této aplikaci.

Na začátku pracovního procesu je nejprve nutné naprogramovat algoritmus, podle kterého se má laser pohybovat a vytvářet struktury. Zapneme přívícení LED, které zajišťuje osvětlení vzorku. Ovladačem pohyblivých stolků nasměrujeme vzorek pod kameru CCD a zaostříme na připravený materiál. Poté již stačí umístit naprogramovanou strukturu na vzorek a spustit laser.

7 EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA BRAGGOVY MŘÍŽKY POMOCÍ FEMTOSEKUNDOVÉHO LASERU

V této kapitole jsou popsány jednotlivé pokusy, které byly nezbytné k zápisu Braggovy mřížky do optického vlákna. Prvním krokem bylo seznámení se s možnostmi a ovládáním femtosekundového laseru. Následně bylo možné přistoupit k zápisu struktur do křemenného skla pro vyzkoušení funkcí laseru. Druhým krokem bylo vytvoření „V“ drážky, do které by mohlo být optické vlákno vloženo. Takto vytvořená drážka by měla zajišťovat stabilitu vlákna během expozice. Posledním krokem byl již samotný zápis vláknových mřížek přímo do optických vláken. Závěrem této kapitoly byly proměřeny vlastnosti vytvořených senzorů, především v tahu a při změně teploty.

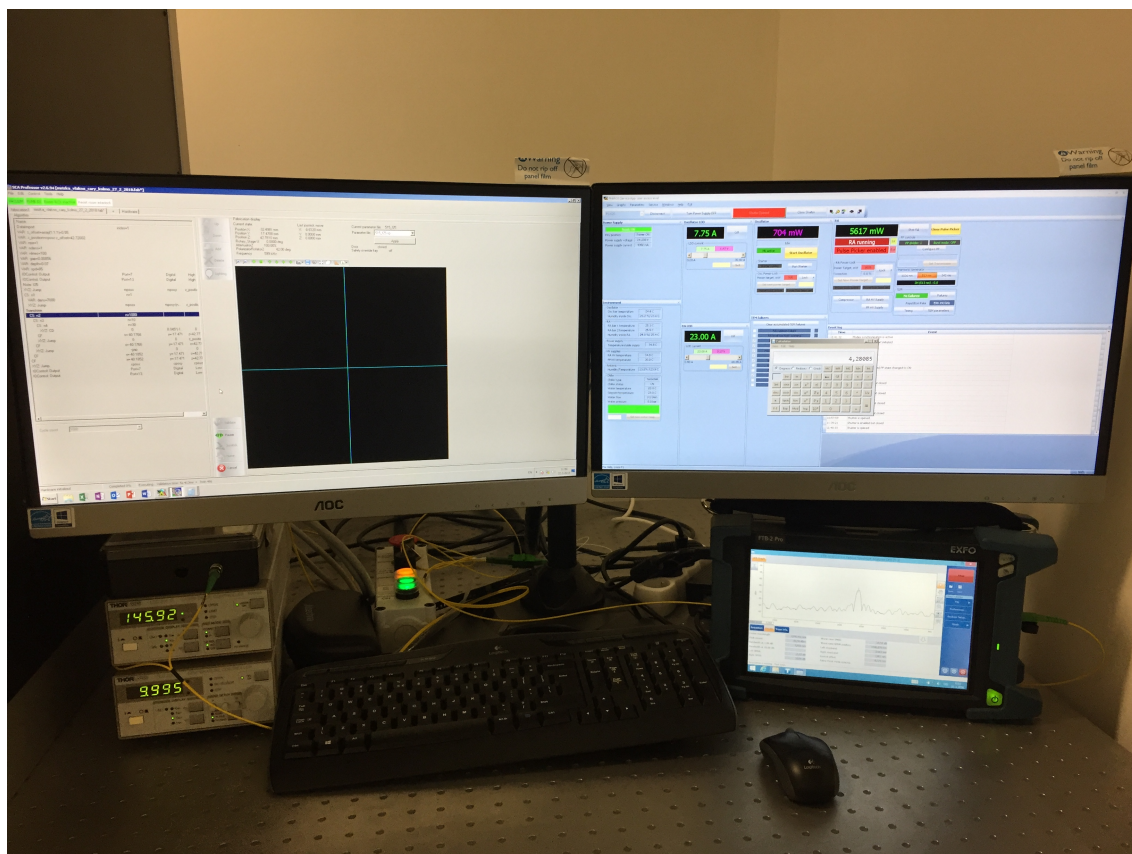
7.1 Měřicí pracoviště



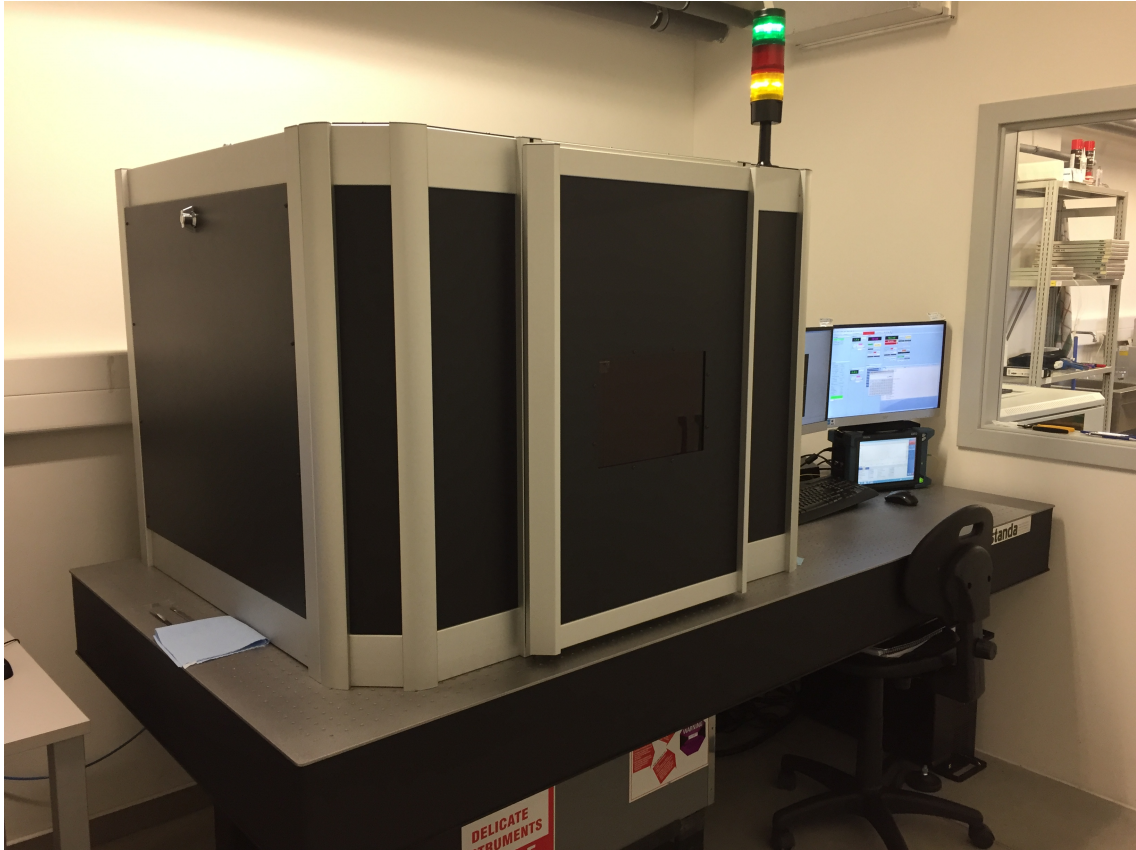
Obr. 7.1: Schéma zapojení měřicího pracoviště

Výroba mřížek pomocí femtosekundového laseru probíhala v laboratoři společnosti NETWORK GROUP s.r.o. V rámci měřicího pracoviště bylo využíváno zdroje širokospektrálního záření ASE (Amplified Spontaneous Emission - zesílení spontánní emise), řízený zdrojem proudu Thorlabs LDC 205 C a teplotním kontrolerem Thorlabs TED 200 C. Záření ze zdroje bylo vedeno do prvního portu cirkulátoru pro vlnovou délku 1550 nm. Ke druhému portu cirkulátoru byl připojen vzorek optického vlákna umístěný v systému FemtoLab na stolku s mikroposuvem ve směru osy XY. Ke třetímu ramenu cirkulátoru byla připojena optická větev s vyhodnocením spektra optickým spektrálním analyzátozem EXFO FTB-2-PRO.

Měřicí pracoviště je zobrazeno na obr. 7.2. Vnější pohled na femtosekundový laser se poté nachází na obr. 7.3.



Obr. 7.2: Měřicí pracoviště



Obr. 7.3: Měřící pracoviště FemtoLab

7.2 Jednotlivé testy

V této části jsou uvedeny pokusy o zápis mřížek do materiálu. Cílem bylo zapsat funkční Braggovu mřížku do standardního telekomunikačního optického vlákna. Pro vyzkoušení činnosti laseru bylo nejdříve zvoleno sklo, na kterém byly zjištěny parametry pro správné nastavení laseru a pro jeho správné ostření na materiál. Testování na tomto planárním vzorku usnadnilo zkoumání možností a vlastností laseru, protože na rovnou plochu se zaostří mnohem lépe.

7.2.1 Planární technologie

Jako první vzorek pro zapisování mřížky bylo zvoleno sklíčko z SiO_2 , které mělo tloušťku 2 mm. První pokus byl vyzkoušen na planární technologii záměrně, protože rovný povrch skla je možné lépe zaostřit. Vytváření struktur do optických vláken je mnohem složitější vlivem jejich cylindrickému povrchu.

Cílem tohoto pokusu bylo vytvoření Braggovy mřížky do objemu materiálu.

Vyžadovalo to několik zkušebních testů pro správné zaostření laserového paprsku na daný bod ve vzorku.

Některé z provedených testů

Pro příklad nastavování a vytváření daných struktur je uvedeno několik testů, které byly provedeny. Jedná se pouze o několik vybraných testů s cílem znázornění, jak postupovalo přibližování se požadovanému výsledku. Těchto testů však bylo provedeno mnohem více, protože nebylo snadné najít správné hodnoty ostření a energie pulsu.

- **TEST 1 - Nastavení laseru a správné ostření na povrch materiálu**

V prvním testu byly nastavené hodnoty podle tab. 7.1. Hodnota atenuátoru byla snižována od hodnoty 100 % po hodnotu 10 %. Krok snižování byl nastaven po 10 %.

Parametr	Nastavená hodnota
Napájení oscilátoru	7.83 A
Proud	21 A
Výstupní výkon	3436 mW
Frekvence	100 kHz
Polarizace	0 °
Počet cyklů	2
Hloubka ostření	0,8 mm
Energie pulsu 1026 nm	38 μ J
Efektivita	50 %
Energie pulsu 513 nm	19 μ J

Tab. 7.1: Nastavení hodnot pro test č. 1

Výsledkem tohoto testu byly změny ve struktuře materiálu, ale energie byla zřejmě příliš vysoká a v daném vzorku se vytvořily dutiny. Poškození materiálu bylo viditelné.

Energii pulsu bylo zapotřebí při každé změně vstupního proudu přepočítat podle kalibračního grafu uvedeného v materiálech k danému laseru. Grafická závislost byla uvedena pouze pro hodnotu vlnové délky 1026 nm. Každý test byl prováděn při pracovní vlnové délce na druhé harmonické, které odpovídá 513 nm, proto bylo zapotřebí energii pulsu vypočítat. Vlnová délka 513 nm

má podle grafu určitou odpovídající hodnotu efektivity vlnové délky 1026 nm uvedenou v procentech.

Pro tento případ je energie pulsu $38 \mu\text{J}$ pro vlnovou délku 1026 nm. Efektivita vlnové délky 513 nm vůči vlnové délce 1026 nm je 50 %. Nyní je možné určit energii pulsu na vlnové délce 513 nm, která se vypočítá jako $38 \mu\text{J} \cdot 0,50 = 19 \mu\text{J}$.

- **TEST 2**

Ve druhém testu byla snížena hodnota proudu a tím samozřejmě také výstupního výkonu. Nastavené parametry pro tento test jsou zobrazeny v tab. 7.2. V tomto testu byla ponechána po celou dobu hodnota atenuátoru na 100 % energie pulsu. Ke změně došlo pouze v hodnotách hloubky ostření. Tento parametr byl snižován od hodnoty 0 mm do hodnoty 0,8 mm, s krokem 0,1 mm.

Parametr	Nastavená hodnota
Napájení oscilátoru	7.84 A
Proud	19 A
Výstupní výkon	2144 mW
Frekvence	100 kHz
Polarizace	0 °
Počet cyklů	2
Hodnota atenuátoru	100 %
Energie pulsu 1026 nm	20 μJ
Efektivita	39 %
Energie pulsu 513 nm	7,8 μJ

Tab. 7.2: Nastavení hodnot pro test č. 2

Výsledek tohoto testu prokázal, že ostření do hloubky 0,3 mm měl za následek zápis daného obrazce na povrch materiálu. Hloubka od hodnoty ostření 0,4 mm byla zapsána do objemu materiálu, avšak do daného vzorku se vytvářely stále dutiny.

- **TEST 3 - Zvyšování kontrastu Braggovy mřížky v materiálu**

V následujícím testu byla nastavena hodnota proudu na 20,5 A a hloubka na hodnotu 0,8 mm, jak je zobrazeno v tab. 7.3. Dále byla změněna hodnota

polarizace na $42,99^\circ$ a počet cyklů nastaven na hodnotu 8. Vyšším počtem cyklů by mělo být dosaženo dobrého kontrastu obrazce v objemu materiálu.

Parametr	Nastavená hodnota
Napájení oscilátoru	7.82 A
Proud	20,5 A
Výstupní výkon	3070 mW
Frekvence	100 kHz
Polarizace	$42,99^\circ$
Počet cyklů	8
Hodnota atenuátoru	100 %
Energie pulsu 1026 nm	$30 \mu\text{J}$
Efektivita	47,5 %
Energie pulsu 513 nm	$14,25 \mu\text{J}$

Tab. 7.3: Nastavení hodnot pro test č. 3

Tento test se zdál být již konečně úspěšný, protože daný obrazec byl zapsaný do objemu vzorku a vytvořil tak požadovanou strukturu změny indexu lomu v daném materiálu. Braggova mřížka byla výborně čitelná pod mikroskopem, ale stejně tak i pouhým okem při dobrém nasvícení a pootočení.

- **TEST 4**

Bylo provedeno ještě několik testů pro zlepšení kontrastu obrazce v materiálu, protože dosud nebylo docíleno, aby byl dobře čitelný. Počet cyklů byl navýšen na hodnotu 20 opakování a hodnota energie pulsu byla snížena na 16,8 A. Ostatní parametry byly nastaveny dle tab. 7.4.

Výsledkem tohoto testu byl obrazec zapsaný do objemu materiálu podle očekávání. Kontrast byl na velmi dobré úrovni a dalo by se konstatovat, že počet opakování má velký vliv na kontrast dané mřížky. V pokračování pokusu byl tedy tento počet opakování nastaven na 30 cyklů. Tímto bylo ověřeno, že počet opakování značně zlepšuje kontrast dané mřížky zapsané do materiálu.

Parametr	Nastavená hodnota
Napájení oscilátoru	7.84 A
Proud	16,8 A
Výstupní výkon	1011 mW
Frekvence	100 kHz
Polarizace	42,99 °
Počet cyklů	20
Hodnota atenuátoru	100 %
Energie pulsu 1026 nm	8 μ J
Efektivita	20 %
Energie pulsu 513 nm	1,6 μ J

Tab. 7.4: Nastavení hodnot pro test č. 4



Obr. 7.4: Braggova mřížka zapsaná do planárního vzorku

- **TEST 5 - Porovnání struktury v závislosti na změně energie pulsu a změně počtu cyklů**

V tomto pokusu byly provedeny dvě sady testování. Nejprve byla snižována energie pulsu pomocí atenuátoru z hodnoty 100 % na hodnotu 10 % při dvou cyklech opakování. Druhá sada byla vytvořena pomocí snižování energie opět ze 100 % na 10 %, ale při hodnotě počtu opakování nastavené na 12 cyklů. Cílem bylo ověřit, zda vyšší počet cyklů při nízké energii pulsu má větší kon-

trast než malý počet cyklů s velkou energií. Parametry laseru byly nastaveny podle tab. 7.5, sady se liší pouze v hodnotě počtu opakovacích cyklů.

Parametr	Nastavená hodnota
Napájení oscilátoru	7.84 A
Proud	19 A
Výstupní výkon	2141 mW
Frekvence	100 kHz
Polarizace	0 °
Počet cyklů	2/12
Hodnota atenuátoru	100 %-10 %
Energie pulsu 1026 nm	20 μ J
Efektivita	39 %
Energie pulsu 513 nm	7,8 μ J

Tab. 7.5: Nastavení hodnot pro test č. 5 - změna pulsu a změna počtu cyklů

Výsledek:

Při hodnotě opakování nastavené na 2 cykly byla mřížka vcelku dobře viditelná, ale s postupným snižováním energie pulsu pomocí atenuátoru již viditelnost značně klesala a při 10 % energie již téměř nebyla viditelná. Pokud je nastavena hodnota opakování na 12 cyklů, daný obrazec je v objemu materiálu výborně vidět a má skvělý kontrast. Se snižováním energie dochází ke zhoršení kontrastu, ale pouze minimálně.

Zvýšení počtu opakovacích cyklů má za následek daleko vyšší kontrast. Při takto nastavených parametrech laseru podle tab. 7.5 je zřejmé, že vyšší počet cyklů s energií pouhých 10 % je téměř na srovnatelné úrovni jako při nižších cyklech a nastavené energii na hodnotu 70 %.

- **TEST 6 - Snižování velikosti mezery**

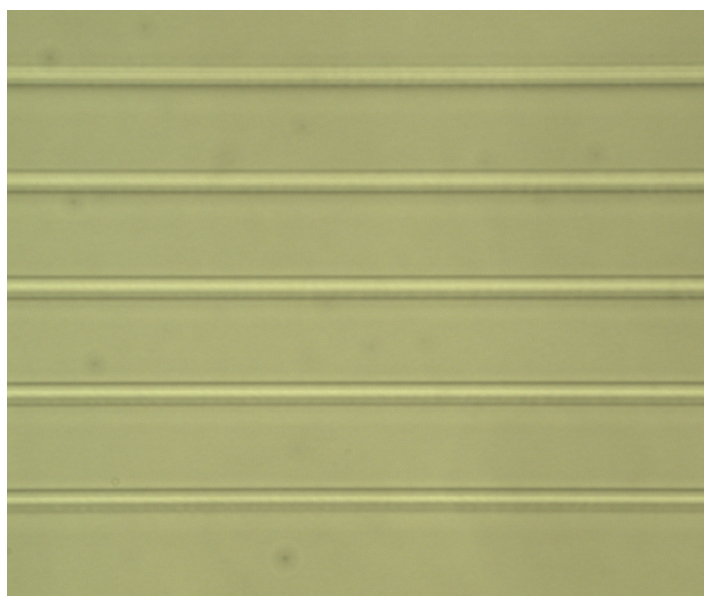
V dalším testu bylo zapotřebí zjistit, na jakou nejmenší hodnotu lze snižovat mezeru mezi jednotlivými čarami mřížky, aby byla ještě funkční. Při velkém snížení mezery pod určitou mez by již mělo dojít ke slití čar do jedné a mřížka by se měla deformovat.

Změna velikosti mezery od hodnoty 8 μ m do hodnoty 1 μ m s krokem 1 μ m.

Ostatní parametry laseru jsou nastaveny podle tab. 7.6.

Parametr	Nastavená hodnota
Napájení oscilátoru	7.84 A
Proud	19 A
Výstupní výkon	2142 mW
Frekvence	100 kHz
Polarizace	0°
Počet cyklů	12
Hodnota atenuátoru	100 %
Energie pulsu 1026 nm	20 μ J
Efektivita	39 %
Energie pulsu 513 nm	7,8 μ J

Tab. 7.6: Nastavení hodnot pro test č. 6 - snižování velikosti mezery



Obr. 7.5: Snižování velikosti mezery - slitá struktura Braggovy mřížky

Výsledek:

Zmenšování mezery mezi jednotlivými čarami mřížky lze provádět až na hodnotu $3 \mu\text{m}$. Při této hodnotě ještě stále docházelo k difrakci a mřížka byla funkční. Od hodnoty velikosti mezery $2 \mu\text{m}$ již nedocházelo k viditelné difrakci v daném materiálu. Pouhým okem byly vidět pouze čáry, ale difrakce už viditelná nebyla. Pod mikroskopem byly tyto čáry vidět jako slité v jednu jedinou.

- **TEST 7 - Snižování hodnoty energie pulsu pod prahovou hodnotu**

V tomto testu byla snižována hodnota energie pulsu až k podprahové hodnotě, tzv. thresholdu. Pod touto prahovou hodnotou by již neměla vznikat viditelná difrakce v materiálu. Energie pulsu by měla být natolik malá, že již žádnou strukturu nevytváří a nemění index lomu vzorku. Zjištění nejmenší hodnoty energie pulsu, která ještě vytváří změnu indexu lomu v materiálu, je velmi důležité. Tato nejmenší hodnota má také nejužší svazek a tím vytváří tenké čáry Braggových mřížek, které mohou být menší a lépe aplikovatelné do optických vláken. Nastavení parametrů laseru pro tento test bylo podle tab. 7.7. Hodnota energie byla snižována od 100 % do 10 %. Nejnižší hodnota energie pulsu byla tedy $0,21 \mu\text{J}$.

Parametr	Nastavená hodnota
Napájení oscilátoru	7.84 A
Proud	17 A
Výstupní výkon	1098 mW
Frekvence	100 kHz
Polarizace	0°
Počet cyklů	12
Hodnota atenuátoru	100 %-10 %
Energie pulsu 1026 nm	$10 \mu\text{J}$
Efektivita	21 %
Energie pulsu 513 nm	$2,1 \mu\text{J}$

Tab. 7.7: Nastavení hodnot pro test č. 7 - snižování hodnoty energie pulsu

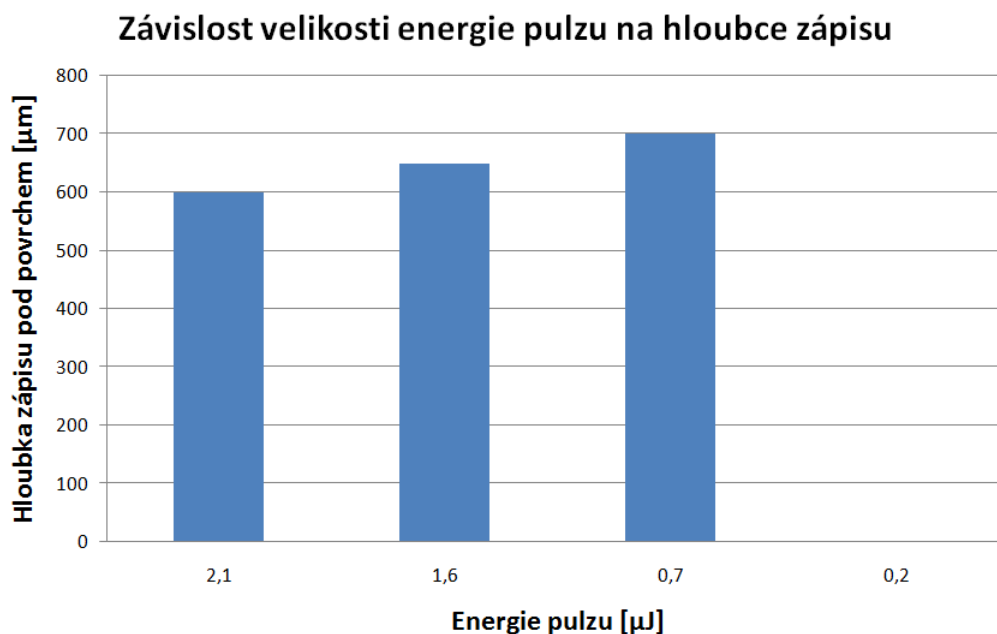
Výsledek:

Při testování snižování hodnoty energie pulsu bylo zjištěno, že laser již při menší hodnotě než $0,5 \mu\text{J}$ nevytváří v daném vzorku žádnou strukturu se změnou indexu lomu. Braggovu mřížku zapisuje do materiálu pouze do hodnoty $0,6 \mu\text{J}$. Následně byla zkoumána reálná hloubka zapsaného obrazce v materiálu. Nastavená hodnota ostření na laseru tak neodpovídá přesně skutečné hodnotě hloubky zapsaného obrazce. Nejvíce se této požadované hodnotě hloubky ostření přibližuje právě energie pulsu $0,6 \mu\text{J}$. Reálná hloubka se od požadované hloubky zadané v systému laseru liší o $100 \mu\text{m}$. Při tomto testu bylo dále zjištěno, že vytváření mřížek s větší energií pulsu je zapsáno do menší hloubky, než je tomu u vytváření mřížek s menší energií pulsu. Tato vlastnost je dána kratší vzdáleností impulsu s větší energií k překonání prahové hodnoty a vy-

tvoření následné změny indexu lomu. Tento impuls s větší energií bude mít také širší stopu zápisu. Závislost velikosti energie pulsu na hloubku zápisu je zobrazena na obr. 7.6.

Energie pulsu	Hloubka zápisu Braggovy mřížky pod povrch
2,1 μJ	600 μm
1,6 μJ	650 μm
0,7 μJ	700 μm
0,2 μJ	Mřížka již není vidět

Tab. 7.8: Vliv energie pulsu na hloubku zápisu



Obr. 7.6: Závislost velikosti energie pulsu na hloubce zápisu pod povrchem

- **TEST 8 - Křížení Braggových mřížek**

Mřížky je možné do planární technologie zapisovat i přes sebe do kříže. V tomto testu bylo zkoumáno, jak by taková struktura mohla vypadat a jaké

by měla vlastnosti. Parametry laseru byly nastaveny obdobně jako v testu při zmenšení velikosti mezery v tab. 7.7 předchozího testu.



Obr. 7.7: Křížení Braggových mřížek

Výsledek:

Braggovy mřížky byly zapsány kolmo přes sebe, jak je zobrazeno na obr. 7.7. Obrázek je zachycen mikroskopem a daná struktura se nachází 600 μm pod povrchem vzorku. Spojí, kde se obě mřížky kříží, se zdají být světlejší.

- **TEST 9 - Snižování hloubky ostření**

V tomto testu bylo zkoumáno, do jaké nejmenší hloubky může laser zapisovat danou strukturu při postupném snižování hloubky ostření pulsu do materiálu s nastavenou hodnotou proudu 16 A. Tato hodnota byla vybrána záměrně, protože vykazuje nejmenší odchylku mezi zadanou hloubkou zápisu v systému laseru a hodnotou skutečného zápisu do materiálu. Ostatní parametry laseru nastaveny podle tab. 7.9.

Hodnoty hloubky ostření laserového paprsku a odpovídající změřené skutečné hodnoty hloubky struktury v materiálu jsou zobrazeny v tab. 7.10.

Parametr	Nastavená hodnota
Napájení oscilátoru	7.84 A
Proud	16 A
Výstupní výkon	720 mW
Frekvence	100 kHz
Polarizace	0 °
Počet cyklů	12
Hodnota atenuátoru	100 %
Energie pulsu 1026 nm	5 μ J
Efektivita	12 %
Energie pulsu 513 nm	0,6 μ J

Tab. 7.9: Nastavení hodnot pro test č. 9 - snižování hloubky ostření pulsu

Požadovaná hodnota hloubky	Skutečná hodnota hloubky zápisu změřená mikroskopem
800 μ m	700 μ m
700 μ m	600 μ m
650 μ m	550 μ m
600 μ m	500 μ m
550 μ m	450 μ m
500 μ m	400 μ m
450 μ m	350 μ m
400 μ m	300 μ m
350 μ m	250 μ m
300 μ m	200 μ m
250 μ m	150 μ m
200 μ m	100 μ m
150 μ m	50 μ m
100 μ m	35 μ m
90 μ m	20 μ m

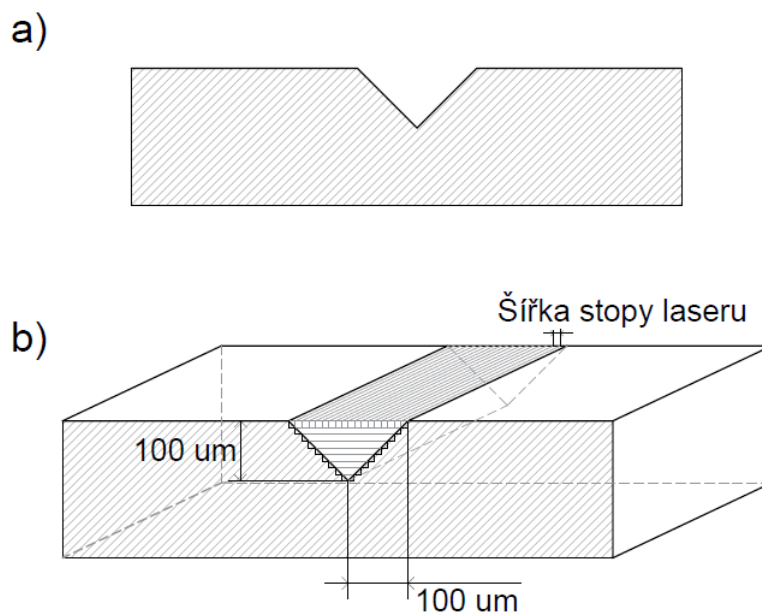
Tab. 7.10: Nastavené hodnoty hloubky laserem a změřené hodnoty hloubky mikroskopem

Výsledek:

Z tab. 7.10 je zřejmé, že lze Braggovu mřížku zapsat do různé hloubky materiálu. Podle tohoto provedeného testu je možné vytvořit mřížku pouhých $20\ \mu\text{m}$ pod povrchem vzorku.

7.2.2 Vytváření „V“ drážky

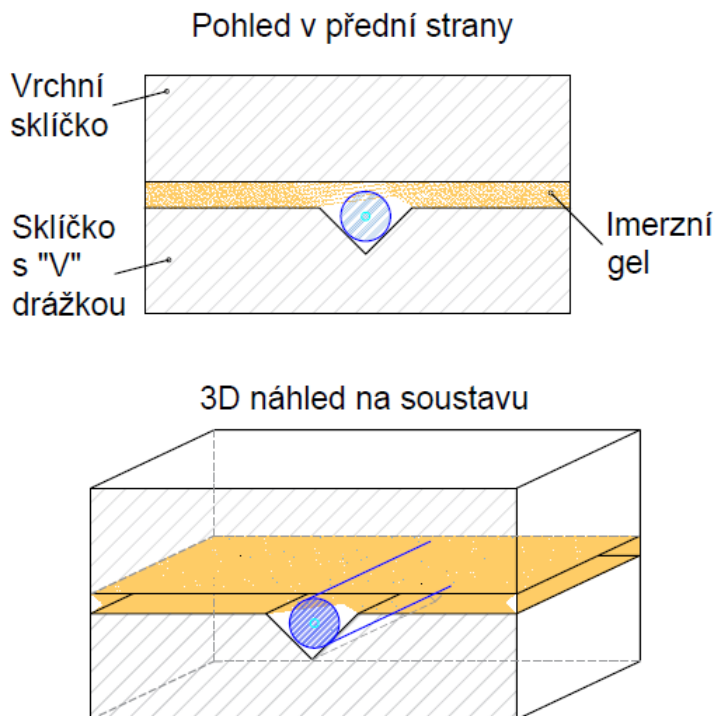
Dalším krokem byla výroba držáku pro uchycení optického vlákna. Tento přípravek byl vytvořen ze vzorku skla a byla do něj vypálena drážka pomocí femtosekundového laseru. Drážka tvaru písmene „V“ byla nejdůležitější pro celé pozdější zapisování mřížek do vláken. Drážka je zobrazena na obr. 7.8 a). Druhé schematické zobrazení ukazuje, jak vypadá reálné vytváření drážky. Bylo nutné zjistit šířku stopy jedné čáry a poté vhodně rozvrhnout mezery, aby femtosekundový laser obráběl celý požadovaný povrch. Dále se musela určit hloubka vytvořené jedné čáry. Od této hloubky čáry se následně odvíjel také krok přístření, po kterém laser přechází do hloubky. Skutečná podoba drážky byla schodkovitého tvaru a výška schodků záležela na hloubce zapisování jednotlivých čar.



Obr. 7.8: a) Teoreticky navržená „V“ drážka, b) průběh vytváření drážky

Po vytvoření této drážky byl zkompletován přípravek pro držení vlákna, který se skládal ze dvou sklíček. Spodní sklíčko mělo vytvořenou drážku pro vlákno, vrchní sklíčko bylo bez této drážky. Nejdůležitějším krokem při zapisování Braggových mřížek do vláken bylo správně zaostřit jádro vlákna, do kterého měla být mřížka vepsána. Díky cylindrickému tvaru vláken nebylo ostření vůbec jednoduché, proto

bylo vlákno vloženo mezi předpřipravené skleněné destičky, kde v jedné byla drážka. Pro vyrovnání cylindrického tvaru vláken byl mezi tyto sklíčka nanesen imerzní gel. Navržený aparát pro uchycení vlákna je zobrazen na obr. 7.9.



Obr. 7.9: Schematické zobrazení soustavy držení vlákna pro zápis Braggovy mřížky

7.2.3 Zápis Braggové mřížky do optického vlákna

Po vyzkoušení činnosti laseru a zápisu struktur do planárních vzorků bylo možné přejít k samotnému zápisu Braggových mřížek do optických vláken, na kterých byly uplatněny veškeré dosud zjištěné poznatky a mezní parametry laseru.

Bylo provedeno několik pokusů o zápis mřížky do vlákna. Ze začátku byly testy neúspěšné, protože ostření na jádro optického vlákna bylo ztíženo nepřesným rozlišením monitoru. Přiblížení na jádro bylo již příliš veliké a obraz byl málo čitelný. Po těchto neúspěšných pokusech o správné zaostření se nakonec dostavily výsledky a do vláken byly zapsány první Braggovy mřížky. Z počátku se dařilo zapisovat mřížky s velmi malou odrazivostí, která se pohybovala pouze kolem 5 dB. Z toho důvodu byl zkoumán vliv různých parametrů, které by mohly odrazivost mřížek zvýšit. Mezi tyto parametry patřily např. změna hustoty pulsů, délka zapsané mřížky, energie pulsu a zvětšení prostorové periody.

- **TEST 1 - Zvýšení hustoty pulsů**

Pro příklad je možné uvést nastavené parametry laseru, při kterých se podařilo zapsat mřížku s relativně dobrou odrazivostí. Hodnoty byly nastaveny podle tab. 7.11. Oproti předchozím pokusům, kdy byla zapisována mřížka s odrazivostí pouhých 5 dB, byla zvýšena hustota pulsů.

Parametr	Nastavená hodnota
Proud oscilátoru	23 A
Frekvence	600 kHz
Vlnová délka	515 nm
Atenuátor	100 %
Polarizace	42 °
Prostorová perioda	8,5617 μm
Hloubka ostření	70 μm
Rychlost zápisu	59 mm/s
Délka mřížky	8,5617 mm
Hustota pulsů	10 000 pulsů/mm

Tab. 7.11: Nastavení hodnot pro test č. 1 - zápis mřížek do vláken

Z pokusů zápisu na planární vzorky byla zjištěna šířka stopy jedné čáry, která se pohybovala kolem 3,5 μm . Hodnota prostorové periody byla zvolena záměrně vyšší a to 8,5617 μm . Byla vypočítána podle vzorce 7.1,

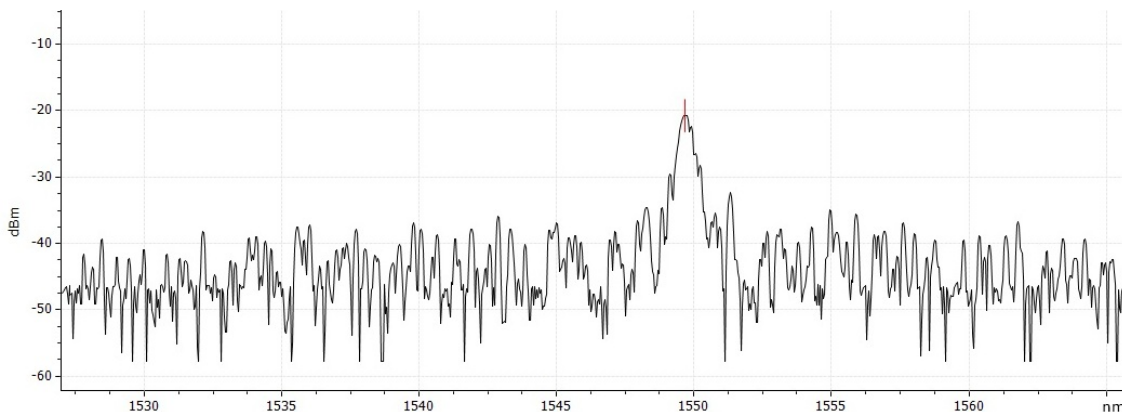
$$\Lambda = \frac{\lambda_B * N}{2 * n_{eff}} \quad (7.1)$$

kde Λ je prostorová perioda mřížky, λ_B centrální vlnová délka, N značí řád vláknové mřížky a jedná se o celé číslo, n_{eff} udává efektivní vidový index.

Pro příklad si můžeme uvést výpočet prostorové periody pro centrální vlnovou délku 1550 nm a 12. řád mřížky.

$$\Lambda = \frac{\lambda_B * N}{2 * n_{eff}} = \frac{1,550 \mu\text{m} * 12}{2 * 1,4483} = 8,5617 \mu\text{m}$$

Od počátku zápisu mřížky se objevoval dominantní vrchol sledovaný v odraženém spektru pomocí optického spektrálního analyzátoru. Jeho hodnota postupně vystoupala až na 20,74 dB a tento vrchol dosáhl dosud nejvyšší hodnoty, viz obr. 7.10.



Obr. 7.10: Odražené spektrum zapsané Braggovy mřížky

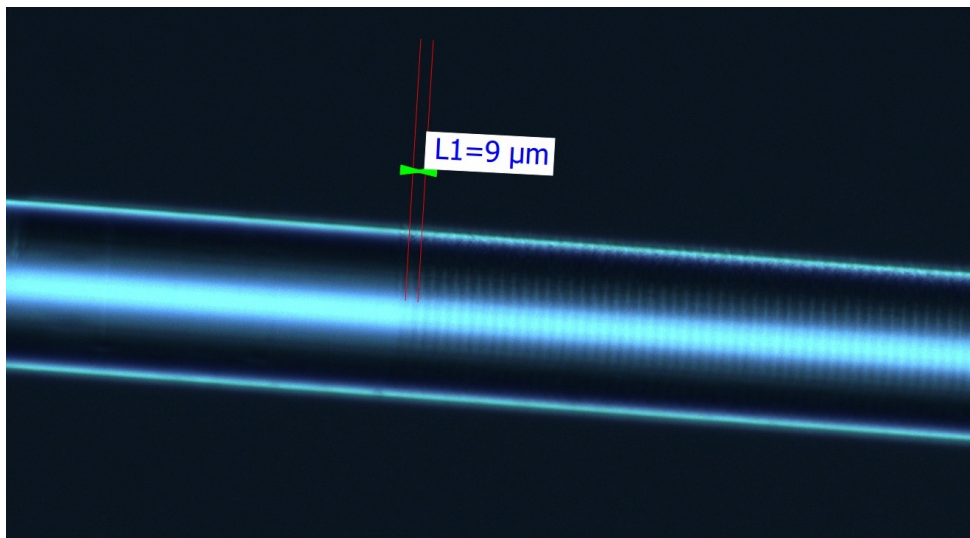
Po svaření druhého konce vlákna k pigtailu a připojení senzoru na optický spektrální analyzátor v průchodu byla zřejmá relativně dobrá odrazivost pohybující se kolem hodnoty 18 dB a vstupní útlum s hodnotou 1,8 dB, viz obr. 7.11.



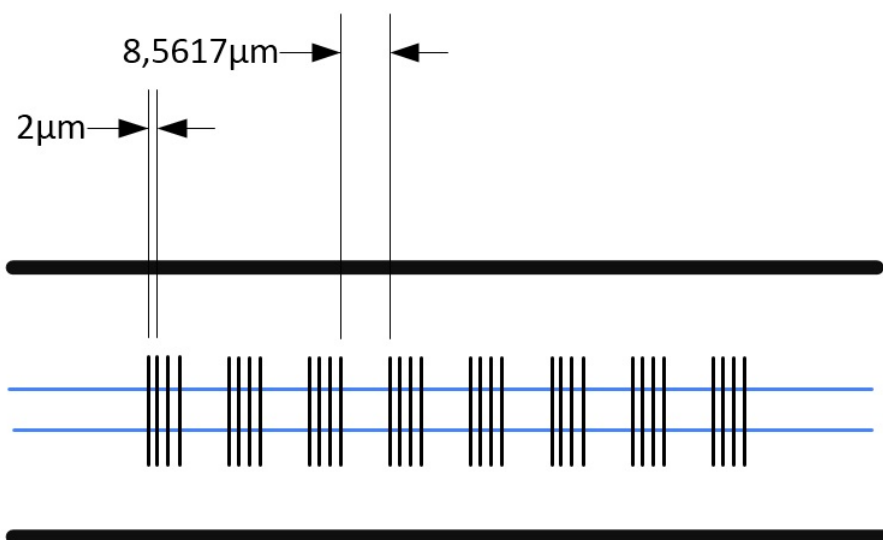
Obr. 7.11: Spektrum v průchodu zapsané Braggovy mřížky

Pod mikroskopem byly zkoumány indexové změny optického vlákna se zapsanou strukturou. Jak je vidět z obr. 7.12, Braggova mřížka je v optickém vlákne velmi zřetelná a prostorová perioda odpovídá zadané hodnotě v programu femtosekundového laseru. Je zřejmé, že se jedná o mřížku s nerovnoměrným rozložením změn indexu lomu, protože vytvořená indexová změna je přibližně $1 \mu\text{m}$, zatímco prostorová perioda má hodnotu $8,5617 \mu\text{m}$.

Tato vlastnost by šla velice jednoduše změnit metodou dvou period, ve které by byly zapisovány čáry nejprve s velmi malou periodou vedle sebe a tím by se vytvořila širší změna indexu lomu. Následně by se laser posunul o periodu např. $8,5617\mu\text{m}$, tato hodnota by odpovídala periodě mřížky. Metoda dvou period je teoreticky znázorněna na obr. 7.13.



Obr. 7.12: Zapsaná Braggova mřížka v optickém vlákně



Obr. 7.13: Metoda dvou period

- **TEST 2 - Zjištění, zda dokážeme zapsat mřížku vždy se stejnými parametry**

Tato vlastnost byla zkoumána a není pozitivní. Očekáváním bylo, že hodnoty útlumu v odraženém spektru budou hodně podobné a budou se lišit maximálně v desetínách dB. Z provedených pokusů však bylo zjištěno, že ačkoliv byla mřížka zapisována podle úplně stejných parametrů nastavených v ovládacím programu laseru, hodnota útlumu byla odlišná o zhruba ± 2 dB.

Vliv na tuto vlastnost mohl mít např. držák optického vlákna, který po opětovném vložení do stanice FemtoLab nemusel být položen na porézni kámen rovně. Další příčinou je nepřesné natočení držáku s vláknem vůči osám, kdy vlákno může být pod určitým úhlem a již se nezapisovala mřížka úplně shodně s předchozí. Řešením by mohlo být dokoupení stabilních držáků vlákna a upevnění přímo na pohyblivý stůl, aby se vlákno vkládalo pouze mezi příchytky a držák by se nemusel vytahovat.

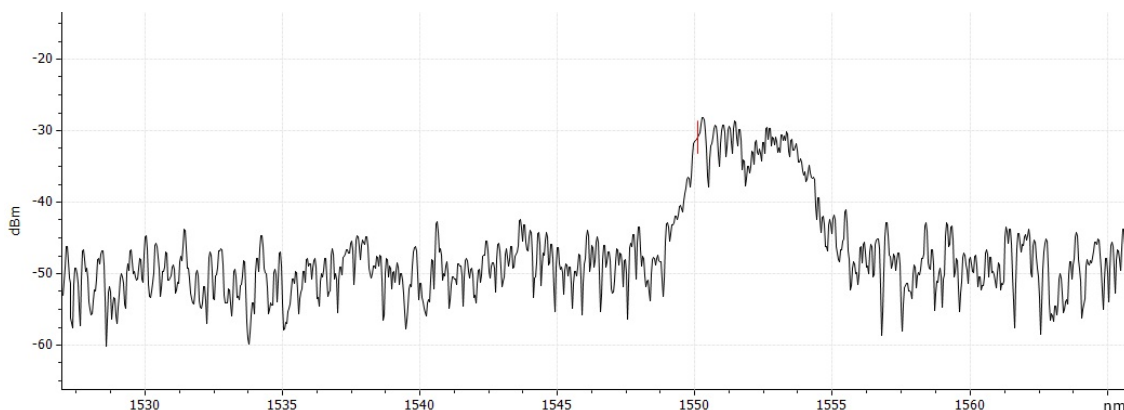
- **TEST 3 - Posun ve spektru**

V tomto testu byl zkoumán posun mřížky ve spektru. Tato vlastnost byla sledována pomocí optického spektrálního analyzátoru. Výsledkem tohoto pokusu byl posun pouze pomocí změny prostorové periody mřížky, která byla přepočítána pro požadovanou vlnovou délku, kam se měla přemístit. Vlnová délka vláknové mřížky se změnila vždy s přesností na desetiny nm.

- **TEST 4 - Chirpování Braggovy mřížky**

Chirpování vláknové mřížky, u které se mění prostorová perioda mřížky, lze provádět pomocí femtosekundového laseru dvěma způsoby. Prvním je lineární změna periody. Tato metoda je závislá na rozlišení posuvného stolku, které je v tomto případě 3 nm.

Druhý způsob pro vytváření těchto mřížek je pomocí skokové změny periody, kdy zapisujeme určitou dobu mřížku s jednou periodou, poté skokově změníme periodu a zapisujeme další část mřížky s touto roztečí čar. Výhodou u této metody je, že není nutné hledět na rozlišení stolku jako u lineární změny prostorové periody. Na obr. 7.14 je vidět odražené spektrum chirpované mřížky.



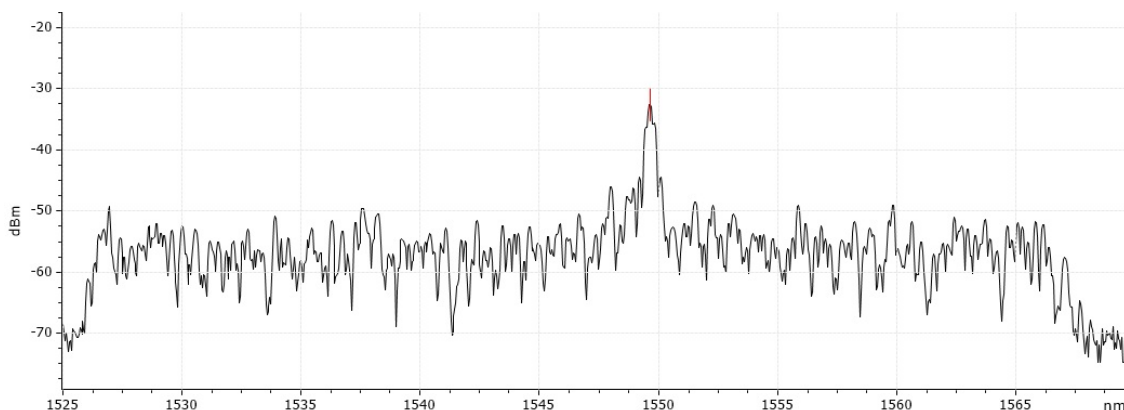
Obr. 7.14: Odražené spektrum chirpované Braggovy mřížky

• **TEST 5 - Vytvoření 4 mřížek se stejnými parametry pro měření vlastností při změně teploty a v tahu**

Pro měření vlastností vláknových mřížek vytvářených zápisem pomocí femtosekundového laseru bylo zapotřebí vytvořit Braggovy mřížky do čtyř optických vláken. Parametry pro zápis mřížek byly nastaveny podle tab. 7.12 a pro všechna vlákna byly tyto parametry shodné. Na obr. 7.15 je znázorněno odražené spektrum jedné z vytvořených mřížek do optického vlákna podle takto zadaných parametrů.

Parametr	Nastavená hodnota
Proud oscilátoru	23 A
Frekvence	600 kHz
Vlnová délka	515 nm
Atenuátor	100 %
Polarizace	42°
Prostorová perioda	6,4213 μm
Hloubka ostření	60 μm
Rychlost zápisu	59 mm/s
Délka mřížky	6,4213 mm
Hustota pulsů	10 000 pulsů/mm

Tab. 7.12: Nastavení hodnot pro test č. 5



Obr. 7.15: Odražené spektrum Braggovy mřížky

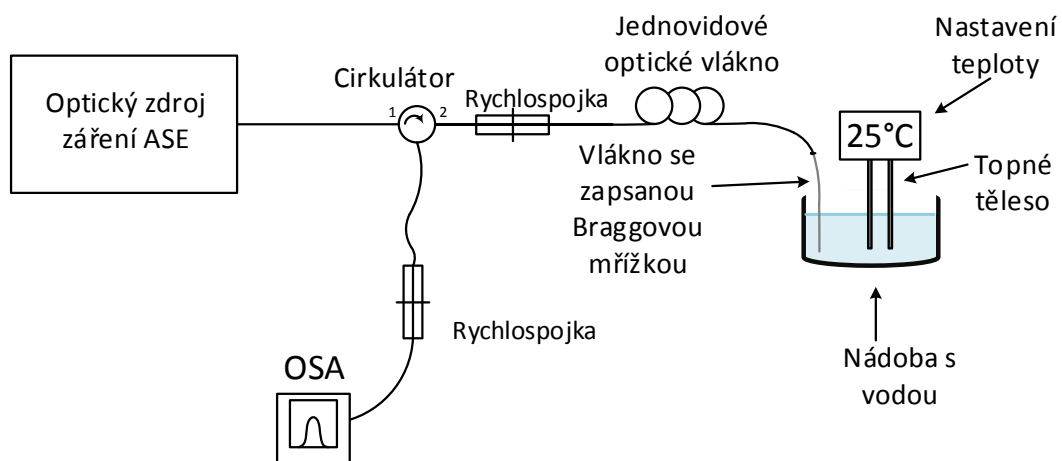
7.3 Výsledky měření vlastností zapsané mřížky

V této části diplomové práce jsou uvedeny výsledky měření na vytvořených vláknových mřížkách. Byly měřeny jejich vlastnosti při různých teplotách a také v tahu, kdy bylo vlákno napínáno piezoelektrickým posuvem a zatížení bylo měřeno pomocí tenzometru.

7.3.1 Měření změny vlnové délky vytvořených Braggových mřížek v závislosti na teplotě

Pro první měření vlastností senzorů byly vytvořeny 4 vláknové mřížky do standardního telekomunikačního optického vlákna. Všechny mřížky byly zapsány se stejnými parametry podle tab. 7.12 uvedené výše v testu 5 na optických vláknech. Takto vytvořené senzory byly vloženy do ochranné trubičky z pryže, protože ve vodní lázni pro měření teploty proudí voda a bez ochrany by se vlákna mohla přetrhat. Teplotní lázeň byla použita z důvodu přesného nastavení teplot, tato přesnost se pohybuje kolem hodnoty $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro každé vlákno s vytvořenou Braggovou mřížkou byla odečítána vlnová délka pomocí optického spektrálního analyzátoru EXFO FTB-2-PRO a současně byla měněna teplota vody v nádobě vždy po $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po každé změně teploty bylo ponecháno 15 minut na ustálení teploty. Vlnová délka se podle předpokladu měla měnit o přibližně $9,5\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ a v našem případě poté teoreticky o $47,5\text{ pm}$, protože měníme hodnotu teploty o $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na obr. 7.16 je znázorněno schéma měřícího pracoviště pro odečítání vlnové délky v závislosti na změně teploty.

Obr. 7.18 ukazuje naměřené hodnoty pro všechny čtyři senzory, které se podrobily testu ve vodní lázni, a jim odpovídající vlnové délky při změně teploty. Na obr. 7.19 je znázorněna závislost vlnové délky na této změně teploty a z obrázku je zřejmé, že změna je téměř lineární.



Obr. 7.16: Schématické zobrazení pracoviště pro měření vlastností mřížek při změně teploty

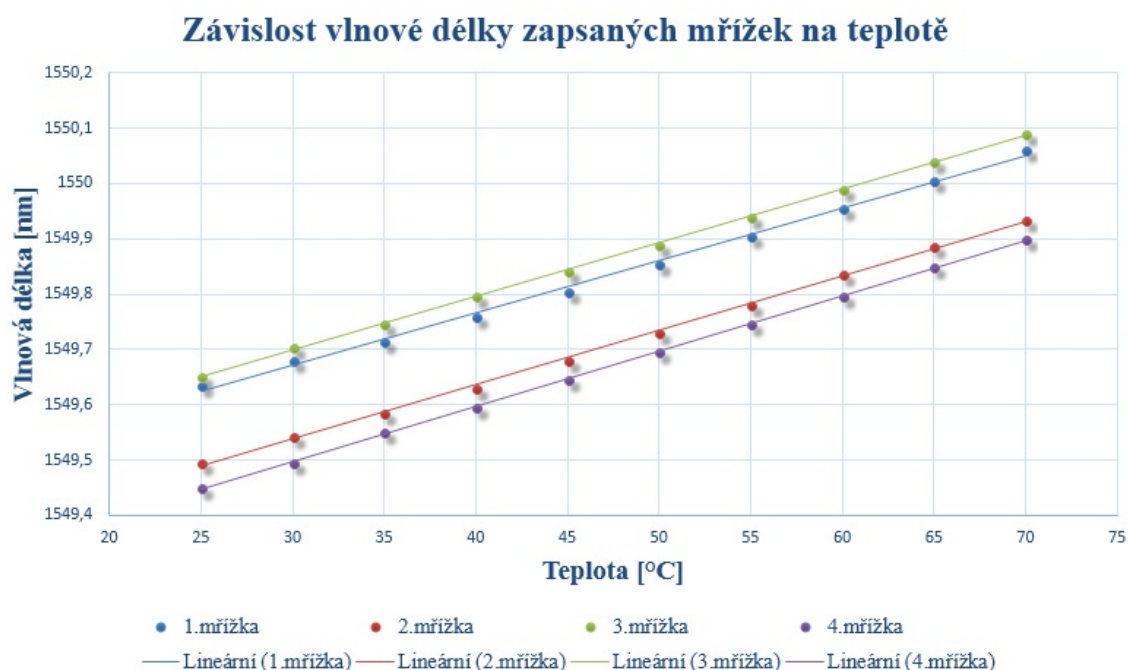


Obr. 7.17: Ohřívač vody s termostatem [20]

Z naměřených hodnot je patrné, že změna vlnové délky při reálném měření je velice blízko k teoretické hodnotě. Skutečná změna vlnové délky je v rozmezí 45 – 60 pm/5 °C.

Teplota [°C]	Vlnová délka [nm]			
	1. mřížka	2. mřížka	3. mřížka	4. mřížka
25	1549,636	1549,496	1549,650	1549,450
30	1549,680	1549,542	1549,705	1549,495
35	1549,715	1549,585	1549,745	1549,550
40	1549,760	1549,630	1549,795	1549,595
45	1549,805	1549,680	1549,840	1549,645
50	1549,855	1549,730	1549,890	1549,695
55	1549,905	1549,780	1549,940	1549,745
60	1549,955	1549,835	1549,990	1549,795
65	1550,005	1549,885	1550,040	1549,850
70	1550,060	1549,935	1550,090	1549,900

Obr. 7.18: Nastavení teploty a odečítání vlnové délky zapsaných mřížek

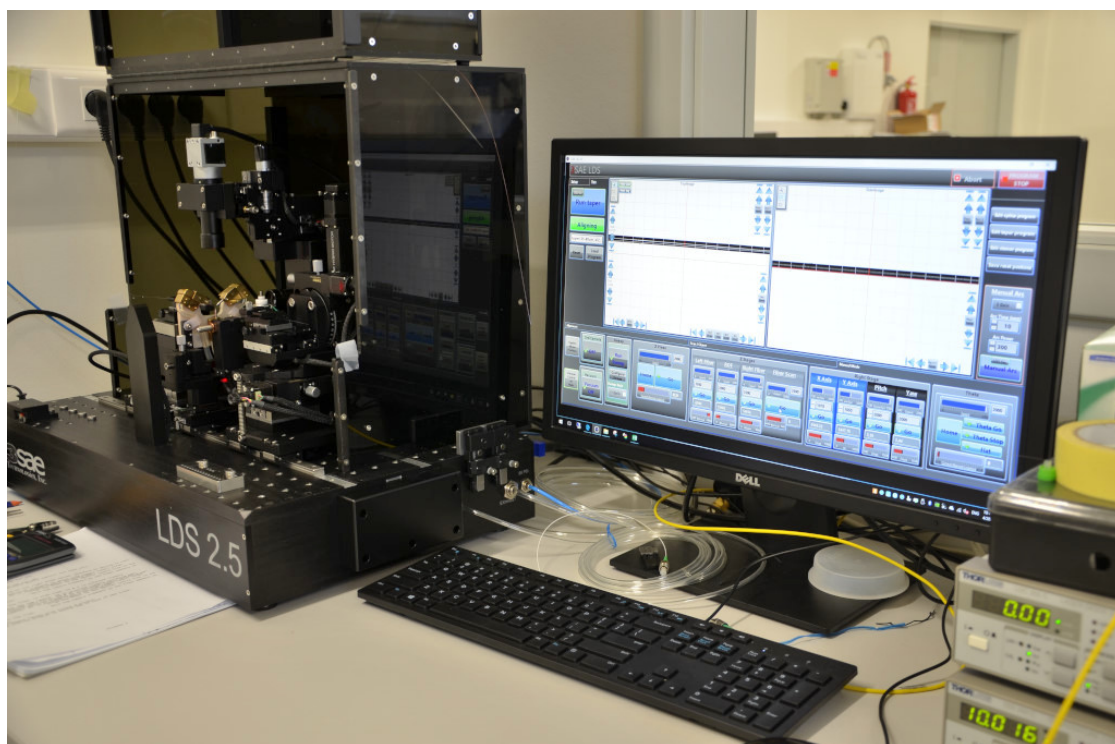


Obr. 7.19: Závislost vlnové délky zapsaných mřížek na teplotě

7.3.2 Měření změny vlnové délky a mechanického napětí zapsaných mřížek v závislosti na tahu

V tomto testu byl využit jeden senzor z předchozího měření teploty a bylo zjišťováno, zda dochází ke změně vlnové délky a mechanického napětí v závislosti na natažení

vlákna u vytvořené Braggovy mřížky. Vlákno bylo testováno pomocí stanice LDS 2.5 (Laser Diameter Splicing System), která umožňuje svařování různých typů vláken, tapering a mnoho dalšího. Pro toto měření bylo nejdůležitější, že stanice disponuje velice přesným integrovaným piezoelektrickým posuvem, který dokázal vlákno natahovat s přesností $0,25 \mu\text{m}$. Další velice podstatnou součástí tohoto systému byl tenzometr umožňující měření mechanického napětí vlákna.



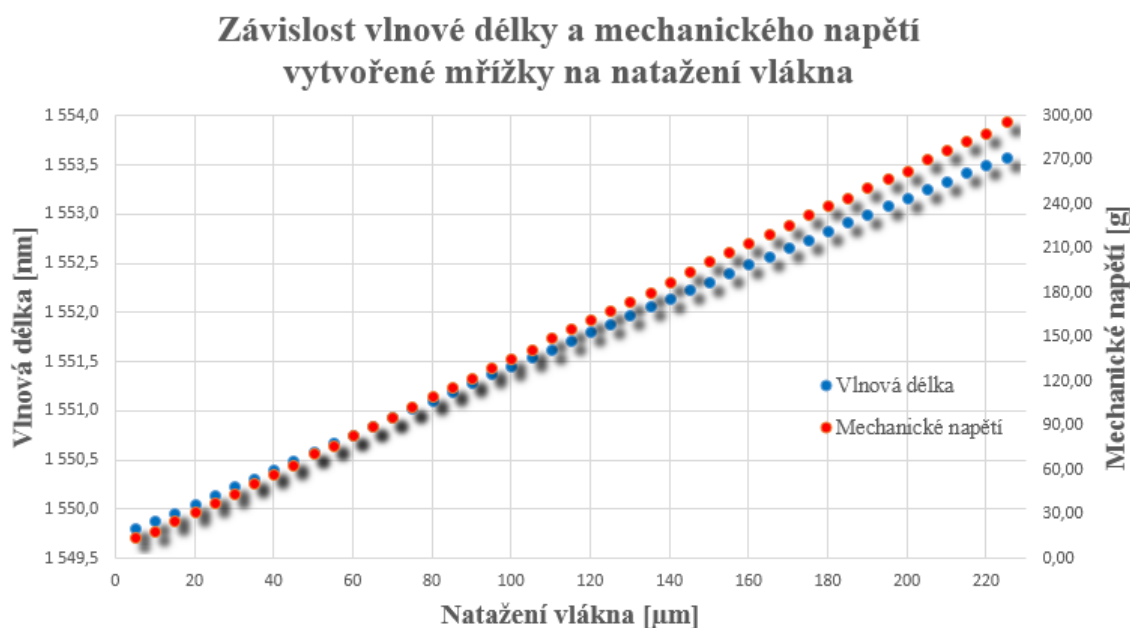
Obr. 7.20: Stanice LDS 2.5 firmy NETWORK GROUP s.r.o. [21]

Testovací vlákno bylo ve stanici LDS upevněno pomocí držáků optických vláken. Na jedné straně uchyceného vlákna se nacházel tenzometr a na druhé straně piezoelektrický posuv. Senzor byl připojen na větev cirkulátoru a následně na optický zdroj ASE. Druhá větev cirkulátoru byla napojena na optický spektrální analyzátor, na jehož obrazovce byla odečítána hodnota měnící se vlnové délky mřížky. Hodnota natažení optického vlákna byla zvyšována po kroku $5 \mu\text{m}$ a při každé této změně bylo změřeno mechanické napětí a sledována změněná vlnová délka. Na obr. 7.21 je zaznamenána tabulka s naměřenými a vypočítanými hodnotami.

Natažení vlákna [μm]	Vlnová délka [nm]	Mechanické napětí [g]	Napětí [με]	Změna vlnové délky [pm]	Čitlivost v tahu [pm/με]
5	1 549,810	14,21	57,11	15,00	0,26
10	1 549,880	18,18	114,21	85,00	0,74
15	1 549,965	25,57	171,32	170,00	0,99
20	1 550,050	31,25	228,43	255,00	1,12
25	1 550,140	37,50	285,53	345,00	1,21
30	1 550,230	43,75	342,64	435,00	1,27
35	1 550,315	50,57	399,75	520,00	1,30
40	1 550,410	57,39	456,86	615,00	1,35
45	1 550,495	63,64	513,96	700,00	1,36
50	1 550,585	71,59	571,07	790,00	1,38
55	1 550,670	76,71	628,18	875,00	1,39
60	1 550,760	83,52	685,28	965,00	1,41
65	1 550,850	89,77	742,39	1055,00	1,42
70	1 550,935	96,02	799,50	1140,00	1,43
75	1 551,025	103,41	856,60	1230,00	1,44
80	1 551,110	110,23	913,71	1315,00	1,44
85	1 551,200	116,48	970,82	1405,00	1,45
90	1 551,285	122,16	1027,93	1490,00	1,45
95	1 551,375	129,55	1085,03	1580,00	1,46
100	1 551,460	135,80	1142,14	1665,00	1,46
105	1 551,545	142,05	1199,25	1750,00	1,46
110	1 551,630	149,43	1256,35	1835,00	1,46
115	1 551,720	155,68	1313,46	1925,00	1,47
120	1 551,805	161,93	1370,57	2010,00	1,47
125	1 551,890	167,61	1427,67	2095,00	1,47
130	1 551,975	174,43	1484,78	2180,00	1,47
135	1 552,060	180,68	1541,89	2265,00	1,47
140	1 552,150	187,50	1598,99	2355,00	1,47
145	1 552,230	194,32	1656,10	2435,00	1,47
150	1 552,315	201,14	1713,21	2520,00	1,47
155	1 552,405	207,39	1770,32	2610,00	1,47
160	1 552,490	213,64	1827,42	2695,00	1,47
165	1 552,575	219,89	1884,53	2780,00	1,48
170	1 552,660	226,14	1941,64	2865,00	1,48
175	1 552,745	232,96	1998,74	2950,00	1,48
180	1 552,830	239,77	2055,85	3035,00	1,48
185	1 552,915	244,89	2112,96	3120,00	1,48
190	1 553,000	251,14	2170,06	3205,00	1,48
195	1 553,085	257,39	2227,17	3290,00	1,48
200	1 553,170	263,07	2284,28	3375,00	1,48
205	1 553,250	270,46	2341,39	3455,00	1,48
210	1 553,335	276,71	2398,49	3540,00	1,48
215	1 553,420	282,96	2455,60	3625,00	1,48
220	1 553,500	288,64	2512,71	3705,00	1,47
225	1 553,585	296,59	2569,81	3790,00	1,47

Obr. 7.21: Nastavení natažení senzoru se zapsanou mřížkou a následné odečítání vlnové délky a mechanického napětí vlákna

Z naměřených hodnot je patrné, že vlákno se zapsanou Braggovou mřížkou bylo nataženo o $225\ \mu\text{m}$, vlnová délka se změnila celkově o $3,79\ \text{nm}$ a nejvyšší změřené mechanické napětí bylo $296,59\ \text{g}$. Při další změně již vlákno nevydrželo a přetrhlo se. Na obr. 7.22 je zachycena grafická závislost vlnové délky a mechanického napětí vytvořené mřížky na natažení vlákna. Můžeme vidět, že se jedná o téměř lineární závislost.



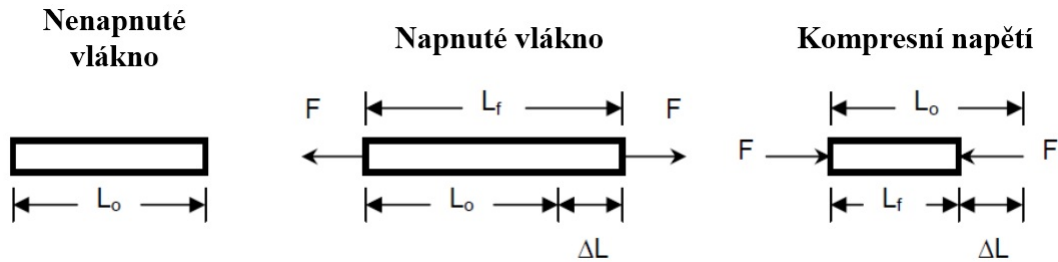
Obr. 7.22: Změna vlnové délky a mechanického napětí měřené mřížky v tahu

Pohledem na přetržené vlákno pod mikroskopem bylo zjištěno, že mřížka toto zatížení vydržela a senzor byl přetržen v místě vlákna ještě před zapsanou strukturou. Tato skutečnost nám ukazuje, že Braggova mřížka zapsaná femtosukundovým laserem vydrží více než změřené zatížení $296,59\ \text{g}$. Hodnota zatížení odpovídá natažení snímače silou přibližně $2,9\ \text{N}$. Místo, kde došlo k přetrhnutí vlákna, mohlo být např. neopatrným zacházením mírně poškozeno. Optické vlákno zbavené ochrany je velice náchylné k drobnému škrábnutí, či naříznutí, a následně se v tomto místě může zlomit nebo v tahu přetrhnout.

Výpočet citlivosti senzoru v tahu:

Ve většině případů se udává citlivost Braggových mřížek v tahu pomocí jednotek $\text{pm}/\mu\epsilon$. Zatížení měřené pomocí stanice LDS bylo udáváno v silových gramech, proto bylo vhodnější přepočítat tyto hodnoty na parametr „microstrain“ pro porovnání citlivosti snímačů vytvářených UV laserem a femtosekundovým laserem. Prvním krokem bylo vypočítat napětí v jednotkách $\mu\epsilon$ a poté rozdíl vlnové délky oproti

původní hodnotě vlnové délky optického vlákna v klidovém stavu. Pomocí těchto dvou hodnot bylo možné určit citlivost v tahu.



Obr. 7.23: Schématické zobrazení vlákna v klidovém stavu, nataženého a stlačeného vlákna [22]

Parametr zatížení ε je definován jako poměr změny délky vlákna k původní délce optického vlákna.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (7.2)$$

Pokud je ΔL kladná hodnota, vlákno podléhá tahovému napětí, které se označuje také jako kladné napětí. Pokud je ΔL záporná hodnota, optické vlákno je vystaveno kompresnímu napětí, někdy označovanému jako negativní napětí. I když je parametr zatížení bezrozměrná veličina, často se vyjadřuje jako poměr délkových rozměrů, např. v mm/mm. Většinu pevných materiálů lze stlačit či natáhnout pouze mikroskopicky a hodnota ε je velmi malá. Z tohoto důvodu je parametr zatížení uváděn jako „microstrain“ ($\mu\varepsilon = \varepsilon * 10^6$).

Mechanické napětí senzoru v jednotkách „microstrain“ se vypočítá podle níže zapsaného vzorce. Příklad výpočtu je uveden pro hodnotu natažení vlákna $50 \mu m$. Délka optického vlákna upnutého mezi držáky v systému LDS byla v nenataženém stavu $8,8 \text{ cm}$.

$$\mu\varepsilon = \varepsilon * 10^6 = \frac{\Delta L}{L_0} * 10^6 = \frac{50 \mu m}{88000 \mu m - 225 \mu m} * 10^6 = 571,07 \mu\varepsilon$$

Citlivost senzoru v tahu je určována jako poměr dvou hodnot. První je změna centrální vlnové délky a druhá je mechanické napětí.

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\mu\varepsilon} = \frac{790 \text{ pm}}{571,07 \mu\varepsilon} = 1,38 \text{ pm}/\mu\varepsilon$$

Vypočítaná citlivost snímače vytvořeného pomocí přímého zápisu femtosekundovým laserem byla přibližně $1,38 \text{ pm}/\mu\epsilon$. Vlákňové mřížky zapisované pomocí UV laseru a fázové masky mají citlivost v tahu o trochu nižší, hodnota se u nich pohybuje přibližně okolo $1,3 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

7.3.3 Měření změny vlnové délky vytvořených Braggových mřížek v závislosti na vysoké teplotě

V této části měření byly zkoumány vlastnosti mřížek zapsaných femtosekundovým laserem, které byly vystaveny vysoké teplotě. V testu byly použity čtyři senzory vytvořené se stejnými parametry jako u měření předchozích vlastností. Snímače byly nejprve pomocí svářečky optických vláken prodlouženy o přibližně 30 cm vlákna s primární ochranou, aby byla celková délka dostatečná. Vlákna se zapsanými mřížkami bylo zapotřebí vložit do vysokoteplotní pece a sekundární ochrana by vlivem vysokých teplot shořela. Konec vlákna byl pomocí sváru spojen k pigtailu. Tento krok umožnil senzory připojit k optickému spektrálnímu analyzátoru, na kterém mohly být sledovány změny vlnové délky v závislosti na změně teploty.

Pro nastavení teploty v rozmezí 24°C až 200°C byla využita sušící pec značky Memmert, která umožňuje přesnější nastavení nižších hodnot teploty. Na obr. 7.24 je zobrazena sušící pec značky Memmert.



Obr. 7.24: Sušící pec značky Memmert pro měření vlastností při nižších teplotách [23]

Po změření hodnot posunu vlnové délky v závislosti na změně teploty v sušící peci Memmert bylo přistoupeno k měření zbývajících vyšších hodnot. Teplota ve vysokoteplotní peci značky Carbolite byla měněna od počáteční hodnoty 200 °C až po hodnotu 1000 °C. Krok změny teploty byl nastaven na 50 °C a po každé změně bylo zapotřebí nechat teplotu ustálit, aby bylo odečítání hodnot vlnové délky přesnější.



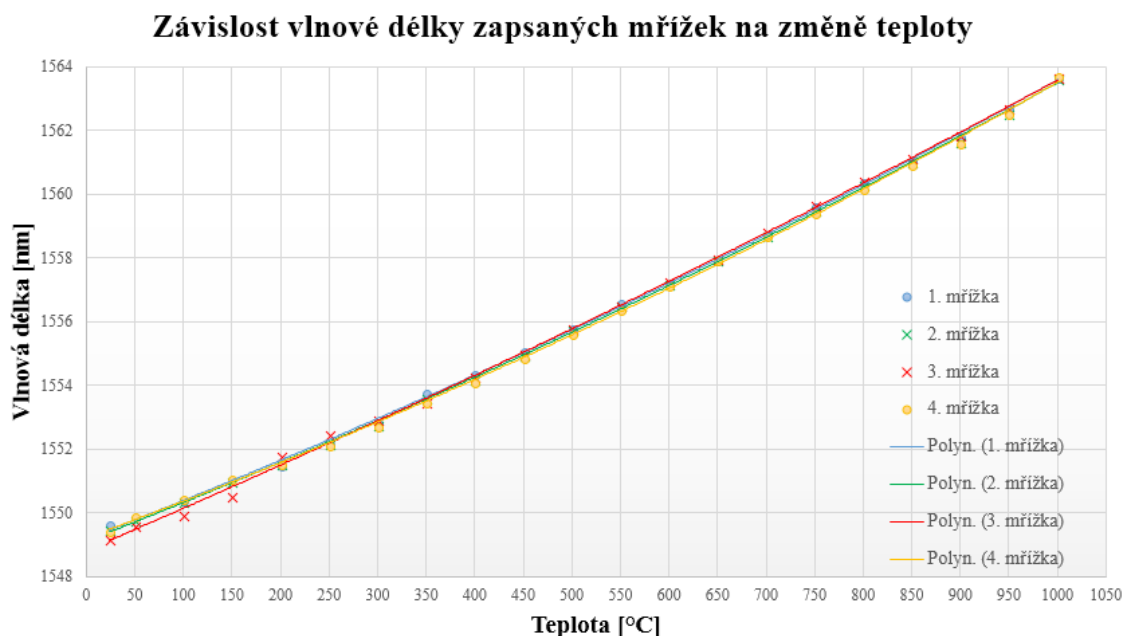
Obr. 7.25: Pec pro zkoumání vlastností mřížek pod vlivem vysokých teplot [24]

Vlastnosti mřížek byly v peci Carbolite měřeny až od hodnoty 200 °C, protože nastavení nižších teplot je u tohoto zařízení obtížné a lépe se zde nastavují vyšší teploty. Maximální hodnota teploty byla záměrně zvolena 1050 °C, protože při takto vysoké teplotě již dochází k deformaci mřížky. Tato deformace se projevuje především snižováním výkonové úrovně v odraženém signálu. Naměřené hodnoty změny vlnové délky v závislosti na změně teploty jsou přehledně zobrazeny na obr. 7.26.

Současně s měřením posunu vlnové délky byly měřeny i změny výkonové úrovně v odraženém signálu daných mřížek. Toto měření hodnot později ukázalo snižování výkonové úrovně signálu a mřížka se při teplotě 1050 °C začala deformovat a zakrývat. Na obr. 7.27 je graficky znázorněna změna vlnové délky zapsané mřížky v závislosti na změně teploty. Závislosti všech čtyř zkoumaných mřížek jsou polynomičeského průběhu a téměř se překrývají.

Teplota [°C]	1. mřížka		2. mřížka		3. mřížka		4. mřížka	
	Vlnová délka [nm]	Výkonová úroveň mřížky [dBm]	Vlnová délka [nm]	Výkonová úroveň mřížky [dBm]	Vlnová délka [nm]	Výkonová úroveň mřížky [dBm]	Vlnová délka [nm]	Výkonová úroveň mřížky [dBm]
24	1549.62	23.92	1549,480	23,92	1549,170	24,62	1549,440	23,22
50	1549.990	23.94	1549,745	23,91	1549,590	24,67	1549,880	23,28
100	1550.400	23.94	1550,335	23,94	1549,945	24,87	1550,420	23,29
150	1550.420	23,93	1550,965	23,88	1550,520	25,08	1551,060	23,29
200	1551.490	23.94	1551,535	23,78	1551,770	25,43	1551,510	23,28
250	1552.150	23.93	1552,150	23,78	1552,450	24,71	1552,135	23,14
300	1552.815	23.85	1552,770	23,78	1552,925	24,50	1552,715	23,29
350	1553.780	24.36	1553,590	24,14	1553,480	25,14	1553,480	23,50
400	1554.340	24.28	1554,160	24,28	1554,285	25,14	1554,095	23,50
450	1555.075	24.21	1554,925	24,28	1554,965	26,14	1554,835	23,93
500	1555.780	24.71	1555,740	24,14	1555,790	25,57	1555,625	23,78
550	1556.585	23.78	1556,480	24,21	1556,480	25,35	1556,365	23,64
600	1557.180	24.35	1557,165	24,35	1557,250	25,21	1557,120	23,57
650	1557.920	24.43	1557,920	24,43	1557,990	25,28	1557,920	23,85
700	1558.715	24.71	1558,705	24,43	1558,830	25,40	1558,680	23,90
750	1559.620	25.28	1559,500	24,64	1559,670	25,78	1559,410	25,21
800	1560.360	25.29	1560,305	24,58	1560,415	26,62	1560,160	25,47
850	1561.055	25.19	1560,995	24,54	1561,125	26,23	1560,910	25,66
900	1561.800	27.83	1561,620	27,08	1561,855	28,53	1561,600	25,66
950	1562.680	26.99	1562,530	26,99	1562,695	31,99	1562,515	25,48
1000	1563.660	27.83	1563,630	28,02	1563,660	30,85	1563,680	25,95
1050		32.58		44,73		34,36		46,17

Obr. 7.26: Tabulka naměřených hodnot změny vlnové délky v závislosti na změně teploty až do 1000 °C



Obr. 7.27: Závislost vlnové délky zapsaných Braggových mřížek na změně teploty ($T_{max} = 1050\text{ °C}$)

7.4 Aplikace Braggových mřížek tvořených femtosekundovým laserem

Klasické FBG (Fiber Bragg Gratings - optické vláknové mřížky) senzory zapsané UV laserem se používají pro měření statického a dynamického namáhání a pro sledování konstrukčního stavu v letectví, námořnictví a občanských staveb. Společnosti obsluhující ropné a plynárenské podniky používají FBG senzory pro monitorování teploty a tlaku ropných vrtů a nádrží. V této době jsou již vyvíjeny nové nekonvenční techniky těžby ropy založené na metodě obnovy tepla, jako je gravitační drenáž s pomocí páry (SAGD), cyklická parní stimulace (CSS) nebo vstřikování vzduchu (THAI). Snímače FBG nemohou odolávat vyšším teplotám, které se pohybují kolem 600 °C, protože jejich spektra rychle vymizí vzhledem k takovému vysokému teplotnímu vlivu. Mřížky tvořené femtosekundovým laserem jsou teplotně odolné a vydrží při teplotách i 1200 °C [25].

7.4.1 Vysoké teploty

Vysokoteplotně stabilní FBG mohou být vyráběny pomocí metody „Bod po bodu“ nebo přes fázovou masku. Takové senzory jsou vhodné pro použití v drsných prostředích, které se nacházejí např. v elektrárnách, plynových nebo aerosolových turbínách, spalovacích systémech apod [25].

7.4.2 Prostředí s vysokým ionizujícím zářením

Elektronická měřidla a měniče nejsou vhodné pro nasazení v drsných radioaktivních prostředích, zejména pokud je intenzivní ionizující záření doprovázeno zvýšenou teplotou, chemickou kontaminací a vysokou úrovní elektromagnetického rušení [25].

Snímače s Braggovou mřížkou zapsané do germaniem dopovaného vlákna s pomocí UV laseru jsou schopny tolerovat jaderné prostředí s nízkou proměnlivostí po delší dobu. V prostředí s vysokou proměnlivostí dochází k útlumu vyvolaného záření. Tradiční technika UV laseru a fázové masky je v takovém prostředí neúčinná [25].

Při použití metody fázové masky pomocí femtosekundového laseru lze snadno zapsat vláknovou mřížku do radiačně odolného vlákna dopovaného fluorem. V experimentech s takto vytvořeným vláknem byly pozorovány pouze malé změny v pevnosti mřížky a rezonanční vlnové délce po dávkování 100 kGy radiace. V jiných experimentech měly vyšší dávky radiace až do 1 MGy za následek posunutí vlnové délky o -60 pm [25].

7.4.3 Multiparametrové snímání v drsných prostředích

Primární měřicí veličina využívaná v FBG senzorech je λ_B , která je ovlivněna změnami periodicity mřížky Λ_G tepelnou roztažností nebo deformací a také změnami n_{eff} v důsledku proměnlivosti v teplotních a optických koeficientech. Ve standardním optickém vláknu je často obtížné rozlišit tyto dva efekty pomocí jediného FBG senzoru, protože oba mohou působit současně na λ_B . K rozlišování těchto účinků je často umístěn jiný FBG senzor v těsné blízkosti prvního, ale je izolován od jednoho z efektů. Ačkoliv je tato metoda účinná, nejedná se o pravé měření různých parametrů jednoho místa a často toto řešení vyžaduje komplikovanou snímací konfiguraci [25].

Víceparametrové snímání může být realizováno využitím nakloněných mřížek v optickém vlákne. Tyto nakloněné mřížky vytvářejí silné rezonance opláštění, které nejsou vedeny pláštěm jádra, ale místo toho jsou směřovány obvodovým vzduchem. Nakloněné mřížky způsobují silné ztráty, které jsou pozorovány v přenosovém spektru a jsou snadno ovlivněny prostředím kolem vlákna. Teplota má stejný vliv na změny vlnových délek rezonance jádra i pláště, ale namáhání ovlivňuje opláštění odlišně v porovnání s jádrem. Jediný senzor FBG s nakloněnou mřížkou lze poté použít jako duální snímač parametrů axiálního napětí a teploty. Typické nakloněné mřížky jsou vyráběny pomocí technik založených na UV laseru, proto jsou tyto snímače neúčinné při teplotách vyšších než 300 °C. Vytvořením nakloněné mřížky pomocí femtosekundového laseru a techniky fázové masky lze získat dvouparametrový snímač namáhání a teploty, který je funkční až do 800 °C. Pro prostředí s teplotami více než 1300 °C již nejsou multiparametrové senzory zapsané do křemičitého vlákna použitelné. Místo těchto křemičitých vláken se doporučují safírová, která těmto teplotám odolají [25].

7.4.4 Vysoký tlak

Braggovy mřížky zapsané ve standardních germaniem dopovaných křemíkových vláknech byly vystaveny hydrostatickému tlaku až 70 MPa a bylo zjištěno, že dochází k posunům vlnových délek o -3 pm/MPa. Reakce senzoru na tlak se zlepšila přilnutím transdukčního prvku, který se skládá z laminované kompozitní struktury z uhlíkových vláken, k měřicí mřížce. Citlivost na tlak se tímto způsobem zvýšila o tři řády, měření probíhalo při pokojové teplotě a tlaku do 70 MPa [25].

Asymetrické vlnovodné geometrie byly navrženy tam, kde změny v hydrostatickém tlaku budou mít za následek změny závislé na polarizaci v optickém koeficientu namáhání p_e . Využitím těchto vlnovodných konstrukcí je možné vytvořit dvouparametrový senzor teploty a tlaku založený na Braggově mřížce. Např. pomocí UV laseru lze zapsat mřížku do optického vlákna s bočními otvory a takový senzor

se následně dá využít současně pro měření teploty a vysokého tlaku. Přítomnost bočních vzduchových otvorů v plášti vlákna způsobuje vysokou dvojlomnost vlákna a produkci dvou polarizačně závislých λ_B od jedné Braggovy mřížky. Vzhledem k nárůstu tlaku uvnitř bočních otvorů byly pozorovány změny vlnové délky oddělené od polarizačně závislé λ_B . Vlivem změny teploty ale došlo ke shodným posunům vlnové délky obou rezonancí. Vzhledem k tomu, že použitá mřížka byla v tomto případě zapsaná UV laserem, nebylo by možné ji využít jako dvouparametrový snímač teploty a tlaku pro vyšší teplotu než 300 °C [25].

Podobná geometrie vlnovodu s bočními otvory byla aplikována také na multiparametrový snímač tlaku a teploty, který byl vytvořený femtosekundovým laserem. Výsledný senzor pracoval velmi dobře při teplotách 800 °C a tlaku do 16,5 MPa [25].

7.4.5 FBG pro detekci rázových vln v energetických materiálech

Chirpovaná Braggova mřížka má měnící se periodicitu rozteče mřížky podél vlákna. Různá místa podél mřížky proto budou odrážet různé vlnové délky světla. Tento atribut mřížky byl účinně použit v telekomunikačním průmyslu ke korekci chromatické disperze optického signálu, ke které dochází v sítích s dlouhými optickými trasami. Z hlediska snímání tyto konstrukce umožňují skutečně kontinuální měření s vysokým prostorovým rozlišením např. při tvorbě namáhání a trhlin v kompozitním laminátu, nebo teploty a rozložení deformace v rámci fotonických světelných obvodů. V drsných prostředích jsou chirpované mřížky v kombinaci s vysokorychlostními dotazovacími systémy přístupem pro kontinuální prostorové měření rázové vlny a detonace v rámci energetických materiálů nebo výbušnin. Vzdálenost šíření, přes kterou lze měřit nárazovou vlnu, je omezena délkou chirpované mřížky. Délka komerčně dostupných chirpovaných mřížek je limitována délkou fázové masky, která je využívána k jejich zápisu. Tyto fázové masky jsou obvykle vyráběny standardními fotolitografickými procesy, a proto jsou omezeny na délku přibližně 150 mm [25].

Zápis femtosekundovým laserem metodou „Bod po bodu“ není omezený těmito limity fázové masky. Přímý zápis chirpované mřížkové struktury touto zmíněnou metodou je vytvářen pouze prostými lineárními změnami frekvence opakovacího pulsu laserového zápisu, kdy se paprsek pohybuje podél vlákna konstantní rychlostí. Nevýhodou je, že proces tvorby mikroutin vyvolává vysoké rozptylové ztráty pohybující se v rozmezí 1–2 dB/cm. Pro mřížku délky 100 mm by to znamenalo ztrátu >20 dB u zařízení pracujícího v odrazovém módu, to je případ pro měření rychlosti rázové vlny. Nedávno byla použita technika pro skenování ohniskového bodu podél jedné osy jádra vlákna, která vytvářela mřížku bod po bodu s nízkými rozptylovými ztrátami 0,05 db/cm. Použitá pulsní energie byla nižší než prahová hodnota

pro nano-zápis nebo vytváření mikroductin. Rychlost snímání a chvění jádra byly optimalizovány do té míry, aby se zajistilo určité překrytí mezi ozařovacími pulsy. Pomocí této techniky vznikla chirpovaná mřížka s průměrnou odrazivostí 40 % přes šířku pásma 10 nm a celková vytvořená délka senzoru byla 19,5 cm [25].

8 ZÁVĚR

V této diplomové práci jsem měl za úkol prostudovat způsoby vytváření indexových změn v optických vláknech. Především jsem se měl zaměřit na působení ultrakrátkých pulsů s vysokou intenzitou. Dále jsem měl navrhnout měřící struktury s optickými vlákny realizovatelné femtosekundovým laserem pro mikroobrábění a zjistit geometrii a velikost indexových změn v experimentálních vzorcích. Nakonec jsem měl zhodnotit experimentální vzorky a posoudit možnosti konstrukce senzorických struktur založených na této technologii.

V úvodu mé diplomové práce jsem řešil obecnou problematiku optických vláken, jako je šíření světla optickým vláknem, zdroje optického záření a rozdělení vláken. Dále jsem také shrnul nejpoužívanější technologie pro výrobu optických vláken.

Následně bylo velmi důležité získat přehled ohledně indexových změn ve vláknech, proto jsem se v této práci věnoval podrobnějšímu popisu vláknových mřížek. Zaznamenal jsem jejich hlavní vlastnosti a princip činnosti. Vlákňové mřížky jsem rozdělil na tři základní druhy, mezi které patří Braggovy mřížky, mřížky s dlouhou periodou a potom tzv. chirpované mřížky. U každého typu mřížek jsem uvedl jejich popis, vlastnosti, jejich vzájemné rozdíly a metody výroby jednotlivých vláknových mřížek. Podrobnější znalosti o vláknových mřížkách jsou velmi nutné, protože jsou schopné zajistit požadovanou změnu indexu lomu.

V další části jsem se zaměřil na obecný popis činnosti laseru, rozdělení a rozdíly mezi jednotlivými druhy. Tyto poznatky jsou významné, protože všechny pokusy a testy budou pomocí laseru prováděny. Je zde podrobně popsán i krystal Yb:KGW, který patří mezi lasery pevnolátkové a je součástí stanice FemtoLab ve firmě NETWORK GROUP s.r.o, kde realizace pokusů probíhá.

Součástí této práce je kapitola o femtosekundovém laseru, se kterým byly všechny pokusy realizovány. Hlavní předností femtosekundového laseru je vysoká přesnost a téměř nulové nežádoucí poškození vzorku. Při obrábění povrchu je tento laser výhodnější a mnohem lepší, než nanosekundový laser a CO₂ laser. Další jeho předností je modifikace materiálu, neboli změna indexu lomu v daném vzorku, ve kterém dojde k přeskupení atomů a změně hustoty materiálu. Dále jsou zde uvedeny možnosti zápisu mřížek pomocí tohoto laseru. Především je zmíněna metoda řádek po řádku, bod po bodu a metoda fázové masky.

Kapitola laboratorního pracoviště FemtoLab je zaměřena na popis femtosekundového laseru firmy NETWORK GROUP s.r.o, který je součástí stanice FemtoLab.

Jsou zde popsány vlastnosti femtosekundového laseru, jeho vlastnosti, jednotlivé části obsažené v celé stanici a různé náhledy na přístroj. Značná část této kapitoly se věnuje popisu přímo femtosekundového laseru značky Pharos a jeho vysílacím módům pulsů. Popsán je i použitý software, který sloužil k ovládní laseru. Jedná se o dva programy, SCA pro mikroobrábění a Pharos service. V aplikaci Pharos se přímo nastavují hodnoty proudu oscilátoru, pracovní vlnová délka, opakovací frekvence a také např. výstupní výkon. Program SCA slouží k vytváření skriptovacího algoritmu a ovládní pohyblivých stolků a jiných hardwarových zařízení.

Kapitola experimentální výroby Braggových mřížek pomocí femtosekundového laseru je zaměřena na popis měřícího pracoviště. Značná část této kapitoly je věnována samotnému experimentu. Je zde uvedeno několik vybraných testů, které byly vyzkoušeny nejdříve na planární technologii. Planární vzorek byl vybrán záměrně pro seznámení se s laserem a s jeho fungováním, protože je snažší zaostřit na rovnou plochu. U jednotlivých testů je vždy uvedena tabulka s nastavenými hodnotami laseru, aby bylo patrné, jaké množství energie bylo nutné pro vytvoření dané struktury. Věnoval jsem se zejména zapisování Braggových mřížek pomocí femtosekundového laseru. Nejprve ale bylo důležité zjistit nejmenší možnou velikost mezery mezi jednotlivými čarami mřížky a kdy již dochází k deformaci Braggovy mřížky. Dále jsem zkoumal nejmenší stopu zapsané čáry do objemu materiálu a také vliv velikosti energie na hloubku zapsané mřížky. Při tomto testu jsem zjistil, že puls s menší energií zapisuje mřížku hlouběji a s užší stopou, než je tomu u zápisu pulsem s vyšší energií. Následně jsem prováděl snižování hloubky ostření laserového svazku do materiálu s cílem zjistit, do jaké nejmenší hloubky lze mřížku zapsat. Tato hloubka zápisu závisí především na velikosti energie pulsu. V další části experimentů je navržený systém uchycení optického vlákna. Nejprve je nutné pomocí laseru vypálit do planárního vzorku „V“ drážku, do které se vloží vlákno. Mezi skleněnou destičku s drážkou a druhou destičkou bez drážky bude nanesen imerzní gel. Tento gel zajistí, že cylindrický tvar vlákna, na který by bylo obtížné zaostřit laserem, bude vykompenzován. Po vytvoření systému uchycení vlákna byly prováděny testy na optických vláknech s cílem do nich zapsat Braggovu mřížku. Některé úspěšné pokusy o zapsání Braggovy mřížky do vlákna jsou uvedeny v této kapitole a také několik dalších testů, mezi které patří např. posun mřížky ve spektru a vytvoření chirpované mřížky.

Součástí této kapitoly je měření vlastností vytvořených mřížek pomocí femtosekundového laseru. U takto zhotovených senzorů byly zkoumány vlastnosti při změně teploty a také v tahu, kdy bylo vlákno napínáno piezoelektrickým posuvem. Nakonec byly zkoumány vlastnosti mřížek při vysokých teplotách. Při měření změny vlnové délky zapsaných mřížek v závislosti na změně teploty se udává teoretická hodnota $9,5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. Tato hodnota platí především pro Braggovy mřížky vytvářené

pomocí UV laseru. V diplomové práci jsem změřil tuto závislost pro čtyři mřížky zapsané femtosekundovým laserem a hodnota vlnové délky se měnila v rozmezí 9–12 pm/°C. Měření změny vlnové délky a mechanického napětí vlákna v závislosti na tahu ukázalo, že optické vlákno se zapsanou Braggovou mřížkou bylo nataženo o 225 μm a vlnová délka se změnila celkově o 3,79 nm. Nejvyšší zatížení vlákna bylo 296,59 g a tato hodnota odpovídá přibližně síle 2,9 N. Pro snazší porovnání senzorů vytvářených femtosekundovým laserem a UV laserem byly hodnoty zatížení přepočítány na citlivost v tahu, která se udává v jednotkách pm/ $\mu\text{ε}$. Vypočítané hodnoty naznačují, že mřížka zapisovaná femtosekundovým laserem má citlivost v tahu přibližně 1,38 pm/ $\mu\text{ε}$. Vláknové mřížky zapisované pomocí UV laseru mají citlivost o trochu nižší, u nich se tato hodnota v tahu udává kolem 1,3 pm/ $\mu\text{ε}$. V posledním měření zapsaných vláknových mřížek byly zkoumány změny vlnové délky v závislosti na vysoké teplotě. Teplota byla nastavována od 24 °C až po hodnotu 1000 °C a během tohoto procesu byla odečítána změna vlnové délky všech čtyř měřených mřížek. Zároveň byla společně s vlnovou délkou zkoumána i změna výkonové úrovně odraženého signálu jednotlivých mřížek. Změna vlnové délky byla přibližně 14,3 pm/°C. Dále bylo zjištěno, že při teplotě 1050 °C se již mřížka začíná deformovat a pomalu zanikat, především se snižovala výkonová úroveň v odraženém spektru.

Nakonec je v této práci uvedeno několik praktických možností využití mřížek zhotovených pomocí femtosekundového laseru oproti např. UV laseru a jeho technikám. Mezi největší výhody patří teplotní stálost, protože do vláken vytváříme trvalé změny indexu lomu a vlivem vyšších teplot se mřížky nevymazávají. Mezi další výhody patří volitelnost struktury, kdy pomocí programu můžeme během chvíle zapisovat úplně rozdílné mřížky a není potřeba nechávat leptat fázové masky jako je tomu u UV laseru. Mřížky s takovými vlastnostmi je poté možné používat v drsných prostředích s vysokou teplotou a vysokým tlakem, ale i v jaderném prostředí, v detekci rázových vln, nebo pro multiparametrové snímání veličin.

LITERATURA

- [1] Helán, R. *Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur*: doktorská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2009. 128 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. František Urban, CSc.
- [2] Polreich, Š. *Struktury v optických vláknech*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 57 s. Vedoucí práce byl Ing. František Urban
- [3] Hlavatý, V. *Mikrostrukturní optická vlákna s dutým jádrem*: semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2014. 67 s. Vedoucí práce byl Ing. Břetislav Mikel, Ph.D.
- [4] Pudil, K. *Navazování optických vláken*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 2011, 55 s. Vedoucí bakalářské práce byl Doc. RNDr. Richard Horák, CSc.
- [5] Filka, M. *Přenosová média*. Skripta VUT FEKT, Brno, 2003. 202 s. ISBN 978-80-214-4444-7.
- [6] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [7] Urban, F. *Měřicí pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 54 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [8] Othonos, A., Kalli, K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing* Artech House, Boston, London, 1999
- [9] Werneck, M., Allil, R. *A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z odkazu: <https://www.intechopen.com/books/current-trends-in-short-and-long-period-fiber-gratings/a-guide-to-fiber-bragg-grating-sensors>
- [10] BAZALOVÁ, L. *Porovnání vlastností pevnolátkových laserů*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 30 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Kubíček

- [11] Oškera, J. *Femtosekundové lasery a jejich aplikace*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 73 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Münster, PhD.
- [12] *Nd or Yb doped Potassium-Gadolinium Tungstate Crystals* [online]. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: http://www.mt-berlin.com/frames_cryst/descriptions/kgw.htm
- [13] Richardson, M. *Femtosecond laser micro-structuring and refractive index modification applied to laser and photonic devices* University of Central Florida 4000
- [14] Kaiming, Z. *Line-by-line fiber Bragg grating made by femtosecond laser*. 2010
- [15] Michailov, J. *Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments*. Communications Research Centre Canada, 2012
- [16] *FemtoLab user's manual*. Workshop of Photonics
- [17] *Pharos - High Power and Energy Femtosecond Lasers* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://lightcon.com/Product/PHAROS.html?tab=4>
- [18] *PHAROS user's manual*. Light Conversion
- [19] *SCA micromachining software manual*. SCA software
- [20] Klvaňa, J. *Kombinované struktury v optickém vláknu*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, Rok 2016. 63 s. Vedoucí práce byl Ing. František Urban
- [21] *NETWORK GROUP s.r.o* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://sfo.networkgroup.cz/cs/galerie/>
- [22] *ThorLabs - Definition of Strain* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/images/TabImages/Strain%20Tutorial.pdf>
- [23] *Laboratore.cz - Memmert IF PLUS* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://laboratore.cz/katalog?product_id=913&limit=72
- [24] *Carbolite RHF High-Temperature Box Furnace* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.coleparmer.com/i/carbolite-rhf16-3-3216p1-high-temperature-box-furnace-1600c-2-/97-1-capacity/3385903>

- [25] Michailov, J. *Extreme Environments Sensing Using Femtosecond Laser-Inscribed Fiber Bragg Gratings*. National Research Council Canada, 2017

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

UV – ultraviolet (ultrafialové záření)

KrF – krypton fluorid

ArF – argon fluorid

LPFGs – Long period fiber gratings (mřížka s dlouhou periodou)

FBG – Fiber Bragg grating (Braggova mřížka)

CO₂ – oxid uhličitý

LED – Light emitting diode (elektroluminiscenční dioda)

OH – hydroxyl

GeO₂ – oxid germaničitý

Nd:YAG – neodymem dopovaný izotropní krystal yttrium-aluminium granátu

Yb:KGW – yterbiem dopovaný krystal draslíku a gadolina tungstate

Yb:YAG – yterbiem dopovaný izotropní krystal yttrium-aluminium granátu

Yb:YCOB – yterbiem dopovaný krystal yttrium-calcium oxoborate

CCD – charge coupled device (nabíjení připojeného zařízení)

ASE – amplified spontaneous emission (zesilování spontánní emise)

OSA – optical spectrum analyzer (optický spektrální analyzátor)

SAGD – steam assisted gravity drainage

CSS – cyclic steam stimulation

THAI – toe-to-hell air injection

Gy – Gray (jednotka radiace)