



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

**IMPLEMENTACE OPTICKÝCH VLÁKEN S FBG
SENZORICKÝMI ELEMENTY DO TECHNICKÝCH TEXTILIÍ**

IMPLEMENTATION OF OPTICAL FIBERS WITH FBG ELEMENTS INTO TECHNICAL TEXTILES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vsevolod Zaytsev

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Vsevolod Zaytsev

ID: 173784

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Implementace optických vláken s FBG senzorickými elementy do technických textilií

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je teoretický rozbor problematiky senzorických elementů založených na vláknových Braggových mřížkách (FBG) a rozbor problematiky technických textilií. Na základě teoretického rozboru bude proveden návrh implementace senzorických vláken do vrstvené struktury technických textilií a bude provedeno základní měření pro ověření funkčnosti navržené chytré textilie. V rámci praktické části bude proveden návrh, implementace a měření s vlastní chytrou textilií, přičemž důraz bude kladen na výběr vhodných textilií a lepidel.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] OTHONOS, Andreas. a Kyriacos. KALLI. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing. Boston, Mass.: Artech House, c1999. ISBN 0890063443.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 bakalářská práce má za cíl teoretický rozbor problematiky FBG (vláknová Braggova mřížka — Fiber Bragg Grating), její použití v oblasti telekomunikačních technologií a návrh chytré textilie na základě FBG filtru. Teoretická část této práce probírá znalosti o FBG, jejich výroby a využití, představuje přehled technických textilií a aktuálního stavu daného trhu. Pak se taky popíše otázka lepících adhesivů. Praktická část se věnuje návrhu chytré textilie a následnému měření závislosti vlnových délek zabudovaných FBG na jejich teplotě.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vláknová Braggova Mřížka (FBG), technické textilie (TT), lepidla

ABSTRACT

Překlad abstraktu (This bachelor thesis aims at a theoretical analysis of FBG (vláknová Braggova mřížka — Fiber Bragg Grating), its use in telecommunications technology and the design of smart textiles based on FBG filters. The theoretical part of this work discusses the knowledge of FBG, their production and use, presents an overview of technical textiles and the current state of the market. Then the question of adhesive adhesives will also be described. The practical part is devoted to the design of smart textiles and the subsequent measurement of the dependence of the wavelengths of the built-in FBGs on their temperature.)

KEYWORDS

Fiber Bragg Grating (FBG), technical textile (TT), glue

ZAYTSEV, Vsevolod. *Implementace optických vláken s FBG senzorickými elementy do technických textilií*. Brno, 2020, 73 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Implementace optických vláken s FBG senzorickými elementy do technických textili“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. XXX YYY, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	15
1 Braggovy mřížky	17
1.1 Jednoduchá Braggova mřížka	17
1.2 Typy Braggových mřížek	18
1.2.1 Uniformní mřížky	19
1.2.2 Apodizované mřížky	20
1.2.3 Difrakční mřížky s lineárně se měnící periodou	21
1.2.4 Blazed (blazed) mřížky	21
1.3 Výroba Braggových mřížek	23
1.3.1 Interně zapsané Braggovy mřížky	23
1.3.2 Výroba mřížky pomocí interferometrické metody	24
1.3.3 Metoda fázové masky	24
1.3.4 Bod po bodu	25
1.3.5 Maskování obrazu	26
1.3.6 Laserový zdroj	27
1.3.7 Speciální výrobní procesy vláknových Braggových mřížek	28
1.3.8 Hydrogenace	28
1.3.9 Výroba Braggových mřížek přes polymerové sako	29
1.4 Aplikace Braggových Mřížek v Telekomunikaci	30
1.4.1 Vláknové lasery	30
1.4.2 Vláknové zesilovače	30
1.4.3 Laserové Diody s Braggovými Mřížky	31
1.4.4 Základní bandpass a další typy vláknových Braggových filtrů	32
1.4.5 Multiplexery a demultiplexery s dělením vlnové délky	32
1.4.6 Multiplexování hustých vlnových délek s dělením	33
1.4.7 Kompenzace disperze	34
1.4.8 Časovač optické vláknové fáze	34
1.4.9 Fazována anténní mřížka s kontrolou generování paprsku	35
1.5 Senzory s Braggovými mřížky	35
2 Technické textilie	37
2.1 Přehled technických textilií	37
2.1.1 Oblasti použití technických textilií	37
2.2 Materiály technických textilií	39
2.3 Výroba technických textilií	40
2.3.1 Tkané textilie	41

2.3.2	Netkané textilie	42
2.4	Přehled aktuálního stavu trhu technických textilií	44
2.4.1	Přehled průmyslu	44
2.4.2	Přehled oblastí použití	44
2.4.3	Přehled regionů	46
3	Lepidla	47
3.1	Anorganická lepidla	47
3.2	Organická lepidla	48
3.3	Organoelementová lepidla	48
4	Návrh chytré textilie	49
4.1	Volba vhodného lepidla	49
4.2	Volba vhodné struktury a lepidla	52
4.3	Výroba konečné chytré textilie	54
5	Měření závislosti vlnové délky FBG na její teplotě	59
6	Výsledky bakalářské práce	61
	Závěr	65
	Literatura	67
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	73

Seznam obrázků

1.1	Ilustrace jednotné Braggovy mřížky s konstantním indexem modulační amplitudy a periody. Jsou také znázorněny vektory dopadajících, difrakčních a mřížkových vln, které musí být pro zachování hybnosti přizpůsobeny.	17
1.2	Typická závislost odraženého spektra Braggové mřížky na vlnové délce s vlnovou délkou kolem 1550 nm.	20
1.3	Typy Braggových mřížek; a) Uniformní, b) Apodizovaná, c) Chirped, d) Blazed.	21
1.4	Spektrum jednotlivých typů Braggových mřížek; a) Uniformní, b) Apodizovaná, c) Chirped, d) Blazed mřížky[10].	22
1.5	(a) Schematický diagram blazed mřížky, (b) Vektorové schéma pro Braggův stav blazed mřížky.	22
1.6	Typický aparát používaný pro generování samostatně indukovaných Braggových mřížek pomocí argonového iontového laseru. Typické odrazové a přenosové charakteristiky těchto typů mřížek jsou uvedeny v grafu.	24
1.7	Geometrická maska pro zápis Braggových mřížek v optických vláknech.	25
1.8	Normálový dopadající UV paprsek rozložený na různé řády.	25
1.9	Schéma sestavy pro výrobu Braggových mřížek pomocí techniky bod po bodu. Graf v pravém horním rohu ukazuje odrazové spektrum Braggovy mřížky třetího řádu vytvořené metodou point-by-point. Na základě [13].	26
1.10	Schéma systému promítání masek použitého k zápisu Braggových mřížek do fotocitlivého vlákna. Graf vpravo ukazuje spektrum odrazů šestého řádu z Braggovy mřížky $3 - \mu m$. Mřížka byla zapsána jediným excimerovým laserovým pulsem. Na základě [14].	27
1.11	a) Přenosové spektrum silikonové pryskyřice o tloušťce $150\mu m$, používá se pro povlakování vláken, (b) Spektrální odezva z Braggovy mřížky zapsané prostřednictvím $sin 40\mu m$ silného polymerního vláknitého povlaku za použití UV světla.[17]	29
2.1	Rozsah flexibilních inženýrských materiálů.	41
2.2	Podíl trhu technických textilií podle oblastí použití v roce 2018. . . .	45
2.3	Podíl trhu technických textilií podle oblastí použití v roce 2019. . . .	45
4.1	Lepidla, která prošla první etapou selekce.	50
4.2	Schéma třívrstvé struktury chytré textilie s netkanou textilií o tloušťce 4 mm.	54

4.3	Schéma čtyřvrstvé struktury chytré textilie s dvěma vrstvy netkané textilie o tloušťce 2 mm.	54
4.4	Výroba chytré textilie	55
6.1	Závislost vlnové délky FBG na teplotě.	62

Seznam tabulek

4.1	Výsledky testovaných lepidel v první fázi.	51
4.2	Výsledky testovaných lepidel v sekci 4.2.	56
4.3	Vlastnosti Braggových mřížek.	57
6.1	Extrémy změn vlnových délek a teplot během měření jednotlivých FBG.	63

Úvod

FBG (vlaknová Braggova mřížka — Fiber Bragg Grating) je druh distribuovaného Braggova reflektoru vytvořeného v krátkém segmentu optického vlákna, který odráží konkrétní vlnové délky světla a přenáší všechny ostatní. FBG se široce používá v telekomunikačních technologiích, a to zejména jako úzkopásmové filtry. Používají se také v optických multiplexorech a demultiplexorech s optickým oběhovým zařízením nebo OADM (optický přídatný multiplexor — Optical Add-Drop Multiplexer).

Tato bakalářská práce se věnuje oblasti FBG (vlaknová Braggova mřížka — Fiber Bragg Grating) a její použití v telekomunikačních technologiích. Cílem práce je navrhnout chytrou textilií, o rozměru 1x1 m, která by obsahovala optický kabel s Braggovými mřížkami, a dokázala by sloužit ochráněným médiem pro přenos světelných signálů. Dalším cílem je ověření schopnosti FBG reagovat na vliv teploty změnou své parametrické vlnové délky.

Teoretická část práce se zabývá rozбором problematiky tří základních témat: samotné Braggovy mřížky, jejich typy, způsoby výroby a oblasti použití; technické textilie, materiály a způsoby výroby, a taky přehled aktuálního stavu mezinárodního trhu; lepidla, jejich druhy a vlastnosti.

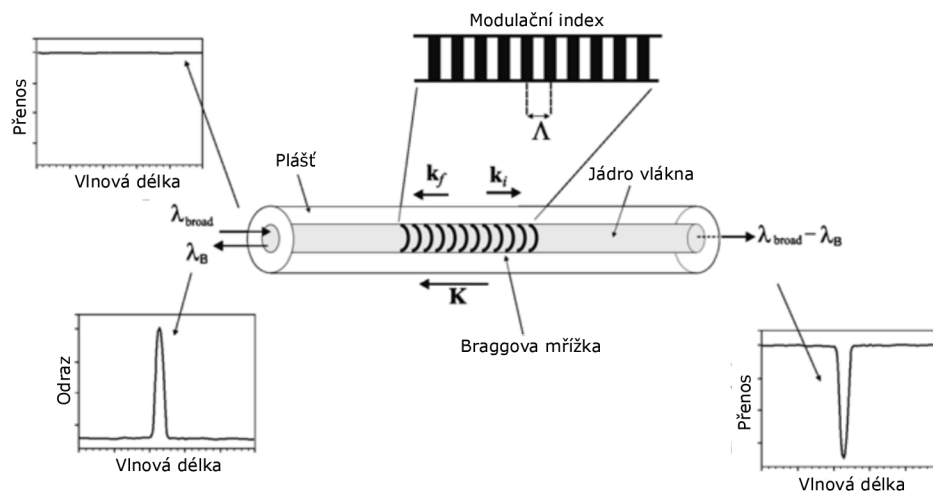
Praktická část se hlavně zabývá volbou vhodných materiálů a struktur pro zabudování optického kabelu s Braggovými mřížkami. Celý proces se sestaví z v několika fází — testování různých lepidel na textilních vzorcích; výběr nejvhodnější tloušťky textilie; výběr nejvhodnější vícevrstvé struktury textilie; výroba konečného vzorku pro testování a měření; samotné měření vlastností vyráběného vzorku.

1 Braggovy mřížky

V této kapitole se detailně rozeberou různé vlastnosti, charakteristické pro Braggovy mřížky a to zahrnuje diskusí o rozmanitém rozsahu témat. Začíná se to zkoumáním měřitelných vlastností záležících na vlnové délce, jakými jsou reflexivní a přenosové spektrální profily, pro řadu jednoduchých a složitých mřížkových struktur. Závislost odezvy vlnové délky mřížky na vnějším rozrušení se taky prozkoumá.

1.1 Jednoduchá Braggova mřížka

Optická vlákna s Braggovými mřížky jsou tvořena periodickou změnou indexu lomu jádra jednovidového optického vlákna. Tyto typy uniformních vláknových mřížek, kde vlnoplochy jsou kolmé k podélné ose vlákna, jehož mřížková plocha má konstantní periodu (Obr. 1.1), se považují za základní stavební bloky pro většinu struktur s Braggovými mřížky.



Obr. 1.1: Ilustrace jednotné Braggovy mřížky s konstantním indexem modulační amplitudy a periody. Jsou také znázorněny vektory dopadajících, difrakčních a mřížkových vln, které musí být pro zachování hybnosti přizpůsobeny.

Světlo vedené podél jádra optického vlákna bude rozptýleno každou mřížkovou rovinou. Pokud Braggova podmínka není splněna, odrazené světlo z každé z následujících rovin se postupně vyřadí z fáze a nakonec se zruší. Kromě toho světlo, které není shodné s Braggovou vlnovou rezonancí, zažije velmi slabé odrazy v každé z mřížkových rovin kvůli neshodě indexu; tento odraz se hromadí po celé délce mřížky. Například mřížka 1mm ve vzdálenosti $1,5\mu\text{m}$ se silným $\Delta n = 10^{-3}$ bude odrážet

sin 0,05% dopadajícího světla mimo rezonanci na vlnových délkách dostatečně daleko od Braggovy vlnové délky. Tam, kde je splněna Braggova podmínka, se příspěvky odraženého světla z každé mřížkové roviny konstruktivně přidávají zpětným směrem, aby se vytvořil zpětně odražený pík se střední vlnovou délkou definovanou parametry mřížky.

Braggova mřížková podmínka je jednoduše požadavek, který uspokojí jak energii, tak zachování hybnosti. Úspora energie ($\hbar\omega_f = \hbar\omega_i$) vyžaduje, aby kmitočet incidentu a odraženého záření byla stejná. Zachování hybnosti vyžaduje, aby vlnový vektor dopadající vlny \mathbf{k}_i plus mřížkový vlnový vektor, \mathbf{K} , se rovnal vlnovému vektoru rozptýleného záření \mathbf{k}_f , což je jednoduše uvedeno jako

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

kde mřížkový vlnový vektor, \mathbf{K} , má směr kolmý k mřížkovým plochám s velikostí $2\pi/\Lambda$ (Λ je mřížka mezery znázorněné ve vzorci 1.2). Difrakční vlnový vektor je stejný ve velikosti, ale opačný ve směru, stejný jako dopadající vlnový vektor. Proto se stává podmínka zachování hybnosti 1.2.

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

což zjednodušuje Braggovu podmínku prvního řádu

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

kde Braggova mřížková vlnová délka, λ_B , je vlnová délka středního prostoru vstupního světla, která se odrazí od Braggovy mřížky, a n_{eff} je efektivní refrakční index jádra vlákna na vlnové délce středu volného prostoru. [1]

1.2 Typy Braggových mřížek

Braggovy mřížky se v závislosti na průběhu změny indexu lomu a změny struktury dělí na:

- uniformní mřížky,
- apodizované mřížky,
- difrakční mřížky s lineárně se měnící periodou,
- blazed mřížky.

Jednotlivé typy mřížek se využívají v závislosti na požadovaných parametrech aplikace. Mřížky se liší v uspořádání změny indexu lomu např.: změna periody, náklonu, a hodnoty indexu lomu. Tyto odlišnosti dávají jednotlivým typům Braggových mřížek určité specifické vlastnosti, které se využívají v jednotlivých aplikacích.

1.2.1 Uniformní mřížky

Představte si rovnoměrnou Braggovu mřížku vytvořenou uvnitř jádra optického vlákna s průměrným indexem lomu n_0 . Index refrakčního profilu může být vyjádřen jako

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (1.4)$$

kde Δn je amplituda indukované poruchy indexu lomu (obvykle 10^5 až 10^3) a z je vzdálenost podél podélné osy vlákna. Při použití teorie vázaného módu ¹ je odrazivost mřížky s konstantní modulační amplitudou a periodou dána následujícím výrazem [2]

$$R(l, \lambda) = \frac{k^2 \sinh^2(sl)}{\Delta\beta^2(s) + s^2 \cosh^2(sl)} \quad (1.5)$$

kde $R(l, \lambda)$ je odrazivost, která je funkcí délky mřížky l a vlnové délky λ . k je spojovací koeficient, $\Delta\beta = \beta - \pi/\Lambda$ je vlnový vektor rozdílu rezonančního kmitočtu a kmitočtu dopadajícího světla, $\beta = 2\pi n_0/\lambda$ je propagační konstanta a konečně $s^2 = k^2 - \Delta\beta^2$. U sinusových variací poruchy indexu je koeficient vazby k dán vztahem

$$k = \frac{\pi\Delta n}{\lambda} M_{power} \quad (1.6)$$

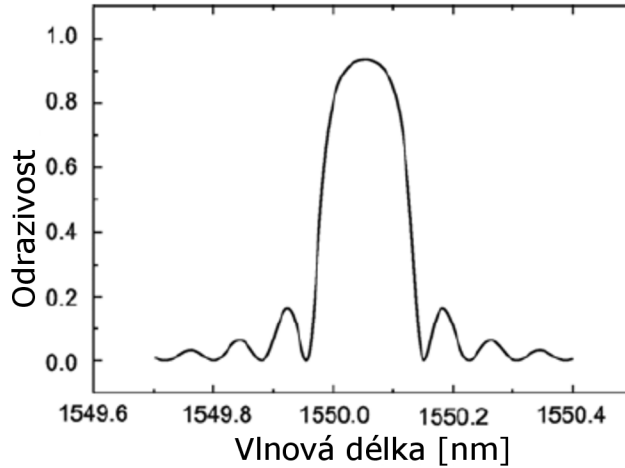
kde M_{power} je zlomek energie vlákna obsaženého v jádru vlákna. V případě, kdy je mřížka rovnoměrně zapsána jádrem, lze M_{power} aproximovat $1 - V^2$, kde V je normalizovaná frekvence vlákna, daná

$$V = (2\pi/\lambda)a\sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (1.7)$$

kde a je poloměr jádra a n_{co} a n_{cl} jsou indikátory jádra a pláště. Na středové vlnové délce Braggové mřížky je rozdíl rezonančního kmitočtu a kmitočtu dopadajícího světla $\Delta\beta = 0$, proto se výraz pro odrazivost stává

$$R(l, \lambda) = \tanh^2(kl) \quad (1.8)$$

Odrazivost se zvyšuje se s tím, jak se indikována změna indexu lomu. Podobně, jak se zvyšuje délka mřížky, zvyšuje se i výsledná odrazivost. Obrázek 1.2 ukazuje vypočtené odrazivé spektrum jako funkci vlnové délky uniformní Braggovy mřížky.



Obr. 1.2: Typická závislost odraženého spektra Braggové mřížky na vlnové délce s vlnovou délkou kolem 1550 nm.

Boční laloky rezonance jsou způsobeny vícenásobnými odrazy na opačných koncích mřížkové oblasti a od nich. Sinkové spektrum vzniká matematicky skrz

Fourierova transformace harmonického signálu má konečný rozsah, zatímco nekonečně dlouhá mřížka by se transformovala na ideální delta funkční odezvu v oblasti vlnové délky. Obecný výraz pro přibližnou šířku pásma mřížky přibližně poloviční šířky a šířky pásma je dán [3]

$$\Delta\lambda = \lambda_B S \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (1.9)$$

1.2.2 Apodizované mřížky

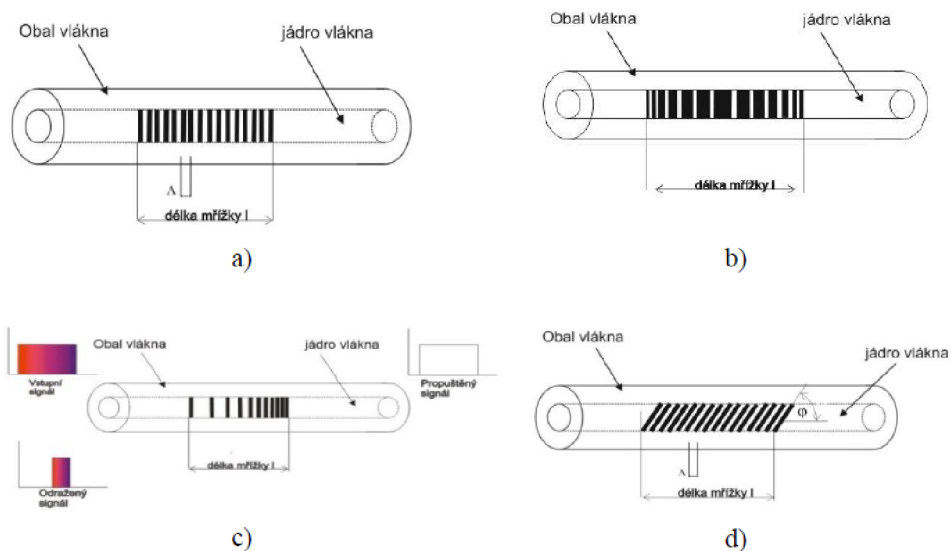
Apodizovaná mřížka je vylepšená uniformní mřížka, kterou lze také použít v aplikacích, kde se zapojuje více mřížek na jedno vlákno. V této mřížce se mění velikost změny indexu lomu, a perioda mřížky je konstantní, viz obr. 1.3b). Výhodou apodizované mřížky je výrazně lepší potlačení postranních pásem, viz obr. 1.4b), které jsou způsobeny odrazem od protějších konců mřížky. Tato mřížka se proto používá jako optický filtr ve speciálních aplikacích, kde je nutné zvýšit odstup signál-šum [1]. Apodizace se dosahuje v praxi tak, že se při výrobě méně ozáří části mřížky, kde je 15 vyžadován menší index lomu mřížky. Apodizace má různé profily v závislosti na potřebném potlačení pásem. Nejčastěji používaný profil je Gaussovský, kde se největší hodnoty změny indexu lomu nacházejí uprostřed mřížky, a směrem ke stranám mřížky se změna indexu lomu zmenšuje [4], [5], [6].

¹perturbační přístup pro analýzu propojení vibračních systémů

1.2.3 Difrakční mřížky s lineárně se měnící periodou

Vláknové mřížky, u kterých se mění perioda změny indexu lomu, se jmenují difrakční mřížky s lineárně se měnící periodou mřížky (*chirped*), viz obr. 1.3c). Změna periody v chirped mřížce může být až v jednotkách nanometrů na cm. Mřížka o délce 2 cm tak může mít vlnovou délku na jednom konci 1550 nm a na druhém 1548 nm [1]. Typické spektrum chirped mřížky je na obr. 1.4c). Difrakční mřížky s lineárně se měnící periodou se nejčastěji využívají při kompenzaci chromatické disperze v telekomunikačních aplikacích [7].

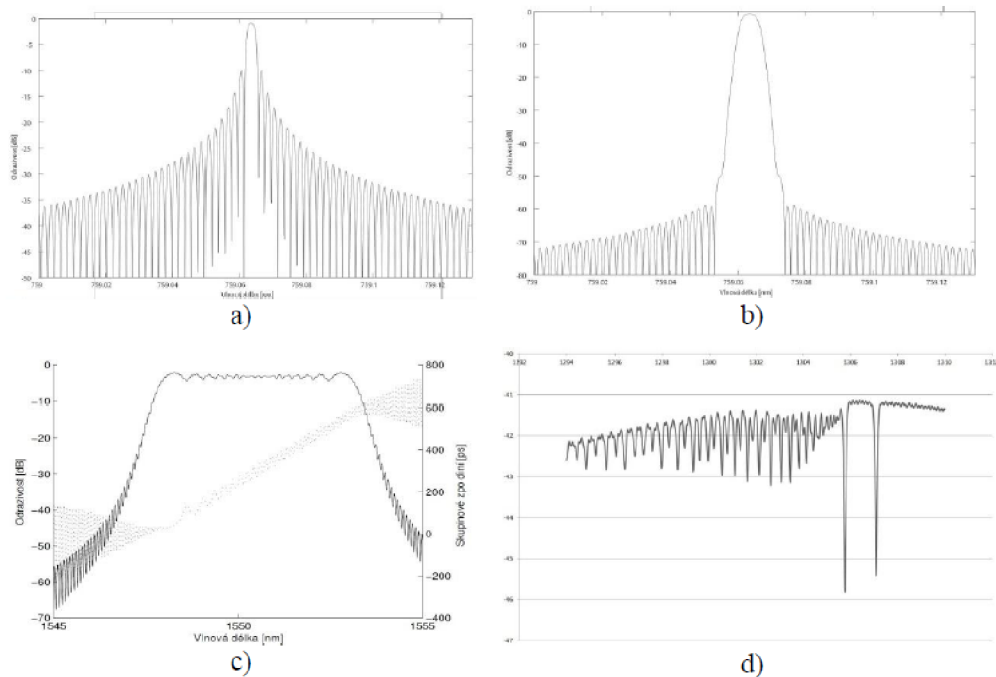
Blazed mřížka je speciální vláknová mřížka, jejíž rovina změn indexu lomu mřížky je nakloněná k ose šíření světla pod úhlem ϕ , viz obr. 1.3d). To má za následek vyvázání světla z jádra optického vlákna. Velikost indexu lomu a perioda mřížky určuje spektrum odražené vlnové délky záření, viz obr. 1.4d). Úhel roviny mřížky pak určuje procentuální vyvázání odraženého záření z jádra vlákna do obalu vlákna [1].



Obr. 1.3: Typy Braggových mřížek; a) Uniformní, b) Apodizovaná, c) Chirped, d) Blazed.

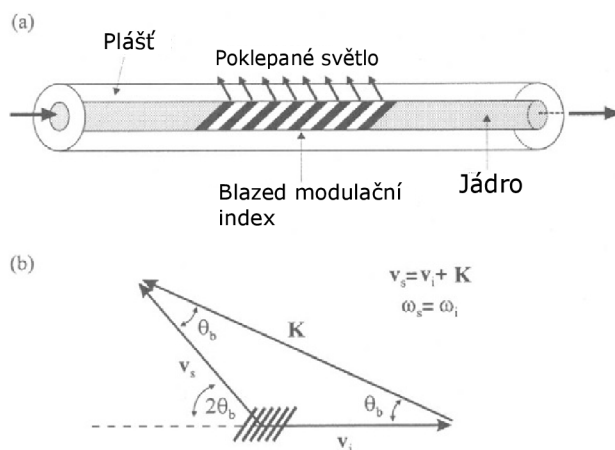
1.2.4 Blazed (blazed) mřížky

Naklonění (nebo zasklení) Braggových mřížek v úhlech k ose vlákna (obr. 1.5) má za následek světlo, které je jinak vedeno do vláknového jádra, je spojeno do volně vázaných řízených obkladových nebo radiačních režimů. Sklon mřížkových rovin a síla indexové modulace určují účinnost vazby a šířku pásma vytaženého světla. Kritérium pro splnění Braggové podmínky blazed mřížky je podobné jako u Braggova



Obr. 1.4: Spektrum jednotlivých typů Braggových mřížek; a) Uniformní, b) Apodizované, c) Chirped, d) Blazed mřížky[10].

reflektoru, který byl analyzován dříve. Obr. 1.5 také ilustruje vektorový diagram Braggové podmínky (zachování energie a hybnosti) pro zasklenou mřížku. Zde vlnový vektor mřížky \mathbf{K} dopadá v úhlu θ_b vzhledem k ose vlákna. Velikost incidentu v_i a rozptýlených vektorů vln v_s musí být stejné ($v = |v_i| = |v_s|$). Jednoduchá trigonometrie ukazuje, že vektor rozptýlené vlny musí být v úhlu $2\theta_b$ vzhledem k ose vlákna. Aplikace zákona kosinů na diagram hybnosti dává



Obr. 1.5: (a) Schematický diagram blazed mřížky, (b) Vektorové schéma pro Braggův stav blazed mřížky.

$$|v_i|^2 + |v_s|^2 - 2|v_i||v_s| \cos(\pi - 2\theta_b) = |\mathbf{K}|^2 \quad (1.10)$$

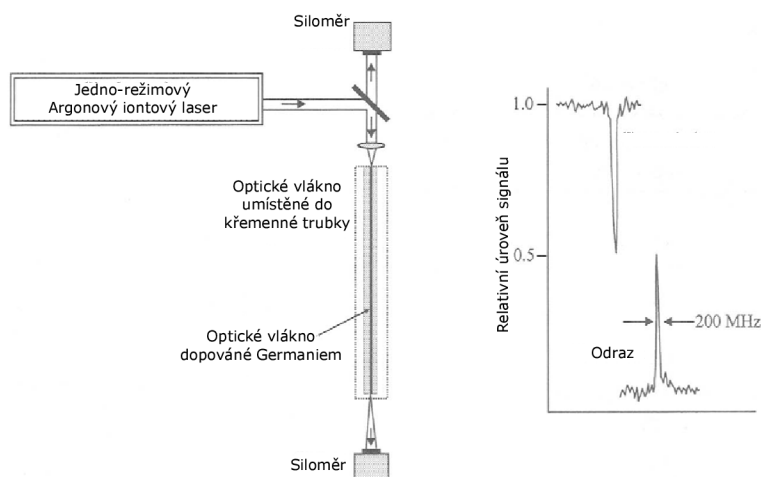
Tohle se zredukuje na $\cos(\theta_b) = |\mathbf{K}|/2v$ a ukazuje, že úhel rozptylu je omezen Braggovou vlnovou délkou a účinným indexem frakce. Z rovnice 1.10 je zřejmé, že u vyhořelých mřížek se nejen objevují různé vlnové délky v různých úhlech, ale různé režimy stejné vlnové délky se také objevují v mírně odlišných úhlech v důsledku jejich různých propagačních konstant.

1.3 Výroba Braggových mřížek

Existují různé techniky používané při výrobě standardních a složitých struktur Braggových mřížek v optických vláknech. V závislosti na technice výroby mohou být Braggovy mřížky označeny jako interně nebo externě psané. Přestože interně psané Braggovy mřížky nemusí být považovány za příliš praktické nebo užitečné, je důležité je uvažovat, a získat tak úplný historický náhled. Externě psané Braggovy mřížky, tj. mřížky zapsané pomocí technik, jako jsou interferometrické, bod po bodu a fázové masky, překonávají omezení interně psaných mřížek a jsou považovány za mnohem užitečnější. Ačkoli většina z těchto technik zápisu byla zpočátku považována za obtížnou z důvodu požadavků na submikronové rozlišení, a tedy i stability, jsou dnes dobře kontrolovány a zápis Braggových mřížek pomocí těchto technik je považován za běžný.[1]

1.3.1 Interně zapsané Braggovy mřížky

Vnitřně zapsané Braggovy mřížky byly poprvé demonstrovány v roce 1978 Hillem a spolupracovníky [9],[10] v jednoduchém experimentálním uspořádání znázorněném na obr.1.6. Jako zdroj byl použit argonový iontový laser, který osciloval na jednom podélném režimu při $514,5nm$ (nebo $488nm$) a vystavení fotocitlivého vlákna spojením světla do jeho jádra. Aby se zabránilo nestabilitě, byla nutná izolace argonového iontového laseru od zpětně odraženého paprsku; dále byly laserové čerpadlo a vlákno umístěny do trubky pro tepelnou izolaci. Dopadající laserové světlo interferovalo se 4% odrazem (od rozštěpeného konce vlákna), původně — aby vytvořilo vzor stojatých vln se slabou intenzitou v jádru vlákna. V bodech vysoké intenzity se index lomu ve fotocitlivém vláknu změnil natrvalo. Vznikla tedy porucha indexu lomu, která měla stejnou prostorovou periodicitou jako vzniklá interferenční obrazec. Tyto typy mřížek mají obvykle dlouhou délku (desítky centimetrů) k dosažení užitečných hodnot odraznosti díky malému indexu lomu.



Obr. 1.6: Typický aparát používaný pro generování samostatně indukovaných Braggových mřížek pomocí argonového iontového laseru. Typické odrazové a přenosové charakteristiky těchto typů mřížek jsou uvedeny v grafu.

1.3.2 Výroba mřížky pomocí interferometrické metody

Interferometrická technika výroby, která je externím přístupem pro psaní Braggových mřížek do fotocitlivých vláken, byla poprvé demonstrována Meltzem a spolupracovníky [11]. V tomto experimentu byl dopadající paprsek UV světla rozdělen do dvou paprsků, které byly následně rekombinovány, aby vytvořily interferenční obrazec, který na straně vystavil fotocitlivé vlákno a indukoval permanentní modulaci indexu lomu v jádru. Zápis Braggových vstupů v optických vláknech byl dosažen pomocí interferometrů s rozdělením amplitudy a vlnoplochy.

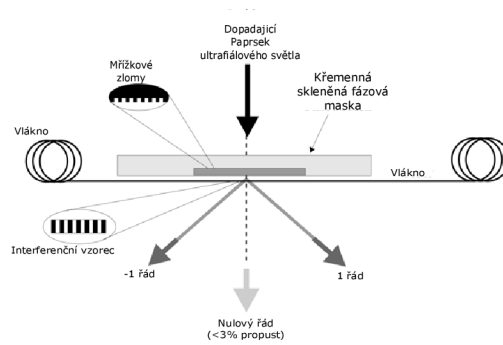
1.3.3 Metoda fázové masky

Jednou z neúčinnějších metod pro zápis Braggových mřížek do fotocitlivého vlákna je technika fázové masky [11], [12]. Tento způsob využívá difrakční optický prvek (fázovou masku) k prostorové modulaci paprsku pro zápis UV záření.

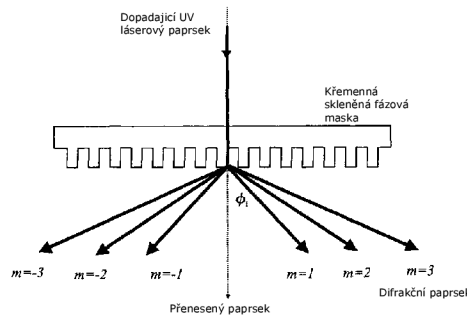
Fázová maska je vyráběna jako jednosměrný periodický povrchový obraz, s periodou Λ_{pm} , vyleptaný do oxidu křemičitého (křemenného skla). Princip této činnosti je založen na difrakci dopadajícího UV paprsku do několika řádů, konkrétně $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (Obr.1.7), kde pořadí $m = 0$ odpovídá vysílanému paprsku. Dopadající a difrakční paprsky následují obecnou difrakční rovnicí, a to

$$\Lambda_{pm} = m \frac{\lambda_w}{\sin \varphi_m - \sin \varphi_i} \quad (1.11)$$

kde φ_i je úhel dopadu, φ_m je úhel difrakčního řádu, a Λ_{pm} je vlnová délka zapisovacího UV paprsku. V jednoduchém případě, kdy je dopadající UV paprsek má normální záření ($\varphi_i = 0$), kladné a záporné řády mají stejné úhly difrakce jak tomu je na Obr. 1.8. Interference vytvořená mezi paprsky různých řádů mohou být použity k vytvoření okrajového vzoru, která může zapsat Braggovu mřížku do optických vláken. Ve většině případů se k vytvoření Braggovy mřížky používají ± 1 řády. Pro maximalizaci viditelnosti interferenčního vzoru generovaného těmito difrakčními řády je nutné potlačit všechny ostatní řády a vyrovnat sílu mezi nimi.



Obr. 1.7: Geometrická maska pro zápis Braggových mřížek v optických vláknech.

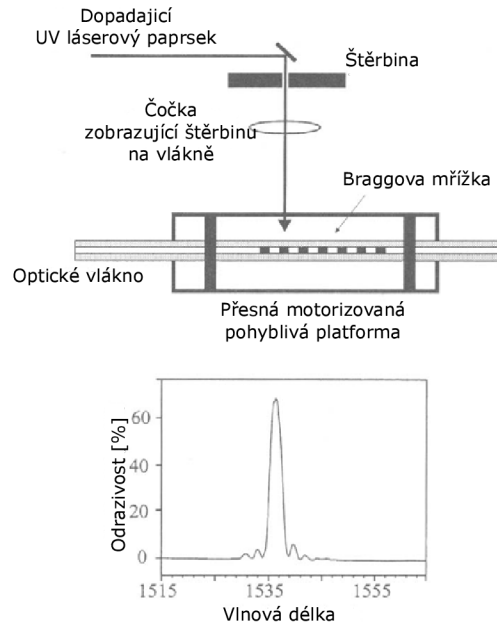


Obr. 1.8: Normálový dopadající UV paprsek rozložený na různé řády.

1.3.4 Bod po bodu

Technika bod po bodu [13] pro výrobu Braggových mřížek se provádí indukci změny indexu lomu, který odpovídá rovině mřížek jeden krok po druhém podél jádra vlákna. V takovém experimentálním uspořádání jeden puls UV světla z excimerového laseru prochází maskou, která je v daném případě šterbinou. Zaostřovací

čočka zobrazuje štěrbinu na jádro optického vlákna ze strany, jak je znázorněno na Obr.1.9. Index lomu jádra v ozařované části vlákna se proto lokálně mění. Vlákno se pak převede přes vzdálenost A , která odpovídá rozteči mřížky, ve směru rovnoběžném s osou vlákna. Tento proces se opakuje, aby se vytvořila struktura mřížky v jádru vlákna. Velmi stabilní a přesný transmisní systém submikrometrů je nezbytný pro techniku výroby bod po bodu.



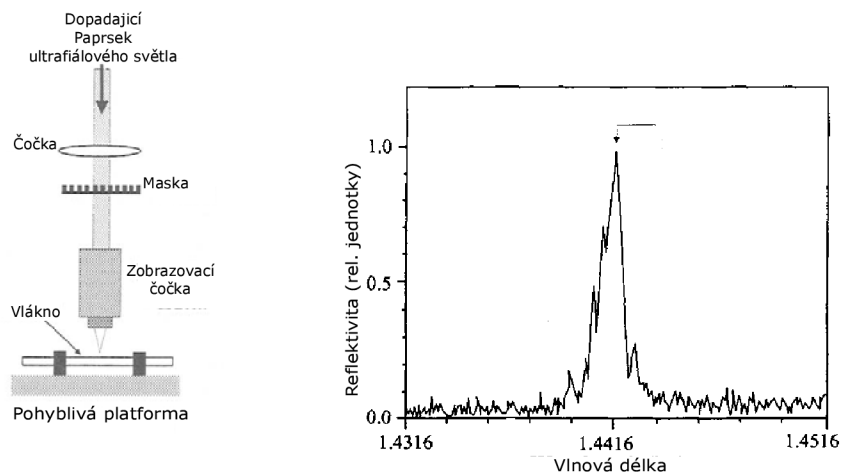
Obr. 1.9: Schéma sestavy pro výrobu Braggových mřížek pomocí techniky bod po bodu. Graf v pravém horním rohu ukazuje odrazové spektrum Braggovy mřížky třetího řádu vytvořené metodou point-by-point. Na základě [13].

1.3.5 Maskování obrazu

Kromě předchozích známých technik pro výrobu Braggových mřížek z vláken byla také ukázána projekce masky s vysokým rozlišením [14] jako prostředek k zápisu Braggových mřížek, jak je vidět na Obr.1.10. V těchto experimentech [14] byl použit standardní KrF^2 excimerový laser, generující 20ns trvající pulsy s energií přibližně $1\text{J}/\text{puls}$. Přenosová maska sestávala z řady UV neprůhledných přímých ploch s periodou pohybující se mezi 5 a $120\mu\text{m}$ na roztaveném křemičitém substrátu. Neprůhledné linie na masce byly generovány vakuově uloženým, vícevrstevným naskládaným dielektrickým materiálem s vysokou odrazivostí. Přenesený paprsek byl zobrazen na jádro vlákna pomocí vícesložkové $0,35 - NA$ čočky, vytvořené z fúзованého oxidu křemičitého, s vysokým rozlišením, která měla demagnifikační poměr

²Krypton fluoride laser

10 : 1. Demagifikace obrazu vedla ke vzniku ozařovacích toků na vláknu 100krát větším než dopad na masku. Jako hostitelský materiál bylo použito Ge-dopované Bell Northernern (CA2114) vlákno s průměrem jádra $3,6\mu m$ a rozdílem indexu lomu jádra 0,028. Vlákno bylo umístěno na počítačově řízenou transmisní fázi s submikrometrem v obrazové rovině (Obr.1.10). Při použití zobrazovacího systému byly na vlákno zaznamenány mřížkové periody 1, 2, 3, 4 a $6\mu m$ pomocí jednopulsových osvitů. Vzhledem k velkým periodám mřížek zapsaným ve vlákne, pozorování jejich spektrální reakce bylo možné pouze přes odrazy vyšších řádů. Tyto odrazy vyšších řádů z mřížek následují Braggovu podmínku $m\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$, kde m odpovídá řádu odrazu. Graf na Obr.1.10 zobrazuje odraz šestého řádu ($m = 6$), který měl šířku pásma FWHM ³ $1,5nm$ a $\sim 72\%$ odrazivost, která byla pozorována při $1,441\mu m$ z mřížky s periodou $3 - \mu m$ zaznamenané metodou projekcí masky. Úspěšně byly zaznamenány mřížkové periody až $6\mu m$.



Obr. 1.10: Schéma systému promítání masek použitého k zápisu Braggových mřížek do fotocitlivého vlákna. Graf vpravo ukazuje spektrum odrazů šestého řádu z Braggovy mřížky $3 - \mu m$. Mřížka byla zapsána jediným excimerovým laserovým pulsem. Na základě [14].

1.3.6 Laserový zdroj

Zdroje laseru používané k zápisu Braggových mřížek pomocí interferometrických technik musí mít dobrou časovou a prostorovou koherenci. Požadavky na prostorovou koherenci mohou být uvolněny v případě interferometru s amplitudovým rozštěpováním zajištěním, že celkový počet odrazů je v obou ramenech stejný. To je obzvláště kritické v případě, když se jako zdroj světla UV použije laser s nízkou

³Full width at half maximum

prostorovou koherenci, například excimerový laser. Délka koherence (časová) musí být alespoň stejná jako délka mřížky (za předpokladu, že jsou dvě optické dráhy identické), aby interferující paprsky měly dobrou viditelnost, což má za následek vysoce kvalitní Braggovy mřížky. Tento požadavek koherence spolu s požadovaným rozsahem UV vlnových délek ($240 - 250nm$, $\sim 190nm$) nutil vědce k použití velmi komplikovaných laserových systémů, jako je excimerem čerpaný frekvenčně zdvojený barvicí laser. Další laserové systémy jsou:

- Frekvenčně zdvojený barvicí laser;
- Frekvenčně-optický parametrický oscilátor;
- Úzkopásmové excimerové lasery;
- Vnitřně duté, se zdvojnásobenou frekvenci, argonové iontové lasery.

1.3.7 Speciální výrobní procesy vláknových Braggových mřížek

Kromě obecných, dříve popsaných způsobů výroby Braggových mřížek, existují další — speciální:

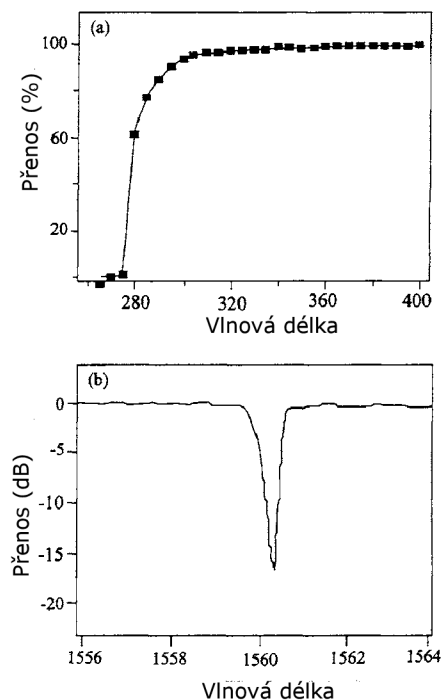
- Jednopásmový zápis vláknových mřížek;
- Zápis Braggových mřížek během kreslení vláken;
- Braggovy mřížky s dlouhými vlákny se složitými profily odraznosti;
- Difrakční mřížky s lineárně se měnící periodou;
- Mřížky s posunutou fází;
- Apodizace mřížek;
- Apodizace s amplitudovým maskováním.

1.3.8 Hydrogenace

Bez ohledu na to, která technika se používá k výrobě Braggových mřížek v optických vláknech, je vyžadováno vlákno, které je fotocitlivé na ozařovací vlnovou délku. Jak je známo vlákna, která jsou dotována vysokou koncentrací germania, jsou fotocitlivá na ultrafialové záření v rozmezí mezi $240 - 250$ a $193nm$. Bohužel standardní telekomunikační vlákna, kde se očekává, že Braggovy mřížky budou mít velké použití, nejsou fotocitlivé. Výzkum provedený na fotocitlivost standardní vlákna vedla Lemaire [15] v roce 1993, aby ohlásil novou techniku pro dosažení vysoké fotocitlivosti v normálním vlákně dotovaném GeO_2 . Tato technika zahrnovala namáčení optických vláken vysokotlakým vodíkem po dobu několika týdnů, aby se molekuly vodíku mohly rozptýlit do jádru optických vláken. Tato optická vlákna byla naložena vodíkem při vysokém tlaku mezi 500 a $1000psi$ [1].

1.3.9 Výroba Braggových mřížek přes polymerové sako

Nákladným a časově náročným krokem pro výrobu Braggových mřížek je odstranění ochranné polymerního povlaku vlákna, snížení jeho mechanické pevnosti, vystavení jádra vlákna UV záření. Jednou z metod, která se vyhýbá stripování a přebalování vláken, je výroba Braggových mřížek přímo přes polymerový povlak. Bohužel standardní polymerní vrstvy nejsou při obvyklých vlnových délkách 240 – 250 a 193nm dostatečně průhledné. Alternativním přístupem je použití světla blízkého UV záření kolem 334nm [16], což je vlnová délka, která je mnohem méně destruktivní vůči polymernímu povlaku. Kromě toho je většina standardních polymerních povlaků transparentní vůči UV záření. Starodubov a kolegové [17] nahlásil výrobu silné Braggovy mřížky s odrazivostí $> 15dB$ přes běžný polymer ve vodíkových vláknech využívajících UV záření. Tloušťka polymerního povlaku byla přibližně $40\mu m$ a koncentrace germania v jádru vlákna byla odhadnuta na 20mol%. Obr. 1.11 88a ukazuje transmisní spektrum filmu ze silikonové pryskyřice $150\text{-}\mu m$, které bylo použito k potahování vlákna, které vykazuje zanedbatelnou absorpci nad $300nm$. Obr. 1.11 88b ukazuje spektrum 7-mm dlouhé mřížky vyrobené s fázovou maskou s použitím $\sim 200mW$ Ar laserového světla při $302nm$ a 4 minutové expoziční doby.



Obr. 1.11: a) Přenosové spektrum silikonové pryskyřice o tloušťce $150\mu m$, používá se pro povlakování vláken, (b) Spektrální odezva z Braggovy mřížky zapsané prostřednictvím $40\mu m$ silného polymerního vláknitého povlaku za použití UV světla.[17]

1.4 Aplikace Braggových Mřížek v Telekomunikaci

Komunikační sítě založené na principech světelných vln umožňují vysokokapacitní propojení mezi výrobcí a spotřebiteli informací na většině míst po celém světě. Existuje zvýšená poptávka po větší šířce pásma od nových služeb a uživatelů, která stimulovala mnoho inovací v odvětví světelných vln. Braggovy mřížky se objevily jako důležité komponenty v různých aplikacích světelných vln, které pomáhají splnit tuto potřebu. Jejich jedinečné filtrační vlastnosti a univerzálnost jako vláknová zařízení jsou ilustrována jejich použitím v laserech se stabilizovanými vlnovými délkami, vláknových laserech, dálkově pumpovaných zesilovačích, Ramanových zesilovačích⁴, fázových časovačích, vlnových délkových konvertorech, pasivních optických sítích, vlnových multiplexerech, demultiplexerech, multiplexery vstup-výstup, kompenzátory disperze a ekvalizéry zisku. Tato část podrobně popisuje ty aplikace vláknových mřížek, které jsou zajímavé pro komunikaci se světelnými vlnami, buď jako pomocné komponenty (tj. mřížky pro stabilizaci vlnových délek laserové pumpy), nebo jako síťové prvky, které vykonávají kritické funkce, jako jsou multiplexery s přídatným poklesem mřížky s vlákny.

1.4.1 Vlákňové lasery

Pokroky ve vědě o materiálech umožnily dopování jádra optického vlákna s ionty vzácných zemin, které mají jak nízkou ztrátu šíření, tak zajímavé laserové vlastnosti. Tyto vlastnosti odpovídají možné laserové oscilaci při nízkých prahových hodnotách a v materiálech s nízkým ziskem (*gain*) a vhodnými vlnovými délkami pro telekomunikační aplikace. Kromě toho jsou tyto nové vláknové laserové systémy zaměřeny na splnění rostoucí poptávky po vysokorychlostních vysokokapacitních přenosových vedeních v komunikaci s další výhodou jednoduché integrovatelnosti se základními vláknovými systémy. Vývoj vláknových Braggových mřížek dále zlepšil funkčnost vláknových laserů. Schopnost začlenit mřížky do dopovaného vlákna s nízkou ztrátovou selektivitou na vlnové délce a necitlivostí na vnější poruchy udělala revoluci v technologii optických laserů. Dá se zmínit také různé režimy laserového provozu, jako jsou vláknové lasery v jednotlivém režimu s čerpáním pláště a pulsovou generací ve vláknových laserech.

1.4.2 Vlákňové zesilovače

V moderních optických komunikačních systémech největší pozornost získaly vláknové zesilovače dopované erbiem. Takovýto optický zesilovač, který pracuje v důležitém třetím komunikačním okně s nízkou ztrátou kolem $1,5\mu\text{m}$, vykazuje vysoký

⁴Založených na tzv. Romanovém jevu

zisk s nízkým požadavkem na výkon čerpadla, vysoký saturační výkon, nízký šum a nízké mezi-kanálové poruchy. Díky těmto vlastnostem, které do značné míry vycházejí z dlouhé životnosti metastabilní hladiny erbia v oxidu křemičitém, jsou vláknové zesilovače dopované erbiem dobře vhodné pro zabudované optické zesílení, natolik, že během jen několika let významně změnilo budoucnost komunikačních systémů. Kromě toho začlenění vláknových Braggových mřížek jako selektivních reflektorů pro výkon signálu a čerpadla zlepšilo účinnost, funkčnost a integrovatelnost těchto zařízení s optickými systémy. Byly také demonstrovány další zesilovače, které poskytují zesílení na různých vlnových délkách: jedním takovým systémem je Ramanův zesilovač.

1.4.3 Laserové Diody s Braggovými Mřížky

Braggovy mřížky se s laserovými diodami používají již mnoho let. Mřížka byla původně vyleptána do povrchu vláken s bočním leštěním [18]-[20]; nyní je leptána UV indukovanými Braggovými mřížky [21],[22]. Jednoduchý, ale účinný způsob řízení laserové vlnové délky je zabudováním Braggovy mřížky do copánku diodového laseru. Tato technika se příznivě porovnává s jinými typy technik zpětné vazby, jako je DFB⁵ nebo DBR⁶, a to z důvodu nízkých nákladů a jednoduchého postupu výroby. Jedním z problémů při výrobě laseru DBR je nutnost přesného řízení vlnové délky laseru. Rutinní výroba DBR laserů s vlnovou délkou specifikovanou na přesnější než 1nm je obtížná, ale Braggovy mřížky mohou být vyrobeny přesně na požadovanou vlnovou délku. S antireflexním povlakem na polovodičovém čipu může být generována vlnová délka vybrána odkudkoli v šířce pásma zesílení výběrem vhodné rezonanční vlnové délky Braggové mřížky. Je zřejmé, že takový přístup zvyšuje výtěžek (*yield (výnos, výtěžek)*) polovodičových destiček. Kromě toho, protože každý laser musí být sloučen s vláknem, Braggova mřížka může být zapsána poté, co se proces balení (*packaging process*) ukáže jako úspěšný, čímž se zkrátí doba strávená na neúspěšných produktech.

Dosud byly hlášeny tři hlavní typy vláknových mřížkových laserových diod. Za prvé, jedno-režimové lasery [21],[22], které mají mřížku umístěnou v blízkosti výstupní strany diody pro zajištění stabilního provozu s jednou frekvencí. Za druhé, režimem uzamčené lasery [20],[21], ve kterých je dioda modulována na násobku charakteristické vnější frekvence dutiny (*cavity frequency*). Za třetí, koherentně zhroucené lasery [23]-[25], kde vzdálenost mezi mřížkou a diodou je větší než délka koherence diodových režimů. Tyto laserové technologie stabilizované mřížkami mají jedinečné vlastnosti a výhody, díky kterým jsou vhodné pro specifické aplikace.

⁵Distributed feedback laser — laser s rozloženou zpětnou vazbou

⁶Distributed Bragg reflector laser — Distribuovaný laser s Braggovými mřížky

1.4.4 Základní bandpass a další typy vláknových Braggových filtrů

Filtry pásmové propusti jsou považovány za jedno z nejzákladnějších zařízení v optických sítích s více vlnovými délkami a ve většině komunikačních systémů, kde je vyžadováno demultiplexování vlnových délek. Pro výrobu těchto pásmových filtrů existuje několik technik využívajících Braggovy mřížky. Jeden přístup je založen na interferometrickém principu, kdy jsou mřížky začleněny do konfigurací Saganac [26], Michelson [27],[28] nebo Mach-Zehnder [29],[30]. Jiný přístup, založený na principu hedvábného mřížkového rezonátoru [31], byl také použit u uniformních [32] a mřížkách s lineárně se měnící periodou [33] mřížek. Dále byly vytvořeny rezonanční filtrační struktury zavedením fázového posunu do mřížky dodatečnou UV expozicí [34] nebo použitím fázové masky s posunutím fáze [35]. Obecně jsou rezonanční přenosové filtry schopné vybírat velké vlnové délky a v zásadě jsou snadno vyrobitelné a nevyžadují důkladně vyvážená ramena nebo identické mřížky, jak tomu je v případě interferometrických filtrů. Typicky mají tyto typy filtrů tendenci vytvářet úzkou pásmovou propust s relativně úzkou pásmovou zádrží, mimo kterou se filtr vrací v podstatě k celkovému přenosu.

Bylo také zkoumáno použití vícenásobných fázových posunů k vytvoření vícenásobných pásmových propustí [36]. Hrubší schopnost rozlišování vlnových délek byla dosažena pomocí jednoduchých metod, včetně maskování amplitudy pro odstranění centrální části širokopásmové chirped mřížky během expozice [37], za použití dvou širokopásmových odrazových mřížek v sérii, které jsou vybrány tak, aby jejich odraz spektra se nepřekrývaly [38] a nekombinovaly s filtry.

1.4.5 Multiplexery a demultiplexery s dělením vlnové délky

Vzhledem k tomu, že se telekomunikační provoz zvyšuje díky rychlému nárůstu používání telefonů, faxů, počítačových sítí a internetu, bude muset vláknová kapacita držet krok. Multiplexování s rozdělením vlnové délky je slibným řešením pro zvýšení kapacity dálkových telekomunikačních spojení. Multiplexní systémy lze porovnat s dálničním dopravním systémem, který má více pruhů pro provoz: poskytuje více vlnových délek pro přenos optických signálů současně prostřednictvím vlákna.

Komunikační systémy s optickými vlákny, které používají techniky multiplexování a demultiplexování s dělením vlnové délky (WDM/D — *wavelength-division multiplexers/demultiplexers*), vyžadují nízké ztráty, kompaktní, stabilní a spolehlivé komponenty, které lze použít jako filtry pro upuštění nebo vložení kanálu s vlnovou délkou [39],[41].

WDM/D lze rozdělit do dalších tří skupiny:

- **WDM s Braggovou mřížkou jako dělič s taveným vláknem.** Jedna z prvních demonstrací WDM využívající vlákna Braggova vlákna byla představena Mizrahi a kolegy [38]. Koncepce tohoto demultiplexeru je jednoduchá a skládá se z jediného komerčního roztaveného vláknového rozdělovače 1x4 následovaného filtrem pro přenos mřížky vláken v každém z výstupních portů. Filtry byly navrženy tak, aby jedna vlnová délka prošla každým portem, zatímco odmítly tři sousední signální kanály. Spárováním mřížek, jejichž vlnové délky se nepřekrývají, bylo možné vytvořit jednoduchý pásmový propustný filtr, ve kterém každá ze dvou mřížek odmítla široký rozsah vlnových délek, ale požadovaná vysílací vlnová délka prošla beze změn mezi mřížkovými pásmovými zádrží.
- **Interferometrický WDM.** Vláknové Braggovy mřížky jsou ideálním základním komponentem pro interferometrické WDM, protože kromě zajištění vysoké odraznosti na vlnových délkách specifikovaných návrhářem se zanedbatelnými přenosovými ztrátami pro ostatní mohou být přesně duplikovány. To umožňuje výrobu identických Braggových mřížek, které jsou potřebné pro interferometrické WDM.
- **Neinterferometrický WDM.** Ačkoli multiplexery s dělením vlnových délek interferometrického typu prokázaly některé vynikající vlastnosti, mají také některé nevýhody, například potřebu jemného doladění ramen interferometru, vysoké náklady a výrobní obtíže. Alternativy k těmto WDM jsou založeny na neinterferometrických systémech.
 - Multiplexer s přídavným oddělovačem polarizačního paprsku
 - Frustrovaný navazující připojovací multiplexer
 - Cirkulační připojovací multiplexer s Braggovými mřížkami

1.4.6 Multiplexování hustých vlnových délek s dělením

Multiplexování s hustou vlnovou délkou (DWDM), stejně jako v případě WDM, se používá k oddělení nebo kombinování komunikačních linek ve formě různých vlnových délek. Rozdíl mezi těmito systémy (jak název napovídá) leží v kanálovém odstupu: DWDM má více kanálů na jednotku vlnové délky. V důsledku malého kanálového rozestupu ukládají husté multiplexovací sítě s vlnovou délkou přísné požadavky na komponenty v systému. Jedním nákladově efektivním zařízením, které bylo vyvinuto pro splnění těchto požadavků, je hybridní zařízení, které kombinuje Braggovy mřížky a pásmové filtry potažené dielektrickou vrstvou s kanálovým odstupem $0,4nm$.

1.4.7 Kompenzace disperze

Jedním z hlavních problémů, ke kterému dochází u jednovidových optických vláken, která zpomaluje konečný výkon v optických komunikačních systémech, je chromatická disperze, která způsobuje, že různé složky vlnových délek datového pulzu se pohybují při různých skupinových rychlostech. To způsobuje rozšíření signálového impulzu a zvýšení frekvenci vzniku bitových chyb. Se zvyšujícími se rychlostmi síťových dat je hlavním omezujícím faktorem výkonu chromatická disperze ve standardních jednovidových vláknech. Při relativně nízké datové rychlosti 2,5Gbit/s lze signál vysílat bez výrazných ztrát až do 1000km. Tato vzdálenost však klesá na 60km při 10Gbit/s a 15km při 20Gbit/s. Kromě toho je velká část již nainstalovaného vlákna optimalizována pro přenos při 1,31 μ m. Tento typ vlákna vykazuje vysokou chromatickou disperzi řádově 17ps/(nm km), když se používá k přenosu na běžně používané telekomunikační vlnové délce 1,55 μ m, což se kryje s operační vlnovou délkou vláknových laserů a zesilovačů dopovaných erbiem.

Jsou dva známé způsoby řešení:

- **Kompenzace disperze za pomoci reflexních Braggových mřížek.** Quellette [42] poukázal na to, že mřížky s lineárně závislou periodou mohou nabídnout velkou, stálou disperzi přes šířku pásma dostatečnou pro podporu takových pulsů. Základním principem činnosti je to, že různé složky vlnové délky rozšířeného pulsu se odrážejí od různých míst podél Braggovy mřížky.
- **Vysokorychlostní přenos na velkou vzdálenost.** Dálkový přenos při vysokých bitových rychlostech oproti standardním telekomunikačním vláknům při 1,3 μ m je velmi zajímavý kvůli velké základně takových vláken již nainstalovaných v zemi, jejichž životnost může být užitečně prodloužena. Nízká ztráta těchto vláken spolu s pohotovou dostupností dopovaných erbiem vláknových zesilovačů činí z okna 1,55 μ m atraktivní oblast provozu. Rozptyl těchto vláken je však v tomto okně relativně velký, což značně omezuje přenosové vzdálenosti, pokud se nepoužijí kompenzační techniky, jako jsou mřížky s lineárně závislou periodou.

1.4.8 Časovač optické vláknové fáze

Časování optické fáze přitahovala značnou pozornost díky jejímu použití na kompenzaci chromatické disperze a nelinearity v komunikačních systémech s optickými vlákny pomocí techniky inverze středního spektra 1 [43],[44] (obrácení optického signálu kolem středu jeho rozpětí). V důsledku toho je rozptylem indukované zkreslení signálu z první poloviny rozpětí zrušen rozptyl ve druhé polovině. Existuje také zájem o fázový časovač kvůli jeho potenciální aplikaci při přeměně vlnové délky pro budoucí multiplexované optické sítě s rozdělením vlnové délky.+

1.4.9 Fazována anténní mřížka s kontrolou generování paprsku

Použití vláknové optiky k implementaci skutečného časového zpoždění anténních systémů s mikrovlnným fázovým polem bylo zkoumáno mnoho let [45],[46]. Skutečné časové zpoždění se používá namísto jednoduchých technik fázového posunu v aplikacích se širokopásmovým přenosem, aby se zabránilo výskytu šilhání (*squint*) paprsků v extrémních frekvenčních skenování. Ačkoli prevenci lze realizovat nahrazením fázově posunujících se mikrovlnných vlnovodů s přepnutými délkami elektrického vlnovodu nebo kabelu, takové komponenty mají vysokou ztrátu při vysokých rf frekvencích a jsou náchylné k elektrickým přeslechům a změnám časového zpoždění indukovaného teplotou. Naproti tomu optické sítě pro řízení skutečného časového zpoždění jsou lehké, kompaktní, odolné vůči elektromagnetickému rušení a přeslechům a mohou nabídnout výrazně nižší přenosové ztráty a vyšší kapacitu šířky pásma signálu. Použití sítí pro vytváření paprsků optických vláken pro přenosové vedení jak pro komunikační, tak pro radarové antény může proto překonat mnoho problémů spojených s elektrickými sítěmi pro řízení skutečného časového zpoždění a může se stát levnou alternativou k nim.

1.5 Senzory s Braggovými mřížkami

Vláknové Braggovy mřížky jsou považovány za vynikající sensorové prvky, které jsou vhodné pro měření statických a dynamických veličin, jako je teplota, deformace a tlak [47]. Zásadní výhodou spočívá v tom, že informace o měřené veličině je kódována vlnovou délkou (absolutní veličina), čímž se sensor odkazuje na sebe a činí jej nezávislým na kolísajících hladinách světla; proto je systém imunní vůči ztrátám zdroji energie a konektorů, které trápí mnoho jiných typů sensorů optických vláken. Z toho vyplývá, že jakýkoli systém, který obsahuje Braggovy mřížky jako sensorové prvky, je potenciálně imunní vůči rušení. Jejich velmi nízká ztráta vsunutí a úzkopásmový odraz vlnových délek nabízejí pohodlné sériové multiplexování podél jediného jedno-režimového optického vlákna. Mezi další výhody Braggových mřížek oproti tradičním elektrickým tenzometrům patří lineární odezva na mnoho řádů velikosti, odolnost vůči elektromagnetickému rušení (EMI), nízká hmotnost, flexibilita, stabilita, vysoká teplotní tolerance a dokonce odolnost vůči prostředím s vysokým zářením (ztmavnutí vláken). Navíc mohou být Braggovy mřížky snadno zabudovány do materiálů, aby poskytovaly lokální detekci poškození, stejně jako mapování interních deformačních polí s vysokou lokalizací, rozlišením deformací a rozsahem měření. Braggova mřížka je důležitou součástí pro vývoj technologie inteligentních struktur, přičemž aplikace se objevují také v řízení procesů a v leteckém průmyslu.

Klíčovým problémem detekce je stanovení často malých posunutí vlnových délek

vyvolaných měření. Představujeme řadu demodulačních schémat, která byla studována pro dynamická i statická měřená pole, která mohou být široce klasifikována do pasivních a aktivních (kde mřížka tvoří nedílnou součást laserové dutiny) geometrii senzorů a která se nejčastěji aplikují na bodové senzory. Avšak v aplikacích, jako je distribuované snímání, mají senzory s optickými vlákny obecně a Braggovy mřížky zejména hranu nad elektromechanickými senzory. Proto popisujeme, jak sestavy senzorů s Braggovými mřížky (BGS) lze zformovat do několika architektur, které mohou být vyslýchány technikami WDM nebo multiplexováním s časovým dělením (TDM), které byly použity u „tradičních“ senzorů s optickými vlákny. Pokud jsou WDM a/nebo TDM kombinovány s multiplexováním s prostorovým dělením (SDM), lze realizovat velké sensorové soustavy. To, že mřížky lze psát na dobře definovaných vlnových délkách a pracovat v rozsahu specifickém pro danou aplikaci, je činí nejvhodnější pro WDM techniky. Existuje však další důležitá kategorie senzorů, kde je mřížka použita jednoduše jako reflexní značkovač, demodulovaný pomocí tradiční optické reflektometrie v časové oblasti (OTDR). Konečně, realizace extrémně dlouhých mřížek umožnila novou implementaci intramřížkového snímání BGS, která nabízí příslib vysoce lokalizovaného namáhání v reálném čase.

2 Technické textilie

2.1 Přehled technických textilií

Definice technických textilií byla přijatá v seznamu Textile Terms and Definitions publikovaným Institutem textilu[55] je „textil a výrobky vyráběné především pro jejich technické a funkční vlastnosti, spíše než pro jejich estetické nebo dekorativní vlastnosti“.

Po mnoho let byl termín „průmyslový textil“ široce používán pro zahrnutí všech textilních výrobků jiných než těch, které jsou určeny pro oděv, domácnost a vybavení pro konečné použití.

Toto použití se zdálo být stále nevhodnější vzhledem k vývoji aplikací textilu pro lékařské, hygienické, sportovní, dopravní, stavební, zemědělské a mnoho dalších jasně neprůmyslových účelů. Průmyslové textilie jsou nyní častěji považovány za podskupinu širší kategorie technických textilií, konkrétně se odkazují na ty textilní výrobky používané při výrobě operací (jako jsou filtry, strojní oděvy, běžící pásy, brusné substráty atd.) nebo které jsou zabudované do jiných průmyslových výrobků (jako jsou elektrické součásti a kabely, flexibilní těsnění a membrány nebo akustická a tepelná izolace pro domácí a průmyslové spotřebiče).[48]

Sektor technických textilií představuje významnou část světové textilní výroby a obchodování. Výzkum podaný australskou zprávou v této oblasti naznačuje, že až 40% spotřeby vláken v rozvinutých zemích je ve výrobě technických textilií[49]. Tyto země vykazují dobrou tendenci v odvětví technických textilií zejména kvůli:

- Stále se zpřísňujícím ekologickým předpisům
- Potřebě ve zvýšené energetické účinnosti a využití odpadu
- Vysokému výkonu
- Faktorům životních nákladů
- Měnícím se potřebám stárnoucí populace
- Zvýšenému zaměření na volný čas

2.1.1 Oblasti použití technických textilií

V závislosti na různých druzích odvětví, kde se používají technické textilie, lze je zařadit do několika skupin. Klasifikační systém byl vyvinut společností *Techtextil*, Messe Frankfurt Exhibition GmbH[50] a aktivně se používá v Evropské Unii, Severní Americe a Asii. *Techtextil* uvádí 12 oblastí použití:

- **Agrotech** — Pletené textilie se široce používá pro mnoho zemědělských konečných použití, včetně rostlinných sítí, slunečních clon, větrných štítů, sběrných sítí a sítí pro ochranu plodin před ptáky.

- **Buildtech** — Stavební textilie se používají v: betonářských výztužích, fasádových základových systémech, vnitřní konstrukcích, izolacích, izolačních materiálech, klimatizaci, prevencí hluku, vizuální ochraně, ochraně před sluncem, bezpečnostních stavbách.
- **Clottech** — Technické textilie pro oděvní aplikace. Zejména v procesu povrchové úpravy, kde je textilie ošetřována pod tlakem a vysokou teplotou, technická textilie podporuje textilií pro hladké zpracování. Obvykle se jedná o směs polyesteru, modalu, viskózy, nylonu atd.
- **Geotech** — Používají se při zesílení násypů nebo při stavebních pracích. Tkaniny v geotextiliích jsou propustné tkaniny a používají se s půdami, které se mohou oddělit, filtrovat, chránit nebo vypouštět.
- **Homotech** — Textilie používané v domácím prostředí — dekorace interiéru a nábytku, koberce, ochrana před sluncem, ohnivzdornost, polštáře, podlahové a stěnové krytiny, textilem vyztužené konstrukce/součásti.
- **Indutech** — Textilie používané pro chemické a elektrické aplikace a textilie související se strojírenstvím. Sítotisk, filtrace, plazmové obrazovky, pohonná technika, zvedací/dopravní zařízení, zvukotěsné prvky, tavicí procesy, kryty válečků, technologie broušení, izolace, těsnění, palivový článek.
- **Medtech** — Výrobky Medtech zahrnují materiály používané v oblasti hygieny, zdraví a osobní péče, jakož i v chirurgických aplikacích: chirurgické roušky, připevnění chirurgických pomůcek, chirurgické oděvy, textilie pro obvazy a ortopedická zařízení atd.
- **Mobiltech** — Tyto textilie se používají při stavbě automobilů, železnic, lodí, letadel a kosmických lodí. Příkladem jsou potahy nákladních automobilů (PES (Polyester) textilie potažené PVC (Polyvinylchlorid)), potahy kufrů automobilů (často plstěné jehly), upevňovací pásy pro upevnění nákladu, potahy sedadel (pletené materiály), bezpečnostní pásy, netkané textilie pro filtraci vzduchu v kabině (také pokryté Indutechem), airbagy, padáky, čluny (nafukovací), balóny.
- **Oekotech** — Nové aplikace textilií v aplikacích na ochranu životního prostředí — podlahové těsnění, ochrana proti erozi, čištění vzduchu, prevence znečištění vody, čištění vody, zpracování/recyklace odpadů, výstavba depozitní oblasti, těžba produktu, domácí kanalizace.
- **Packtech** — Balení, síla, kontejnery, tašky, vázací popruhy, plachty, kryty, velkoprostorové stany.
- **Protech** — Hlavním cílem technických ochranných tkanin je zlepšit bezpečnost lidí na jejich pracovištích. Patří mezi ně osobní ochranné prostředky (OOP), které chrání před vysokými teploty (izolační, hasiči), popáleninami (plamen, konvekční a sálavé teplo, hasiči, oblast ATEX), výboji s elektrickým

obloukem (výbuch plazmy, elektrické společnosti), nárazy roztaveného kovu (slévárny), kovovými jiskry (svařování), kyselým prostředím (petrochemické, plynové, rafinerie, chemické), rázovými střelami (vojenské, bezpečnostní), proříznutím (rukavice, sklářský průmysl), sem také patří astronautické obleky, pakety pro zbytky stravy.

- **Sportech** — Boty, sportovní vybavení, sportovní létání a plachtění, horolezectví, rybaření, jízda na kole, zimní a letní sporty, halové sporty, kde se použití se může lišit od všeho včetně sportovních tašek.
- **Architech** — Textilní architektura znamená budování tahových struktur s textilem, lany a ocelí.
- **Military textiles** — Ochranné textilie pro bojovníky s ochranou proti plameni, systémem balistické ochrany zahrnující pancéřování těla, přilbu, jaderný, biologický a chemický oblek a maskovací oděv.
- **Autotech** — Automobilový textil jsou oděvní textilie, které se široce používají v dopravě, jako jsou automobily, vlaky, autobusy, letadla a námořní vozidla. Pojem automobilová textilie označuje všechny typy textilních součástí, např. vlákna, filameny, příze a textilie používané v automobilech.
- **Smartech** — Smart textilie neboli Chytrý textil jsou textilie určené k detekci a reakci na specifické podmínky v jejich prostředí pomocí jedné nebo více z následujících metod: Bio-Chemické Technologie, Mechanické Inovace.
- **Wearable computers** — nositelné počítače, také označovány jako inteligentní textilie, má obrovskou škálu aplikací, počínaje technologií „druhé kůže“, která se dokáže přizpůsobit prostředí a jednotlivci, až po schopnost léčit zraněné vojáky.

2.2 Materiály technických textilií

Technické textilie jsou vyráběny z různých vláken/filamentů na základě požadovaných vlastností konečného produktu. Použitá vlákna/filameny mohou být široce klasifikována jako přírodní nebo umělá. Přírodní vlákna jsou důležitými surovinami pro technický textilní průmysl. Přírodní vlákna používaná převážně v technických textiliích zahrnují: bavlnu, jutu, hedvábí a kokosové vlákno. Umělá vlákna a příze z umělých vláken představují přibližně 40% podíl na celkové spotřebě vláken v textilním průmyslu jako celku. Tato vlákna tvoří klíčovou surovinu pro technický textilní průmysl kvůli svým přizpůsobitelným vlastnostem. Mezi klíčová umělá vlákna, filameny a polymery používané jako suroviny v technických textiliích patří: viskóza, polyester (PES), nylon, akryl/moderní akryl, polypropylen a polymery jako polyetylen o vysoké hustotě, polyetylen o nízké hustotě (LDPE) a polyvinylchlorid (PVC).

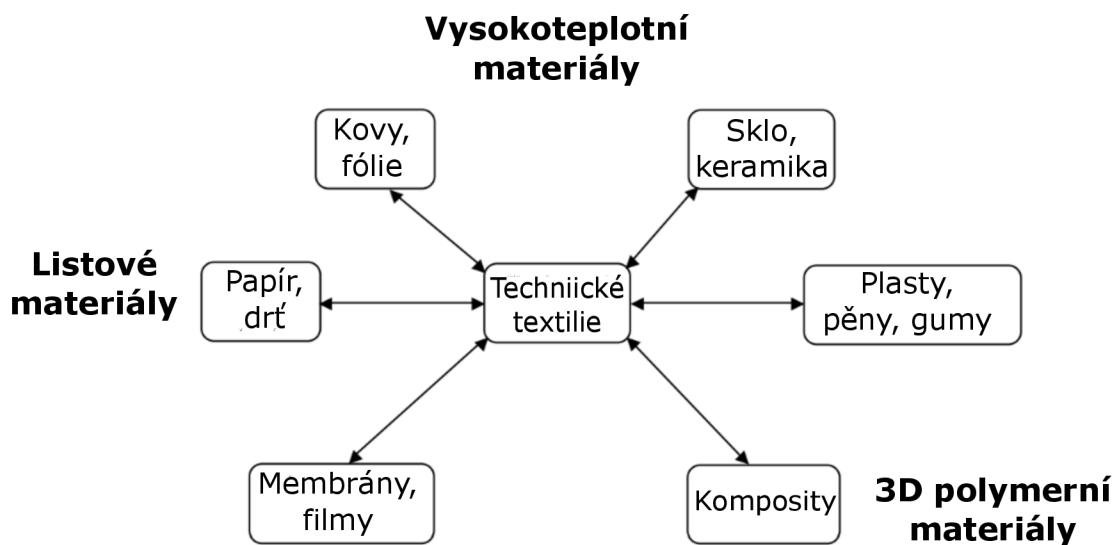
Na výsledné vlastnosti textilií velký vliv mají fyzikální a chemické vlastnosti materiálu z kterého jsou vytvořeny. V průmyslu kompozitních materiálů jsou nyní tkané, pletené, netkaná a vinutá vláknová výztuž vyrobená ze skla, uhlíková vlákna a organické polymerní materiály, jako jsou aramidy, všeobecně přijímány jako technické textilní výrobky. Na druhé straně jsou často vyloučeny volněji strukturované výztužné materiály, jako je například sekaná rohož z vláken, mleté sklo a rozvlákněná organická vlákna.

Netkaný průmysl se vyvinul z několika různých technologických směrů, včetně výroby papíru. Současná definice netkané textilie vyhlášené například podle normy Mezinárodní organizace pro normalizaci *ISO 9092* uznává řadu hraničních oblastí, včetně produktů pokládáných za mokra a extrahovaných výztuží a sítí. Stejně tak rozdíly mezi textilními vlákny a filamenty, štěrbinovými nebo vláknovými filmy, monofilamenty a extrudovanými plasty se nevyhnutelně se vyvaří na některé docela libovolné a umělé kritéria. Průměr šířky se často používá jako definující charakteristika, bez ohledu na použité technologie nebo konečná použití. Mnoho definic a kategorií zahrnutých do existujících průmyslových statistik odráží spíše historické rozdělení hlavních výrobních odvětví než funkční nebo tržní pohled na dotčené produkty.

Polymerní membrány, kompozitní materiály a extrudované mřížky a sítě jsou další produkty, které zpochybňují tradiční představy o rozsahu technických textilních materiálů, procesů a výrobků. Technické textilie si stále častěji najdou své místo v širším odvětví a na trhu „flexibilních inženýrských materiálů“^{2.1}. Řada společností a skupin již tento pohled přijala a působí přes hranice tradičních průmyslových odvětví se zaměřením na rozsah materiálů, technologických procesů a schopností produktů na specifické funkce a trhy, jako je filtrování a zdravotnictví. [48]

2.3 Výroba technických textilií

Jak je známo způsoby výroby textilií se neustále vyvíjí již od XVII století. Technologický vývoj ale spolu s růstem potřeby lidstva v osobním komfortu a bezpečí vytvořily předpoklady vzniku textilií technických. Dnešní věk poskytuje ty nejinteligentnější úspěchy současnosti, a můžeme pozorovat výsledky starých, základních principů, které fungují až do teď ale s využitím toho nejlepšího a nejchytřejšího. Podle struktury (absence struktury) dá se rozdělit procesy výroby textilií do dvou hromadných skupin.



Obr. 2.1: Rozsah flexibilních inženýrských materiálů.

2.3.1 Tkané textilie

Textilní tkaniny jsou nejčastěji tkané, ale mohou být také vyráběny pletením, plstěním, šněrováním, síťováním, netkanými procesy a všíváním nebo kombinací těchto procesů. Většina tkanin je dvourozměrná, ale vyvíjí se a vyrábí se stále více trojrozměrných tkaných technických textilních struktur.

Tkaniny se obvykle skládají ze dvou sad přízí, které jsou vzájemně propleteny a leží vzájemně kolmo k sobě. Vlákna, která probíhají po celé délce textilie, se označují jako osnovní konce, zatímco nitě, které probíhají od okrajů k okrajům, tj. Z jedné strany na druhou stranu textilie, jsou vybírané útky. Často jsou jednoduše označovány jako konce a háčky. V trojosých a trojrozměrných tkaninách jsou příze uspořádány odlišně.

Tkaní

Současně existují dva typy tkaní — dvourozměrné (2D) a třírozměrné (3D). Tradiční 2D tkací proces vyžaduje, aby dvě sady ortogonálních přízí, osnova a útek byly prokládány a protínány v pravém úhlu. Na druhou stranu 3D tkaní zahrnuje tři ortogonální sady přízí, vrstvy osnovy a útku se prokládají ve směru tloušťky vázáním osnovních nebo útkových přízí. Proces jednosměrného odlévání se používá ve 2D tkaní s jednoduchou nebo více vrstvami osnovních přízí, zatímco ve 3D látkách se používá tlustá plošná deska nebo pevná forma s obousměrným odlupováním.

Pomocí 3D tkaní mohou být vyráběny složité přípravky ve tvaru sítě, aby se snížily náklady na materiál a čas manipulací, což nakonec přináší lepší mechanické

vlastnosti. 3D tkané kompozity mají vyšší deformační napětí než ve srovnání s 2D lamináty. Mechanické vlastnosti 3D kompozitů po nárazu jsou lepší než u 2D. Vysoký balistický dopad a dopady s nízkou rychlostí jsou životně důležité rysy 3D tkaných kompozitů, které vedou k odolnosti proti poškození. [51]

Pletení

Pletací technologii lze definovat jako konverzní systém, ve kterém jsou smyčky příze vzájemně propojeny za vzniku textilního povrchu. Struktura tkaniny je založena na pletených smyčkách a v závislosti na oblasti aplikace mohou být do struktury integrovány další strukturální prvky, jako jsou útkové nitě, osnovní nitě, netkané textilie (např. maliwatt technika atd.), aby se zvýšily vlastnosti tkaniny. [52]

Pletení může provádět jeden z těchto strojů:

- Osnovní pletací stroj — Osnovní pletené textilie lze vyrábět na strojích pro spojování švů Raschel, trikotů, háčkování a proplétacích strojích.
- Kruhové pletací stroje — Kruhové pletací stroje mohou provozovat několik pletacích systémů najednou a jsou tedy vysoce produktivní.
- Ploché pletací stroje — Počítačem ovládané moderní ploché pletací stroje nabízejí individuální výběr jehel a stojan na jehly. Tyto dvě vlastnosti umožňují plně módní a nekonečné možnosti výroby 3D úpletu s komplexní geometrií.

2.3.2 Netkané textilie

Více než dvě třetiny netkaných textilií se vyrábí pro technické účely. Definice netkaných textilií je dána normou ISO 9092 zveřejněnou v roce 1988. Nicméně, podle Americké společnosti pro testování materiálů (ASTM D 1117-80) — „Netkaná textilie je textilní struktura vyrobená spojováním nebo vzájemným propojením vláken nebo obojího, provedené mechanickými, chemickými, tepelnými prostředky nebo prostřednictvím rozpouštědel a jejich kombinacemi. Termín nezahrnuje papír nebo tkaniny, které jsou tkané, pletené nebo vsívané.“ Je třeba uznat, že tato definice není příliš přesná, ale byla vybrána, protože zahrnuje mnoho důležitých tkanin, které většina lidí považuje za netkané textilie, ale které jsou vyloučeny podle ISO 9092. Netkané textilie stále rostou ve své významnosti; objem produkce roste rychlostí 11 % ročně.

Jednou z hlavních výhod výroby netkané textilie je to, že se obvykle provádí v jednom nepřetržitém procesu přímo od suroviny k finální tkanině, i když s tím existují určité výjimky. To přirozeně znamená, že náklady na výrobu jsou nízké, protože není třeba manipulace s materiálem, jako je tomu u starších textilních procesů. Přes tento přístup hromadné výroby může průmysl netkaných textilií vyrábět velmi širokou škálu vlastností tkanin od otevřených vat vhodných pro izolaci obsahující pouze,

kde vlákna obsahují jen 2 až 3 % celého objemu až po tuhé vyztužující textilie, kde obsah vláken může být vyšší než 80 % objemu. [48]

Thermo-formování

Tepelné tváření je proces konsolidace materiálu do vhodného tvaru produktu působením tepla; v závislosti na typu vlákna a objemové frakci je často možné materiál určený k opětovnému použití vyčistit. Tato metoda byla doporučena pro několik produktů jako vhodný způsob recyklace termoplastického kompozitu. [53]

Nanotechnologie

Nanotechnologie v textilním průmyslu se používá v polymerních materiálech pro výrobu konvenčních vláken, jako jsou PES (Polyester), PA (Polyamid) a PP (Polypropylen) v nano měřítku. Způsobem výroby nanotextilních produktů jsou nanovlákna, která se vyrábějí elektrostatickým zvlákňováním. V tomto procesu předení vlákna jsou vyráběna s rozměry nano-měřítku. Dalším způsobem výroby nanovláken je rozdělení zvlákňování, které zahrnuje rozdělení vlákna na několik menších vláken, ale tento proces se vyvíjí až do teď.[54]

Paření příze

Autokláv (pára a tlak ve vsádkovém procesu), superba (stálá pára a tlak) a suessen (suché teplo). To umožňuje příze zachovat si svůj tvar a kroucení. Příze se pak obvykle využívá pro výrobu koberců. [56]

Konečná úprava (textile finishing)

Konečná úprava textilu rozhoduje o konečném vzhledu a estetických vlastnostech textilního materiálu. Kromě toho může podle potřeby spotřebitele měnit různé fyzikální a chemické vlastnosti textilních materiálů. Textilie jsou vyráběny ze širokého spektra vláken, přízí a textilních struktur. Na takových rozmanitých platformách čelí odborníci úpravného řemesla skutečné výzvě, aby v žádoucí míře dodaly žádoucí textilní vlastnosti. Rozsah povrchové úpravy textilu je v některých případech měřitelný, zatímco ve velkém počtu případů je povrchová úprava spojena se smyslovými orgány a je velmi subjektivní. Povrchové úpravy se většinou používají ve směsích a je obtížné je identifikovat a standardizovat. [57]

2.4 Přehled aktuálního stavu trhu technických textilií

Velikost globálního trhu s technickým textilem byla v roce 2019 odhadnuta na 176,6 miliard USD, přičemž v období od roku 2020 do roku 2027 vzrostla při složeném ročním tempu růstu o 4,5 %. Předpokládá se, že vzrůstající povědomí o výhodách technického textilu bude zvyšovat jeho poptávku v různých průmyslových odvětvích, jako je zemědělství, stavebnictví, letectví, zdravotnictví a balení. Pokroky v biotechnologii vedly k rychlé změně a vývoji tradičních zemědělských metod k vědeckějšímu přístupu. Očekává se, že zavedení a využití vysoce účinných technologií v zemědělském průmyslu zvýší úrodu plodin, což ovlivní celkovou produktivitu a poptávku po technických textiliích.

2.4.1 Přehled průmyslu

Technologie 3D tkaní představovala v roce 2019 podíl na trhu 23,9 % a předpokládá se, že od roku 2020 do roku 2027 jeví roční přírůstek 4,2 %. Mnoho průmyslových odvětví včetně zemědělství, zdravotnictví, průmyslu, obalů, letectví a automobilového průmyslu implementují technologie 3D tkaní, která pravděpodobně povede k růstu segmentu.

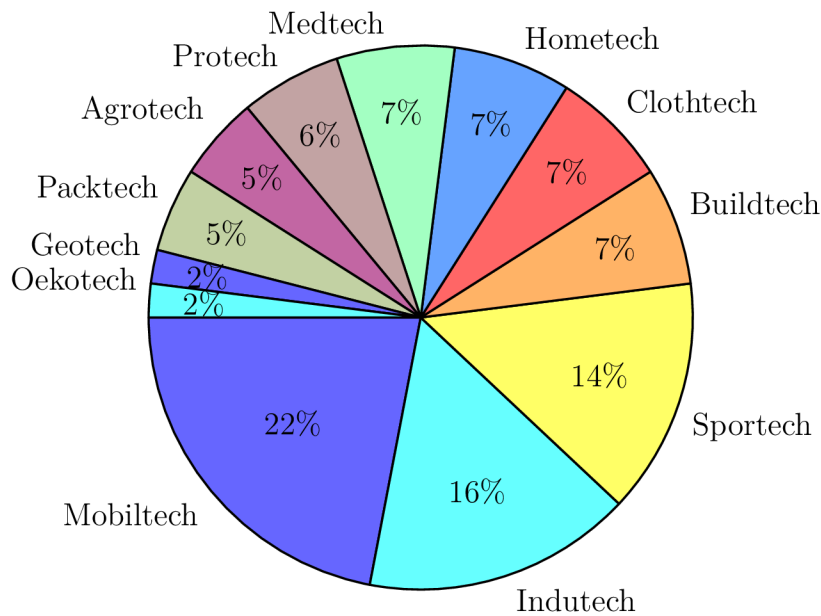
Technologie 3D pletení pomáhá při řízení trojrozměrného pletení útku a rozměrů zjištěných v pletených strukturách. Kromě toho tato technologie také umožňuje změny a vylepšení uživatelského rozhraní, což má za následek efektivnější a výkonnější návrhy pletených výrobků. Očekává se, že během prognózovaného období bude poháněn růst trhu technických textilií.

Při výrobě produktu se stále více používají dokončovací ošetření, aby se zlepšil vzhled, klížení, ovlivnění dotyku a ošetření, které přidávají vlastnosti pro zvýšení výkonu produktu. Kromě toho eliminuje nečistoty a přísady, čímž zvyšuje přijatelnost produktu v aplikačních segmentech.

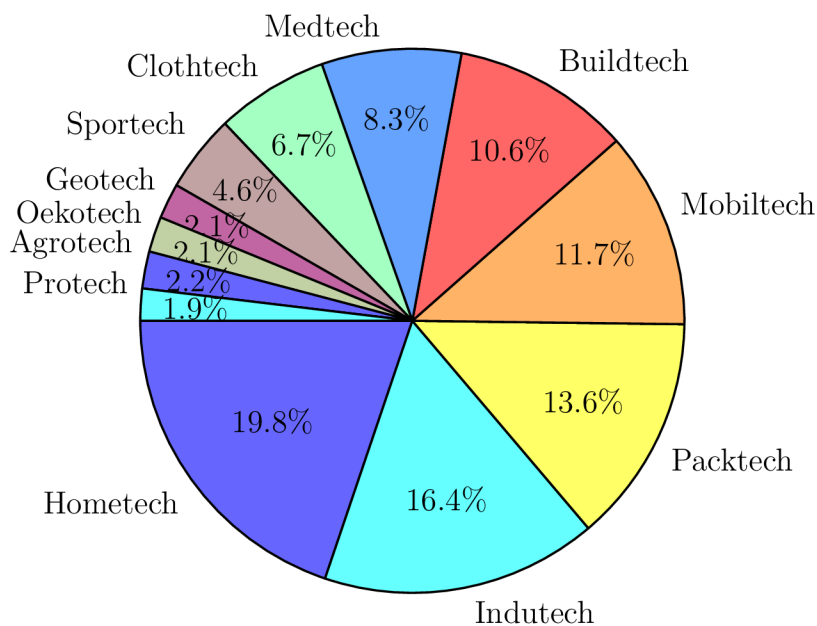
Použití nanomateriálů, jako jsou nanočástice a nanovlákná, při výrobě technických textilií pomáhá při výrobě produktů s vynikající mechanickou pevností, antibakteriálními vlastnostmi, chemickou odolností a odpuzováním vody. Kromě toho použití nanotechnologií ve výrobě produktů zlepšuje jejich vlastnosti, jako je trvanlivost, textura a barva.

2.4.2 Přehled oblastí použití

Analýza, která bude uvedena níže, je založena na datech analytické zprávy o trhu technických textilií sestavené ze zdroje Grand View Research [63]. Pro stanovení trendů na trhu byly zváženy dvě zprávy — za roky 2018 (Obr. 2.2) a 2019 (Obr. 2.3).



Obr. 2.2: Podíl trhu technických textilií podle oblastí použití v roce 2018.



Obr. 2.3: Podíl trhu technických textilií podle oblastí použití v roce 2019.

Segment Mobiltech textilu představoval nejvyšší tržní podíl 22 % z hlediska tržeb v roce 2018 . Nejnižší podíl v témže roce patřil k Oekotech a Geotech segmentům. V minulém roce ale bylo vidět, že segment Hometech textilií vzrostl až do 19,8 % a předpokládá se, že od roku 2020 do roku 2027 jeho složená roční míra růstu (CAGR) dosáhne ve výši 5,2 %. Z toho lze předpokládat, že globální spotřeba posunula pozornost od přepravy zboží k tvorbě zboží pro lidská obydlí.

Také je vidět, že druhé místo stále patří segmentu Indutech, třetí místo ale šlo od Sportechu k Packtechu. Vzhledem k rostoucí poptávce po ochraně životního prostředí lze tyto statistiky snadno pochopit.

Dále přichází dříve zmíněný segment Mobiltech, který posunul segment textilu určeného pro stavebnictví na páté místo v tomto hodnocení. To znamená, že rozvoj v těchto oblastech nebyl zastaven, ale pouze změnil prioritu a ponechal ji momentálně relevantnějším aspektům.

2.4.3 Přehled regionů

Na trhu dominoval region Asie a Tichomoří, který v roce 2019 představoval 45,9 % podílu na výnosech. Očekává se, že trend dominantního postavení v regionu bude v prognózovaném období (2020-2027) pokračovat.

Očekává se, že expanze bytových, komerčních a průmyslových sektorů z důvodu udržitelného ekonomického růstu v regionu podpoří stavební činnosti, čímž se v prognózovaném období zvýší poptávka po produktech. Rozkvět cestovního ruchu navíc přivedl ke zvyšujícím se požadavkům na restaurace, letoviska a potravinové řetězce, což podnítilo růst trhu s technickým textilem.

Očekává se, že v Evropě bude v prognózovaném období na trhu zaznamenán exponenciální růst z důvodu rostoucí poptávky po výrobcích v domácích a módních a oděvních oblastech. Kromě toho se očekává, že zvyšující se zdravotní péče, lékařská turistika a rostoucí stárnoucí populace v evropských zemích budou pohánět trh s technickým textilem v regionu.

Očekává se, že rostoucí rezidenční sektor kvůli rostoucí míře přistěhovalectví bude zvyšovat poptávku po stavitelských textilech (Buildtech). Kromě toho je pravděpodobné, že rostoucí investice do rozvoje infrastruktury podpoří poptávku po celtovinách, markýzách a kupolích v nové výstavbě i při renovačních činnostech.

3 Lepidla

Pro splnění zadání dané práce je nezbytné zvolit nejvhodnější druh (popř. model) lepidla, který by dokázal vytvořit spolehlivou, pevnou ale stále dobře ohebnou strukturu sestavenou z několika vrstev technických textilií.

Lepení různých materiálů vzniká díky vytvoření adhezivní¹ vazby mezi adhezivní fólií a povrchy materiálů, které mají být spojeny. Pevnost lepeného spoje závisí na adhezi lepidla, lepených povrchů, soudržnosti adhezivního filmu a vlastností lepených materiálů. Lepené materiály by měly být dobře navlhčeny lepidlem, pevně přiléhat k sobě a mít maximální spojovací povrch. Toho je dosaženo zvláštním zpracováním spojovaných povrchů (mechanické čištění, odmaštění, zdrsňení atd.) a konstrukcí lepených dílů, přičemž se bere v úvahu větší lepicí plocha a práce lepicí spáry s příznivým rozložením zatížení, tj. střiháním nebo rovnoměrným roztržením, spíše než ohýbáním nebo loupáním. Typicky adheze lepidla k lepenému povrchu přesahuje soudržnost uvnitř adhezivního filmu, takže je žádoucí získat adhezivní šev minimální tloušťky. K lepení dochází v důsledku ztuhnutí adhezivního filmu, odpařování rozpouštědla z adhezivního roztoku, ochlazení pod bod tání tavného lepidla nebo v důsledku chemických přeměn adhezivních složek. [64]

Lepidla lze rozlišovat podle povahy hlavní složky, čímž se izolují anorganická, organická nebo organoelementová lepidla.

3.1 Anorganická lepidla

Anorganická lepidla jsou tepelně nejstabilnější ze všech dosud známých adhezivních systémů. Mnoho z nich odolá působení vysokých teplot (až do 3000 °C), udržuje vysoké izolační vlastnosti při vysokých teplotách, při práci ve vakuu nevypouští plynné látky. Tato lepidla však mají nízké pevnostní vlastnosti (3-5 MPa) a mají určitou křehkost, proto je nelze použít pro konstrukci. Navíc v zásadě jde o alkalické nebo kyselé kompozice, což omezuje možnost jejich použití pro lepení některých materiálů.

Anorganická lepidla zahrnují kapalná skla (vodné roztoky křemičitanu sodného a draslíku) a keramická lepidla (vodné suspenze kompozic obsahujících alkalických kovů a kovů alkalických zemin). Tekutá skla se používají k lepení celulózových materiálů, keramická lepidla — pro lepení kovů a keramiky.

- **Metalická lepidla** — sloučeniny, které se připravují za použití různých kovů. Složení lepidla zahrnuje tekutý kov a prášky žáruvzdorných kovů. Jsou to pastovité přípravky a jsou schopné tuhnout při nízkých teplotách.

¹schopnost přenosu tečných sil ve styku dvou povrchů bez zřetelného pohybu

- **Fosfátová cementová lepidla** — jsou vysoce plněné pastovité systémy zelené barvy. V mnoha cementových lepidlech se jako plniva používají nitridy, silicidy a karbidy. Jsou také známy případy zavedení jemně rozmělněných prášků různých kovů do složení cementových lepidel. Použití směsi plniv umožňuje upravit dobu vytvrzování cementových lepidel, koeficient lineární tepelné roztažnosti, adhezivní a kohezivní vlastnosti a mnoho dalších charakteristik.
- **Silikátová lepidla na bázi sodíku** — K lepení dochází při pokojové teplotě. Vytváří se adhezivní film, který je velmi křehký a nestabilní vůči vodě. Aby se zvýšila odolnost proti vodě, může být adhezivní spoj udržován při 100 °C (průměrně 2 hodiny) nebo může být do kompozice přidána sloučenina hliníku.

3.2 Organická lepidla

Organická lepidla zahrnují kompozice na bázi přírodních a syntetických polymerů. Při výrobě lepidel na bázi přírodních polymerů používají: látky živočišného původu — produkty zpracování vnitřní vrstvy kůže, kostí a šupin (kolagen), krve (albuminu) a mléka (kasein); rostlinného původu — gumy, pryskyřice, škrob, dextrin, přírodní kaučuk, gutaperča, kukuřičná bílkovina a sójový kasein. Lepidla na bázi přírodních polymerů se používají pro lepení dřeva, papíru, kůže, textu, materiálů atd. Mají nízkou odolnost vůči působení mikroorganismů a vody. Ve velkém měřítku jsou do značné míry nahrazeny syntetickými lepidly. Pro výrobu syntetických lepidel se používá většina syntetických polymerů vyráběných v průmyslovém měřítku. Tyto lepidla poskytují vysokou přilnavost různých materiálů, jsou odolné vůči vnějším faktorům a jsou široce používány pro lepení kovů, skla, keramiky, plastů, dřeva, textilu, celulózy a dalších materiálů (viz karbamidové lepidlo, polyakrylová lepidla, polyuretanová lepidla, gumová lepidla, fenolová aldehydová lepidla, epoxidová lepidla). [64]

3.3 Organoelementová lepidla

Organoelementová lepidla se vyrábějí na bázi organokřemíku, organoboronu, organokovových a jiných polymerů. Lepidla této skupiny mají velmi vysokou tepelnou odolnost a tepelnou stabilitu (poskytují vysokou pevnost spoje různých materiálů během krátkodobého zahřívání na teploty řádově 1000 °C a vyšší a vydrží dlouhodobé zahřívání při 400-600 °C). Organoelementová lepidla se používají pro lepení kovů, grafitu, žáruvzdorných plastů atd. Nejběžněji se používají organokřemičitá lepidla. [64]

4 Návrh chytré textilie

V této praktické části se popíše celý postup návrhu chytré textilie v její finálním tvaru. Popis se dotýká takových důležitých bodů, jako je výběr lepidla, textilu a struktur pro vrstvení různých druhů technických textilií. Během všech fází praktické části se vždycky používaly dva různé druhy textilie — tkaná a netkaná.

Tkaná textilie sloužila jako vnější ochranná vrstva proti vnějším účinkům, a v každém případě byla použita stejná tkanina. Zatímco netkaná textilie byla určena k zajištění bezpečnosti optického kabelu uschovaného mezi vrstvami, a byla testovaná v různých variacích materiálů a tloušťky materiálů.

4.1 Volba vhodného lepidla

V této fázi byly vyzkoušeny lepidla různých druhů od různých výrobců. Hlavními kritérii pro hledaného kandidáta byly pevnost spoje, maximální hodnota síly, kterou textilie vydrží, než se začnou navzájem odloupávat, a také ohebnost. To znamená, že danou etapu prošly ty exempláře, které dokázaly vytvořit dobré spojení dvou druhů textilií, přičemž výsledná dvouvrstvá struktura zůstala ve flexibilním stavu a byla dobře manipulovatelná.

Tady se vytvářely spoje mezi jednou vrstvou textilie tkané, o rozměrech 100x100x1 mm, a jednou vrstvou textilie netkané, o rozměrech 100x100x3 mm.

Síla, působící k rozlepení dvou vrstev textilií, byla měřena přístrojem **Sauter FK 1K** v Newtonech. Příznak dobré ohebnosti se zjišťoval empiricky s tím, že v případě špatného efektu je to hned cítit podle tvrdosti výsledného vzorku. Dosazené výsledky jsou uvedeny v Tab. 4.1.

Na základě výsledků bylo pro následné testování vybráno 5 kandidátů 4.1:

1. DISPERCOLL D2 — jednosložkové polyvinylacetátové disperzní lepidlo na dřevo.
 - + Lepidlo má dobrou spojovací schopnost (23 N výdrž).
 - + Spojená textilní struktura má dobrou ohebnost.
 - + Lepidlo má bílou barvu, proto není vidět jeho přítomnost.
 - Jak se zjistilo na další etapě, má horší spojovací schopnosti pro tlustší tkaniny s hrubším vláknem.
 - Pokud budeme mít na paměti vytvoření budoucího experimentálního vzorku o větší velikosti, bude nanášení lepidla štětcem velmi časově náročné a neefektivní. Má smysl uvažovat o jiných metodách použití materiálu na textil.
2. HERKULES — univerzální lepidlo pro domácnost, školy, kancelář a domácí dílnu.



Obr. 4.1: Lepidla, která prošla první etapou selekce.

- + Lepidlo má dobrou spojovací schopnost (21 N výdrž).
- + Spojená textilní struktura má dobrou ohebnost, o trochu horší, než struktura, která byla vytvořena pomocí lepidla DISPERCOLL D2.
- + Lepidlo taky má bílou barvu, což je výhodou pro konečný pohled výrobku.

Tab. 4.1: Výsledky testovaných lepidel v první fázi.

Lepidlo	Max naměřená síla [N]	Míra ohebností	Způsob nanesení
DISPERCOLL D2	23	Nadprůměrná	Štětce
HERKULES	21	Nadprůměrná	Štětce
Uniflex V7510	21	Střední	Štětce
BISON KIT	19	Malá	Štětce
Alkaprén 25 Plus	18	Nízká	Štětce
TimeBond	14	Střední	Štěrka
LUKOPREN N 8200	8	Nízká	Štětce
3M Super 77	0,5	Střední	Spray
UHU Spray	0,5	Střední	Spray
UHU Por	0	Střední	Štětce
UHU POWER TRANSPARENT	0	Střední	Štětce
APEKO V1306	0	Střední	Štětce

- Časově náročné nanesení pomocí štětce.
3. Uniflex V7510 — disperzní lepidlo na korek a parkety.
 - + Lepidlo má dobrou spojovací schopnost (21 N výdrž).
 - + Spojená textilní struktura má docela dobrou ohebnost, ještě ale o trochu horší, než struktura, která byla vytvořena pomocí lepidla HERKULES.
 - Lepidlo má béžovou barvu, což už má vliv na konečný pohled výrobku.
 - Lepidlo je hustší, než předchozí, a potřebuje mnohým větší čas pro úplné uschnutí (do několika hodin).
 4. Alkaprén 25 Plus — lepidlo na nesavé materiály.
 - + Lepidlo má dobrou spojovací schopnost (18 N výdrž).
 - Spojená textilní struktura má nejhorší ohebnost ze všech vybraných exemplářů.
 - Lepidlo má žlutou barvu, bez ohledu na tloušťce nanesené vrstvy.
 - Lepidlo je velice husté. Je možnost rozředit příslušným lepidlem, avšak hromadné nanesení pouhým štětcem je problematické.
 5. TimeBond — víceúčelové nastavitelné lepidlo pro přesné polohování.

- + Lepidlo má stále dobrou spojovací schopnost (14 N výdrž).
- + Spojená textilní struktura má dobrou ohebnost.
- + Lepidlo se dobře nanáší stěrkou, což umožňuje nanášet velice jemnou vrstvu.
- Lepidlo má bledě žlutou barvu, což je také vidět na konečném výsledku, ale ne ve stejném rozsahu jako u lepidla Alkaprén 25 Plus.

4.2 Volba vhodné struktury a lepidla

V této fázi se testovaly lepidla, které měly dobré výsledky v předchozí etapě. Cílem bylo sestavit vícevrstvé struktury „sendvičového“ typu. Byly zvolené dva typy struktur: trojvrstvá, skládající se ze dvou vrstev tkané textilie a jedné vrstvy netkané textilie umístěné mezi nimi; čtyřvrstvá, skládající se ze dvou vrstev tkané textilie a dvou vrstev netkané textilie mezi nimi. Pro každou strukturu byly vyzkoušeny netkané textilie o různých tloušťkách — 0,5 mm, 1 mm, 2 mm a 4 mm.

Také byl vyzkoušen systém pro nástřik barev **Bosch PFS 1000 ??** u některých z lepidel. Zde se taky měřila maximální hodnota úsilí, kterou vytvořena struktura dokázala vydržet, než se začala odlepovat. Jelikož se v případech obou typů struktur spojovaly stejné textilie, jen v trochu odlišných pořadích, výsledky měření byly stejné. Proto jsou uvedeny v jedné Tab. 4.2.

1. DISPERCOLL D2, nanesení štětcem.

- + Zase prokázal dobré spojovací vlastnosti.
- + Spojené textilní struktury také mají dobrou ohebnost.
- Pro spojení tlustších textilií má mírně horší spojovací schopnosti, a taky se zhoršuje ohebnost výrobku.
- Protože potřebujeme dosáhnout co nejtenčí vrstvy naneseného lepidla, zdá se, že práce se štětcem je časově velmi náročná.

2. DISPERCOLL D2, nanesení stříkacím systémem.

- + Spojovací schopnosti jsou stále dobré, jen o něco málo horší, než při způsobu nanesení štětcem, kvůli tomu, že nanesená vrstva je tentokrát významně tenčí.
- + Lepší ohebnost vůči výrobku s lepidlem naneseném štětcem.
- + Má lepší spojovací vlastnosti pro tlustší textilie, kvůli tomu, že stříkáním se dokáže nanést rovnoměrnější vrstva lepidla.
- + Stříkací metoda je velice pohodlná a spolehlivá, vůči metodě natírání štětcem.

3. HERKULES, nanesení štětcem.

- + Lepidlo má dobrou spojovací schopnost, skoro stejnou jako je u lepidla DISPERCOLL D2.

- + Spojená textilní struktura má dobrou ohebnost.
 - Časově náročné nanesení pomocí štětce.
 - Trochu delší doba uschnutí, než je tomu u lepidla DISPERCOLL D2.
4. HERKULES, nanesení stříkacím systémem.
- + Vyhovující spojovací schopnost, jen o něco málo horší, než u metody nanesení štětcem.
 - + Lepší ohebnost vůči výrobku s lepidlem naneseném štětcem.
 - + Pohodlnější proces nanesení lepidla.
 - + Kratší doba uschnutí, než u metody nanesení štětcem.
5. Uniflex V7510.
- + Dobré spojovací vlastnosti.
 - ± Spojená textilní struktura má docela dobrou ohebnost v případě tenších textilií. Avšak, u tlustších textilií ohebnost je významně horší.
 - Lepidlo je velice husté a náročné pro hromadné nanesení štětcem. Je možné nanášet lepidlo válcem, ale v tomto případě je těžší kontrolovat hustotu nanesení.
6. Alkaprén 25 Plus, nanesení štětcem.
- + Lepidlo má dobré spojovací vlastnosti, ale jsou podprůměrné. Tentokrát byl pokus nanést tenčí rozředěnou vrstvu, proto výsledky jsou horší, než u předchozí fáze.
 - Kvůli tomu, že hromadné nanášení lepidla je velice nepohodlné, pokus byl pozastaven po výrobě dvou vzorků.
 - U tlustších textilií se významně snižuje ohebnost.
7. Alkaprén 25 Plus, nanesení stříkacím systémem. V tomto pokuse lepidlo bylo rozředěno příslušným ředidlem v doporučeném poměru — 0,5 dávky ředidla na 1 dávku lepidla. Pokus ale byl neúspěšný, protože i v rozředěném stavu je lepidlo stále velice husté na stříkací systém, který byl použit. Místo rovnoměrného plošného stříkání bylo nanesení bodových tříští.
8. TimeBond — víceúčelové nastavitelné lepidlo pro přesné polohování.
- + Lepidlo má dobré spojovací vlastnosti.
 - + Výrobky mají dobrou ohebnost.
 - ± Způsob nanesení stěrkou je docela pohodlný, dá se dosáhnout velice tenké vrstvy naneseného materiálu. Avšak, při uvažování cíle práce vyrobit konečný vzorek 1x1 m, tento způsob je méně pohodlný, než metoda stříkání.
 - Pro tlustší textilie lepidlo má malý účinek.

Na konci dané fáze bylo rozhodnuto, že kandidatury lepidel *TimeBond*, *Alkaprén 25 Plus* a *Uniflex V7510* budou staženy z další účasti na vývoji chytré textilie. Protože lepidla *DISPERCOLL D2* a *HERKULES* mají skoro stejné výsledky, kde je druhé horší než to první pouze v malém rozsahu, *DISPERCOLL D2* bylo zvoleno

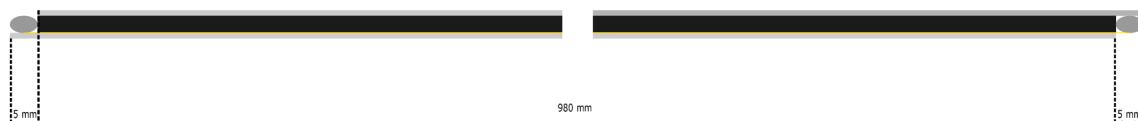
jako prioritní varianta. Zatímco *HERKULES* zůstalo v projektu jako možnost zálohy v případě, že první skončilo.

Obě dvě „sendvičové“ struktury se prokázaly jako dobře ohebné, a také mohly by poskytnout dobré ochranné vlastnosti optického kabelu v perspektivě. Proto bylo rozhodnuto, že oba typy struktur budou využité

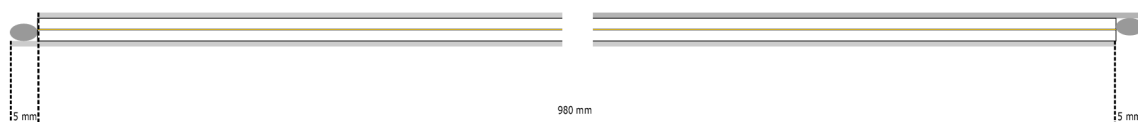
Na závěr této fázi se vyrobil předběžný testovací vzorek o rozměrech 0,5x0,5 m. Byl vyzkoušen kompresor **STANLEY DN 200/8/6** ?? v kombinaci se stříkáací pistolí **STANLEY 161132XSTN** ??, za předpokladu, že větší výkon kompresoru poskytne rovnoměrnější nanos lepidla za kratší čas. Pokus byl úspěšný a bylo rozhodnuto o použití kompresoru pro výrobu konečné chytré textilie.

4.3 Výroba konečné chytré textilie

V závěrečné fázi návrhu chytré textilie byly vyrobeny dva vzorky. Bylo obdrženo dva optické kabely s čtyřmi mřížky na každém kabelu, vlastnosti mřížek jsou uvedeny v Tab.4.3. Délka kabelu byla navržena výrobcem pro výrobek o rozměrech 990x990 mm, proto chytrá textilie se musela přizpůsobit daným parametrům. Schémata dvou použitých textilních struktur jsou zobrazeny na Obr. 4.2 a Obr. 4.3.



Obr. 4.2: Schéma třívrstvé struktury chytré textilie s netkanou textilií o tloušťce 4 mm.



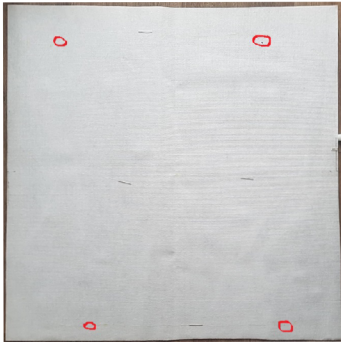
Obr. 4.3: Schéma čtyřvrstvé struktury chytré textilie s dvěma vrstvami netkané textilie o tloušťce 2 mm.

Za prvé byly nachystané jednotlivé vrstvy budoucích textilních struktur. Každý kus netkané textilie odpovídal rozměrům 980x980x1 mm, zatímco každý přípravek netkané textilie příslušné tloušťky měl plošné rozměry 980x990 mm.

U třívrstvé struktury (Obr. 4.3) kabel s mřížkami byl umístěn mezi spodní vrstvou tkané textilie a prostřední vrstvou netkané textilie. Prostřední vrstva má odstup od levého kraje 5 mm tak, aby se dalo přichytit budoucí konektor ke spodní vrstvě. Horní vrstva tkané textilie byla zarovnána zleva s prostřední a překrývala ji zprava

taky o 5 mm. Takováto struktura umožní spojování více kusů chytrých textilií pro vytvoření delších vedení.

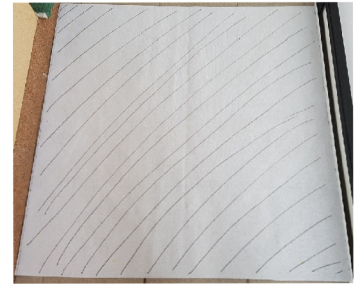
Prostřední výsledky jsou zobrazeny na Obr. 4.4.



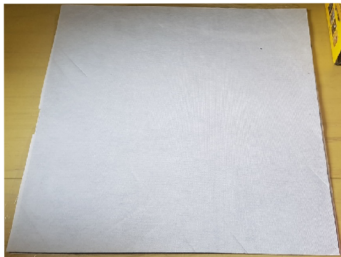
(a) Rozmístění kabelu na textilií. Kroužky vyznačují polohy samotných mřížek



(b) Místo pro konektor.



(c) Druhá vrstva před nanesením lepidla. Čáry jsou naneseny pro identifikaci již ošetřeného povrchu.



(d) Hotový výrobek.

Obr. 4.4: Výroba chytré textilie

U čtyřvrstvé struktury (Obr. 4.2) vrstvení se provádělo za stejného principu pro umožnění spojování více kusů, s jediným rozdílem, že kabel byl umístěn mezi dvěma netkanými textiliemi pro lepší ochranu před vnějšími účinky.

Tab. 4.2: Výsledky testovaných lepidel v sekci 4.2.

Lepidlo	Síla spoje kombinace tканé-netkané textilií [N]				Síla spoje kombinace netkané-netkané textilií [N]				Způsob nane- sení
	0,5 mm	1 mm	2 mm	4,5 mm	0,5 mm	1 mm	2 mm	4,5 mm	
DISPERCOLL D2	25,5	23	16	17	25	24	17	17,5	Štětec
DISPERCOLL D2	21	21	18	19	23	23	19	19,5	Stříkací systém
HERKULES	24	22	4	0	24	24	0,5	0	Štětec
HERKULES	20	20	13	12	23	23	12	14	Stříkací systém
Uniflex V7510	20	19	21	10	15,5	13	7	5	Štětec
Alkaprén 25 Plus	-	9,5	5	-	-	-	-	-	Štětec
TimeBond	19	21	16,5	13	20	22	18	15	Stěrka

Tab. 4.3: Vlastnosti Braggových mřížek.

FBG č.	Centrální vlnová délka [nm]
1	1531,152
2	1535,536
3	1541,391
4	1545,928

5 Měření závislosti vlnové délky FBG na její teplotě

Měření závislosti vlnových délek jednotlivých Braggových mřížek na jejich teplotě pomocí laboratorního zařízení ÚTKO. Za současných podmínek v době psaní dané bakalářské práci podařilo se změřit vlastnosti pouze jednoho vzorku, což je třívrstvá struktura. Měření druhého navrženého vzorku se provede nad rámcem dané práce a jeho výsledky budou poskytnuté fakultě.

Pro dané měření z jednoho konce vzorku byl přimontován konektor typu LC/APC, přes něhož se kabelem procházel světelný signál vygenerovaný generátorem. Všechna data procházela datovou sběrnici *PXI-6251* a analyzovala se softwarem *LabVIEW 2012* běžícím na počítači založeném na čipu *ACPI x64*.

Pro pozorování dynamiky změny vlnové délky mřížek v závislosti na teplotě každá mřížka se postupně ohřívala horkovzdušnou pistolí ve vzdálenosti 36 cm od výrobku výstupní teplotou 200 °C. Ohřívání se trvalo 30 sekund od začátku měření, pak dalších několik sekund (15-30) se pozorovala doba setrvačnosti zahřátých mřížek. Během hlavního měření se taky pozorovala teplota povrchu textilního výrobku pomocí digitálního teploměru **TENMA 72-8732**. Počáteční referenční teplota pro každou mřížku v každém případě byla 20 °C, když povrchová teplota textilie byla naměřena jako 30 °C, což se o trochu liší od skutečnosti, ale je to dáno nepřesností použitého teploměru o které se vědělo již před začátkem měření.

Měření se provedlo pro dvě různé mřížky zabudované do třívrstvé chytré textilie z obou dvou stran za předpokladu, že vliv teploty na každou stranu se bude lišit. Hodnoty všech 4 měření jsou vyneseny do grafů 6.1a-6.1d.

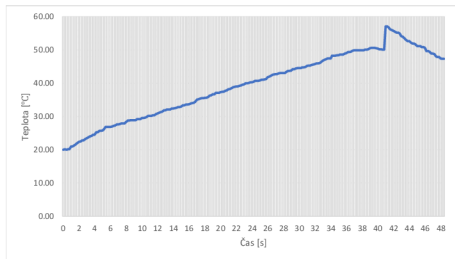
6 Výsledky bakalářské práce

Hlavním výsledkem této práce jsou vytvořené vzorce inteligentních textilií — jedna struktura třívrstvá s využitím 3mm netkané textilie, a jedna struktura čtyřvrstvá s využitím dvou kusu 2mm netkané textilie. Jeden ze vzorku se podařilo změřit a pozorovat změnu teploty jednotlivých Braggových mřížek v čase, spolu se změnou jejich vlnových délek. Této závislosti jsou vyneseny do grafů 6.1.

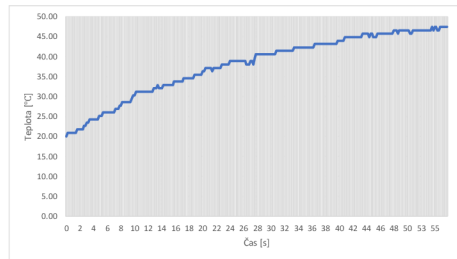
Z grafů je vidět, jak se teplota jednotlivé mřížky měnila v čase za působením horkovzdušnou pistolí. V každém případě se ohřívání zastavilo v době 30 s, potom co zvyšování teploty mřížek ještě nějakou dobu trvalo. To je dáno výměnou tepelné energie mezi mřížkami a přilehlými vrstvami textilií, která trvá, až se rozdíl jejich teplot nevyrovná.

Ve stejném čase se také měnila vlnová délka mřížky. Hodnoty extrémů a maximálních odchylek od klidového stavu je v Tab. 6.1. Odsud je vidět, že i když se vezme v úvahu chyba měřicích přístrojů, změna teploty mřížek není tak kritická jako změna teploty na povrchu textilie. To naznačuje, že vzorek má dostatečné ochranné vlastnosti proti tepelným účinkům.

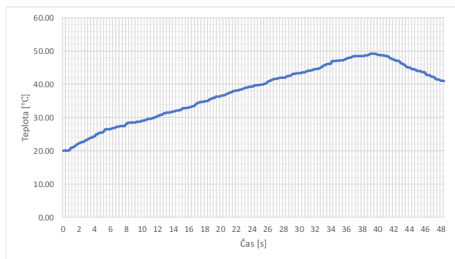
Žádná z mřížek neměla hodnotu vlnové délky za klidového stavu odpovídající hodnotám uvedeným výrobcem. Nejspíše je to dáno tím, že při výrobě chytré textilie jednotlivé vrstvy se mohly mírně natahovat, což působilo vzniku mechanického napětí. Taky je vidět, že za klidového stavu jednotné mřížky mají různé vlnové délky podle toho, na které straně ležel výrobek. Jelikož plocha, na které se provádělo měření nebyla úplně rovná, proto mohly vzniknout nestejnomyšlnosti na povrchu textilie. Tímto se vznikalo další mechanické napětí.



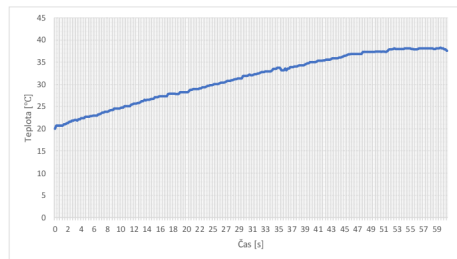
(a) FBG č.1, zahřívání ze spodní strany.



(b) FBG č.1, zahřívání z horní strany.



(c) FBG č.3, zahřívání ze spodní strany.



(d) FBG č.3, zahřívání z horní strany.

Obr. 6.1: Závislost vlnové délky FBG na teplotě.

Tab. 6.1: Extrémy změn vlnových délek a teplot během měření jednotlivých FBG.

FBG	Vlnová délka [nm]			Teplota mřížky [°C]			Teplota povrchu [°C]			
	min	max	$2 \Delta\lambda$	min	max	ΔT_{FBG} [pm]	min	max	ΔT_{pov} [°C]	
FBG č.1	zespoda	1530,786011	1530,833984	47,973	20	50,1	30,1	30	70,2	40,2
	zhora	1530,819946	1530,884033	64,087	20	49,2	29,2	30	71,4	41,4
FBG č.3	zespoda	1541,359985	1543,771973	411,988	20	44,7	24,7	30	68	38
	zhora	1541,050049	1541,307983	257,934	20	38	18	30	69	39

Závěr

Cílem bakalářské práce byl teoretický rozbor problematiky senzorických elementů založených na vláknových Braggových mřížkách (FBG) a rozbor problematiky technických textilií. První kapitola se kompletně věnuje rozboru otázky Braggových mřížek. Tam se probraly základní principy mřížek, jejich typy, způsoby výroby a také oblasti použití. Bylo stanoveno, že základní vlastnost FBG, která nachází své použití v tolika různých aplikaci, je nastavitelná odrazivost vstupního světelného signálu. Druhá kapitola se věnuje rozboru problematiky technických textilií. Tam se probraly základy dané oblasti, materiály, z nichž se nejčastěji vyrábějí technické textilie různých druhů; způsoby výroby a také se byl vyhodnocen aktuální stav globálního trhu technických textilií.

Dalším cílem byl návrh implementace senzorických vláken do vrstvené struktury technických textilií a základní měření pro ověření funkčnosti navržené chytré textilie. Hlavně se tady věnovalo volbě vhodných textilií, lepidel a struktury konečného výrobku. V důsledku výběru, který proběhl v několika fázích, byly vyzkoušeny 12 různých lepidel, 5 různých typu textilií o různých tloušťkách, 2 typy vrstvených struktur a 4 způsoby nanesení lepidla. Na konci byly vybrány obě vyzkoušené vrstvené struktury s využitím jednoho typu tkané textilie a dvou typu netkané textilie; jedno primární lepidlo a jedno náhradní; jeden nejvhodnější způsob nanesení lepidla. Navržené struktury mají dobré spojovací vlastnosti a jsou dobře ohebné. Jedna ze struktur prošla základním měřením, kde se ověřilo, že senzorické elementy na základě vláknových Braggových mřížek mají závislost na teple a mechanickém napětí (viz kapitolu **Výsledky bakalářské práce** 6). Veškeré výsledky měření byly vyneseny do příslušných grafů a tabulek. Některé z průběžných výsledků fáze volby vhodných materiálů jsou zachycené na fotografiích (viz Obr. 4.4c a Obr. 4.1).

Vzhledem k podmínkám práce na projektu, zejména v pracovním prostoru, nemá konečný výsledek nejlepší možnou kvalitu. Při neexistenci dostatečného prostoru pro práci s textilem o velikosti 1x1 m byly okraje textilie velmi často nerovnoměrné. Netkané textilie byly někdy vystaveny nadměrnému napětí nebo naopak — na nich se objevily nerovnosti, které způsobily další mechanické napětí celého výrobku, což také ovlivnilo vlnové délky Braggových mřížek. Avšak se podařilo vytvořit prototyp vhodný pro kontrolní měření, který může také sloužit jako dobrá pomoc při vytváření již kvalitních výrobků pro praktické použití.

Literatura

- [1] OTHONOS, A. a KALLI, K. *Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Boston, Mass.: Artech House, c1999, xiv, 422 p. ISBN 08-900-6344-3.
- [2] Lam, D. K. W. a Garside, B. K. *Characterization of single-mode optical fiber filters*, Appl. Opt., vol. 20, pp. 440-445, 1981.
- [3] Russel, P. St. J., Archambault, J. L., a Reekie, L.: Fiber gratings, Physics World, October 1993 issue, 41—46 (1993).
- [4] HELÁN, R. *Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] MIKEL, B. a HELÁN, R. *Design and fabrication of fiber Bragg gratings for vertical cavity surface emitting laser diodes. Advanced Laser Technologies 2006*. April 25, 2007, č. 660607. DOI: 10.1117/12.729505.
- [6] OPTE.IMATTE.CZ: *Optoelektronika v telekomunikacích a senzorice* [online]. 2011 [cit. 2013-10-29]. Dostupné z:
<<http://opte.imatte.cz/teorie/fbg-mrizky/10-fbg-mrizky/>>
- [7] SHU, X. a SUGDEN, K. *Transmissive in-fiber Fabry-Perot etalons as tunable dispersion compensators and dispersion-slope compensators*. Optics Letters. 2003, vol. 28, issue 20. Dostupné z:
<<http://dx.doi.org/10.1364/ol.28.001897/>>
- [8] URBAN, F. *Měřicí pracoviště pro analýzu vlastností vláknových mřížek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2012. 54 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [9] HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., a KAWASAKI, B. S. *Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication*. Appl. Phys. Lett. 32, 647 (1978).
- [10] KAWASAKI, B. S., HILL, K. O., JOHNSON, D. C., a FUJII, Y. *Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers*. Opt. Lett. 3, 66 (1978).
- [11] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn *Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method*. Opt. Lett. 14, 823 (1989).

- [12] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, a J. Albert *Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask*. Appl. Phys. Lett. 62, 1035 (1993).
- [13] B. Malo, K. O. Hill, F. Bilodeau, D. C. Johnson, a J. Albert *Electron. Lett.* 29,1668 (1993).
- [14] Mihailov S.J. a Gower M.C. *Recording of efficient high-order Bragg reflectors in optical fibres by mask imaha prohection and single pulse exposure with an excimer laser*, *Electron. Lett.* 30(9), 707-709 (1994).
- [15] P J. Lemaire, *Opt. Eng.* 30, 780 (1991).
- [16] D. S. Starodubov, V. Grubsky, J. Feinberg, B. Kobrin, a S. Juma, *Opt. Lett.* 22,1086 (1997).
- [17] D. S. Starodubov, V. Grubsky, J. Feinberg, E. M. Dianov, S. L. Semjonov, A. N. Guryanov, a N. N. Vechkanov, "*Proceedings of the Conference on Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Fibers and Waveguides: Application and Fundamentals.*" Technical Digest Series, Vol. 17, paper 328/PDP1-2. Optical Society of America, Washington, DC, 1997.
- [18] E. Brinkmayer, W. Brennecke, M. Zurn, a R. Ulrich, *Electron. Lett.* 22,134 (1986).
- [19] C. A. Park, C. J. Rowe, J. Buus, D. C. J. Reid, A. Carter, a I. Bennion, *Electron. Lett.* 22,1132 (1986).
- [20] D. Burns, D. W. Crust, J. T. K. Chang, a W. Sibbett, *Electron. Lett.* 24,1439 (1988).
- [21] P A. Morton, V. Mizrahi, T. Tanbum-Ek, R. A. Logan, P J. Lemaire, a H. M. Presby, *Appl. Phys. Lett.* 64, 2634 (1994).
- [22] D. M. Bird, J. R. Armitage, R. Kashyap, R. M. A. Fatah, a K. H. Cameron, *Electron. Lett.* 27, 1115 (1991).
- [23] C. R. Giles, T. Erdogan, a V. Mizrahi, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 6, 907 (1994).
- [24] B. F Ventrudo, G A. Rogers, G S. Lick, D. Hargreaves, a T. M. Demayo, *Electron. Lett.* 30, 2147 (1994).
- [25] D. Hargreaves, G S. Lick, a B.F Ventrudo, "*Proceedings of the Optic Fiber Communications Conference,*" San Jose, CA, 1996, Paper ThG3, p. 229.

- [26] D. P Hand a P St. J. Russell, "*Proceedings of the 7th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*," Kobe, 1989, p. 64.
- [27] K. O. Hill, D. C. Johnson, F Bilodeau, a S. Faucher, *Electron. Lett.* 23, 464 (1987).
- [28] F. Bilodeau, K. O. Hill, B. Malo, D. C. Johnson, a J. Albert, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 6, 80 (1994).
- [29] D. C Johnson, K. O. Hill, F Bilodeau, a S. Faucher, *Electron. Lett.* 23, 668 (1987).
- [30] A. Fielding, T. J. CuUen, a H. N. Rourke, *Electron. Lett.* 30, 2160 (1994).
- [31] D. C. Reid, C. M. Ragdale, I. Bennion, D. J. Robbins, J. Buus, a W. J. Stewart, *Electron. Lett.* 26,10 (1990).
- [32] S. Legoubin E. Fertein, M. Douay, P. Bernage, P. Niay, F Bayon, a T. Georges, *Electron. Lett.* 27,1945 (1991).
- [33] L. Zhang, K. Sugden, I. Bennion, a A. Molony, *Electron. Lett.* 31, 477 (1995).
- [34] J. Canning and M. G Sceats, *Electron. Lett.* 30, 1344 (1994).
- [35] R. Kashyap, P F McKee, and D. Armes, *Electron. Lett.* 30, 1977.
- [36] G.P. Agrawal a S. Radic, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 6,995 (1994).
- [37] M. C Parries, K. Sugden, D. C J. Reid, I. Bennion, A. Molony, a M. J. Goodwin, *Electron. Lett.* 30, 891 (1994).
- [38] V. Mizrahi, T. Erdogan, D. J. DiGiovanni, P. J. Lemaire, W. M. MacDonald, S. G Kosinski, S. Cabot, a J. E. Sipe, *Electron. Lett.* 30, 780 (1994).
- [39] E. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault, B. Malo, J. Albert, a K. O. Hill, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 7, 388 (1995).
- [40] W. H. Loh, *Electron. Lett.* 31, 2203 (1995).
- [41] J. Martin, *Electron. Lett.* 32, 236 (1996).
- [42] F. Ouellette, *Opt. Lett.* 16, 303 (1991).
- [43] A. Yariv, D. Fekete, a D. M. Pepper, *Opt. Lett.* 4,52 (1979).
- [44] R. M. Jopson a R. E. Tench, *Electron. Lett.* 29, 2216 (1993).

- [45] A. Seeds, *IEICE Trans. Electron.* E76-C, 198 (1995).
- [46] I. Frgyes a A. Seeds, *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.* 43, 2378 (1995).
- [47] A. D. Kersey, M. A. Davis, J. Patrick, M. LeBlanc, K. P Koo, C G. Askins, M. A. Putnam, a E. J. Friebele, *IEEE J. Lightwave Technol.* 15,1442 (1997).
- [48] HORROCKS, A. Richard a ANAND, Subhash C. *Handbook of Technical Textiles 1st Edition.* 31st October 2000, ISBN 9-78185-573-38-55
- [49] *Composites UK / Supporting UK Composites* [online]. Copyright © [cit. 24.05.2020]. Dostupné z:
<<https://compositesuk.co.uk/system/files/documents/Technical%20Textiles.pdf>>
- [50] *Techtextil – Leading international trade fair for technical textiles and nonwovens.* [online]. Copyright © Messe Frankfurt Exhibition GmbH [cit. 24.05.2020]. Dostupné z:
<<https://techtexsil.messefrankfurt.com/frankfurt/en.html>>
- [51] *3D Fabrics Weaving Technology in Technical Textiles - Fibre2Fashion. Textile&Apparel Business Solution&Marketplace - Fibre2Fashion* [online]. Dostupné z:
<<https://www.fibre2fashion.com/industry-article/7094/3d-weaving-technology>>
- [52] *Textotex.com* [online]. Copyright © [cit. 24.05.2020]. Dostupné z:
<<http://www.textotex.com/application/static/data/file/eng/Ahmet%20UNAL.pdf>>
- [53] FAN, M., FU, F. *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction 1st Edition,* Woodhead Publishing, 2017. ISBN 9-7800-810-04-111
- [54] *IOSR Journal* [online]. Copyright ©G [cit. 24.05.2020]. Dostupné z:
<<http://www.iosrjournals.org/iosr-jpte/papers/Vol4-Issue1/A04010106.pdf>>
- [55] Denton, M.J. a Daniels, P.N. a Textile Institute (Manchester, England). Textile Terms and Definitions Committee. *Textile terms and definitions,* Textile Institute, 2002. ISBN 1-87037-244-1
- [56] GOSWAMI, K. K. *Advances in Carpet Manufacture 2nd Edition.* Woodhead Publishing, 2017. ISBN 9-78008-101-13-17

- [57] ROY CHOUDHURY, A. K. *Introduction to finishing*. Woodhead Publishing, 2017. ISBN 9-78008-100-64-67
- [58] *Global Technical Textile Market Analysis | Industry Report, 2018-2025*. Market Research Company offers Syndicate & Custom Market Research Reports with Consulting Services - Allied Market Research [online]. Copyright © 2020 Allied Market Research. All Rights Reserved [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <https://www.alliedmarketresearch.com/technical-textile-market>
- [59] *EUR-Lex — Access to European Union law — choose your language* [online]. Copyright © [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2013:198:0014:0025:DE:PDF>
- [60] *Textil.cz. Textil.cz* [online]. Copyright © 2004 [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <http://www.textil.cz/index.php?menuid=7&name=textilie>
- [61] Textile Industry, *Global Scenario* [online]. Copyright © [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <http://image.slidesharecdn.com/manufacturingcollateral2bykpmg-141110032600-conversion-gate02/95/vibrant-gujarat-summit-on-manufacturing-sector-11-638.jpg?cb=1415590393>
- [62] Technical Textiles Market: Opportunities Abound in Medical Textiles: Global Industry Analysis, 2014 - 2018 and Opportunity Assessment, 2019 - 2029. FMI: *Consulting Services, Syndicated and Custom Market Research Reports / Future Market Insights* [online]. Copyright © Future Market Insights. All Rights Reserved [cit. 27.02.2020]. Dostupné z: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/technical-textiles-market>
- [63] Technical Textile Market Size, Share | Industry Report, 2020-2027. *Market Research Reports&Consulting/Grand View Research, Inc.* [online]. Copyright © 2020 Grand View Research, Inc. All rights reserved. [cit. 06.06.2020]. Dostupné z: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/technical-textiles-market/methodology>
- [64] KARDASHOV, D. A. *Syntetická lepidla, 2. vydání.*, Moskva, 1968.

Seznam symbolů, veličin a zkratk

FBG	vlaknová Braggova mřížka — Fiber Bragg Grating
TT	technické textilie
CAGR	složená roční míra růstu — Compound Annual Growth Rate
OADM	optický přídatný multiplexor — Optical Add-Drop Multiplexer
FWHM	šířka pásma v půlce maxima — Full width at half maximum