

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 558*

*ISSN 1213-4198*

*thesis*  
**?**  
**IS**

*Ing. Radek Helán*

**Modelování a optimalizace  
komplexních vláknových  
difrakčních struktur**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
Ústav mikroelektroniky

**Ing. Radek Helán**

**MODELOVÁNÍ A OPTIMALIZACE KOMPLEXNÍCH  
VLÁKNOVÝCH DIFRAKČNÍCH STRUKTUR**

**MODELLING AND OPTIMIZATION OF COMPLEX FIBER  
DIFFRACTIVE STRUCTURES**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Mikroelektronika a technologie  
Školitel: doc. Ing. František Urban, CSc.  
Oponenti: prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc.  
doc. Ing. Josef Lazar, Dr.  
Datum obhajoby: 10.11.2009

**Klíčová slova:**

Vláknové mřížky, metoda vrstvení dielektrika, metoda přenosové matice, FBG, MTFS, TMM

**Keywords:**

Fiber gratings, multiple thin film stack, transfer matrix method, FBG, MTFS, TMM

**Místo uložení disertační práce:**

Práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně,  
Údolní 53, Brno, 602 00

© Radek Helán, 2009

ISBN 978-80-214-4001-2

ISSN 1213-4198

# OBSAH

1 ÚVOD.....	5
1.1 Přehled současného stavu řešené problematiky .....	5
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	7
3 BRAGGOVY VLÁKNOVÉ MŘÍŽKY .....	8
3.1 Známé metody pro simulaci spektrálních charakteristik vláknových mřížek.....	9
3.2 Matematický model vláknových difrakčních struktur .....	11
3.3 Analýza chování vláknových mřížek a mřížkových polí.....	14
4 SYNTÉZA PARAMETRŮ SLOŽITÝCH VLÁKNOVÝCH DIFRAKČNÍCH STRUKTUR.....	19
4.1 Prvotní určení parametrů (1. fáze) .....	20
4.2 Optimalizace základních parametrů mřížkového pole (2. fáze) .....	21
4.3 Optimalizace mezimřížkových prostor (3. fáze).....	22
4.4 Shrnutí dosažených výsledků.....	22
5 ZÁVĚR.....	25



# 1 ÚVOD

Vláknové mřížky se stávají klíčovou součástí mnoha optických systémů, protože otevírají řešení základních optických prvků ve vláknovém provedení. V současnosti se rozsáhle používají v telekomunikacích jako optické úzkopásmové filtry pro systémy s vlnovým dělením (WDM systémy) a kompenzátory chromatické disperze. V senzorové technice nalézají vláknové mřížky stále nové možnosti použití, nejčastěji v oblasti měření tlaku a teploty. Speciální struktury vláknových mřížek se uplatňují ve vláknových laserech a zesilovačích.

## 1.1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Již v roce 1978 Hill a spol. demonstrovali, že lze zapsat stálou mřížku v jádře optického vlákna pomocí dvou interferujících světelných svazků [1]. Přestože v následujících dvaceti letech bylo učiněno mnoho aktivit spojených s výrobou a použitím těchto vláknových mřížek, nebyl doposud mechanismus mikroskopických změn, které způsobují změnu indexu lomu jádra vyvolanou zářením (konkrétně ultrafialovým), plně pochopen. Postupně začalo být jasné, že v germaniem dopovaných vláknech jsou klíčem k fotocitlivosti na ultrafialové (UV) záření germanium-oxidová deficitní centra.

Dnes jsou vláknové mřížky běžně vyráběny boční expozicí UV zářením s velkou intenzitou. Vlnová délka tohoto UV záření musí ležet uvnitř absorpčního pásma skla, ze kterého je jádro vlákna vyrobeno. Pro výrobu vláknových mřížek se typicky používá druhá harmonická argonového laseru (244 nm) v kontinuálním režimu a nanosekundové impulsní lasery KrF (248 nm) a ArF (193 nm). UV absorpce, a tím i fotoindukovaná změna indexu lomu, je relativně malá ve standardních vláknech s malým obsahem GeO. Dopování germanio-křemičitých vláken vodíkem však vede ke zvýšení fotocitlivosti vláken na UV záření, jak bylo publikováno v [2].

Běžně se používají dva typy vláknových mřížek: Braggovy vláknové mřížky (FBGs) s periodou okolo 1  $\mu\text{m}$  a mřížky s dlouhou periodou (LPFGs) s periodou až 500  $\mu\text{m}$ . Pro každý typ mřížek se používají jiné metody výroby. Zatímco FBGs se běžně vyrábí přímým osvitom interferujících svazků [3] nebo osvitom přes fázovou masku [4], LPFGs jsou spíše vyráběny bočním osvitom částí vlákna přes amplitudovou masku nebo postupným posunem a osvitom vlákna přes štěrbinu (metoda „bod po bodu“) [5].

Velká spektrální šířka pulsů z femtosekundového laseru a nízká koherence brání jeho použití při výrobě mřížek. Přesto byly femtosekundové lasery použity pro výrobu LPFGs. Výroba LPFGs s použitím 800 nm femtosekundových pulsů z vysokovýkonového titan-safírového laseru byla publikována v [6]. Takto vyrobené mřížky vykazovaly vysokou teplotní stabilitu a zachovávaly svoje optické vlastnosti až do 500 °C. Kromě využívání fotocitlivosti na UV záření mohou být mřížky vyráběny za pomoci zaostřených pulsů z CO<sub>2</sub> laseru [7], elektrickým obloukem [8], střídavým uvolňováním napětí [9], periodickými mikroohyby [10] a iontovou implantací [11].

Spektrální vlastnosti vláknových mřížek umožňují jejich efektivní použití v mnoha optických systémech jako vláknové lasery, senzory, atd. S nalézáním nových možností využití vláknových mřížek v optických vláknových komunikacích začíná být stále důležitější zlepšování technik pro výrobu komplikovanějších mřížkových struktur. Pro dělení kanálů a kompenzaci chromatické disperze v systémech DWDM (systémy s hustým vlnovým dělením) jsou zapotřebí filtry s velice strmými hranami, vysokým potlačením postranních pásem a plochým hlavním maximem. K dosažení těchto požadavků je žádoucí provést apodizaci mřížky a zároveň zaručit, aby střední hodnota změny indexu lomu zůstala stejná (tzv. čistá apodizace). Pro pokročilejší vláknové struktury jako jsou bezdisperzní vláknové mřížky je nutné vytvořit ve struktuře mřížky několik fázových skoků. Bylo publikováno několik metod pro výrobu složitých struktur, jako jsou mřížky s čistou apodizací nebo fázovými skoky. Patří mezi ně metoda založená na pohybu vlákna i svazku při použití homogenní masky [12], užití fázové masky s proměnou difrakční efektivitou [13] nebo metoda dvojité expozice [14].

Laditelné optické pásmové propusti jsou jednou z klíčových aplikací FBGs v telekomunikacích. FBG funguje jako pásmová propust v odrazném směru. Při použití FBG jako pásmové propusti musí být použity další optické prvky jako cirkulátory nebo couplery, aby pracovaly v propustném směru. Použití optického cirkulátoru však značně zvyšuje cenu systému a také zvyšuje útlum. FBG s fázovým skokem jsou jednou z možností, jak vytvořit pásmovou propust v propustném směru. Protože mají tyto mřížky velice úzkou šířku propouštěného pásma, jsou vhodné pro aplikaci např. ve vláknových laserech nebo systémech s velmi hustým vlnovým dělením. FBG s fázovým skokem může být zapsána do vlákna za pomoci fázové masky s fázovým skokem [15] nebo technikou UV post procesu [16].

Moderní trendy směřují ke zdokonalování nových struktur FBG jako jsou vláknová mřížková pole a superstrukturní mřížky. Tyto struktury nalézají využití jako pásmové propusti v propustném směru, filtry pro DWDM systémy nebo senzory pro měření tahu, teploty a příčného zatížení. Byly také publikovány nové metody pro výrobu těchto struktur, jako použití laditelné polymerní fázové masky [17] nebo laděním masky teplotou během výroby [18].

## 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Společně s rozvojem technologie výroby vláknových mřížek vystupuje do popředí fáze návrhu a definice parametrů mřížek. Při návrhu vláknových mřížek se vychází z parametrů použitého vlákna, dosazováním parametrů se potom pomocí známých metod počítá spektrum odrazivosti a skupinového zpoždění vláknové mřížky. Bylo již publikováno několik metod pro optimalizaci parametrů jednoduchých mřížkových struktur [19], [20]. Cílem této práce je navržení algoritmu, pomocí kterého je možné vypočítat parametry rozsáhlé mřížkové struktury z požadovaných spektrálních vlastností. Základem práce je výzkum chování struktur vláknových mřížek a mřížkových polí, porovnání dostupných metod pro výpočet jejich spektrálních vlastností, studie dostupných technologií výroby vláknových mřížek. S ohledem na omezené možnosti technologie výroby bude vyvinut nový algoritmus pro výpočet parametrů složitých mřížkových struktur na základě požadovaných spektrálních vlastností. Stěžejní části práce jsou:

- Studie metod pro návrh a simulaci vláknových mřížek
- Modelování reálných struktur mřížek a mřížkových polí
- Modelování vlivů technologických omezení
- Analýza chování mřížek a mřížkových polí vzhledem ke změně výrobních parametrů
- Návrh a realizace optimalizačního algoritmu pro syntézu vláknových členů s určenými vlastnostmi

První část práce zahrnuje studium současných metod pro návrh vláknových mřížek, provedení analýzy elementární struktury vláknových mřížek a mřížkových polí s ohledem na jejich rozměry a materiálové vlastnosti. V další části práce je zapotřebí vytvořit matematický model popisující vláknové mřížky a mřížková pole. Za pomoci tohoto modelu bude zjištěna citlivost na jednotlivé parametry vláknových mřížek. Následně budou do modelu zahrnuty omezení vyplývající z technologie výroby fázových masek a mřížek samotných. Na základě těchto omezení bude vytvořen algoritmus pro syntézu vláknových struktur s předem určenými vlastnostmi.

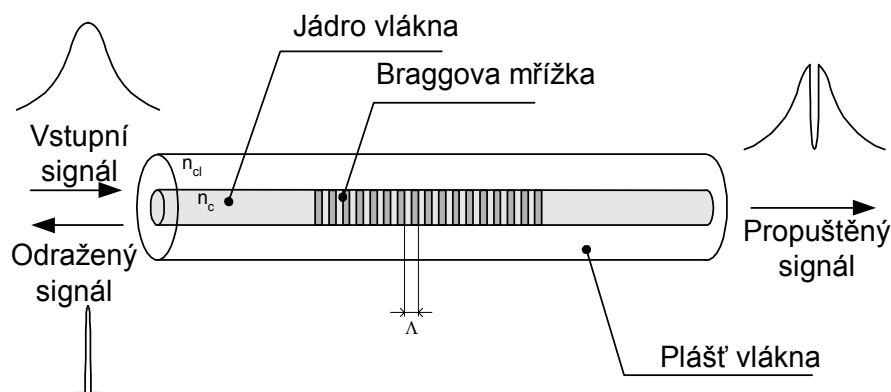


### 3 BRAGGOVY VLÁKNOVÉ MŘÍŽKY

Vláknové mřížky jsou tvořeny periodickou změnou indexu lomu jádra podél osy vlákna s periodou  $\Lambda$  a amplitudou  $\delta n$ . Tato periodická struktura tvoří rozložené Braggovo zrcadlo, které váže procházející a odražené optické záření [21]. Vláknová mřížka tak periodicky mění fázi a intenzitu procházející, nebo odražené, světelné vlny. Braggova vláknová mřížka s naznačeným průběhem vstupních a výstupních signálů je schematicky znázorněna na Obr. 3.1. Vlnová délka, při které se světlo odráží s největší efektivitou, se nazývá Braggova rezonanční vlnová délka,  $\lambda_{\text{Bragg}}$ . Závislost mezi Braggovou rezonanční vlnovou délkou a prostorovou periodou mřížky je dána vztahem [22]:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = \frac{2n_{\text{eff}}\Lambda}{N}, \quad (3.1)$$

kde  $\lambda_{\text{Bragg}}$  je Braggova rezonanční vlnová délka,  $n_{\text{eff}}$  je efektivní vidový index,  $\Lambda$  je prostorová perioda mřížky a  $N$  je přirozené číslo vyjadřující řád periody mřížky.



**Obr. 3.1:** Schematický náčrt Braggovy vláknové mřížky

Vláknové mřížky lze rozdělit do dvou základních skupin. První skupinu tvoří Braggovy vláknové mřížky, jejichž řád,  $N$ , je roven jedné a jejich perioda tak odpovídá polovině Braggovy rezonanční vlnové délky. Pro běžné aplikace se jejich perioda pohybuje okolo  $1 \mu\text{m}$ . Druhou skupinu tvoří mřížky s dlouhou periodou, u kterých se využívá vyšších řádů period,  $N$ . U těchto mřížek dosahuje perioda typicky desítky až stovky  $\mu\text{m}$ . Princip funkce FBG i LPFG je podobný, záleží hlavně na technologických možnostech výroby a požadavcích na použití.

Zjednodušeně řečeno, vláknové mřížky fungují jako optické pásmové filtry; odráží optické záření o vlnové délce blízké Braggově rezonanční vlnové délce, záření ostatních vlnových délek propouští. Přenos mřížky je ale ve skutečnosti ovlivněn mnoha vstupními parametry, jejich vhodnou změnou lze dosáhnout požadované odezvy. V nejjednodušším případě má mřížka přes celou svoji délku

konstantní periodu  $\Lambda$  a změnu indexu lomu (hloubku modulace)  $\delta n$ . Taková mřížka je označovaná jako homogenní.

Vláknové mřížky nejsou nekonečně dlouhé, každá mřížka má svůj začátek a konec. Homogenní mřížka začíná a končí skokově, obálku její modulace tvoří obdélník. Fourierova transformace takovéto „obdélníkové“ funkce vede ke známé funkci *sinc*, která má ve svém spektru postranní laloky. Z pohledu návrhu mřížky by pak mělo být výhodnější vytvořit na struktuře mřížky obálku blížíící se např. Gaussově křivce, protože transformace Gaussovy funkce je opět Gaussova funkce.

Vytváření profilu změny indexu lomu  $\delta n$  v závislosti na pozici  $z$  se nazývá apodizace. Při použití vhodného apodizačního profilu je opravdu možné dosáhnout značného potlačení postranních laloků ve spektru odrazivosti mřížky. Protože vláknové mřížky jsou často využívány jako optické filtry, je žádoucí postranní laloky co nejvíce potlačit pro zlepšení odstupu signálu od šumu. Nejběžněji používané profily apodizace jsou Gaussovou křivkou, funkcí  $\cos^n$  (raised cosine) nebo funkcí *sinc*.

Další možnou cestou, jak ovlivnit odezvu mřížek a rozšířit jejich možnosti použití představuje možnost změny periody mřížky  $\Lambda$  v závislosti na poloze  $z$ . Vytváření změny periody uvnitř mřížky se nazývá chirp a vede k mnohým změnám ve spektrální odezvě mřížky. Důležitou vlastností je to, že rozladěním periody mřížky  $\Lambda$  dochází podle vzorce (3.1) také k rozladění Braggovy rezonanční vlnové délky  $\lambda_{\text{Bragg}}$  a tím k adekvátnímu rozšíření odraženého pásma.

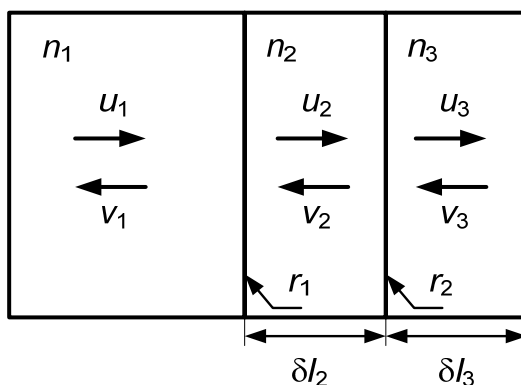
Chirpovanou mřížku si lze tedy představit jako několik různých mřížek zařazených do série, tvořící funkční celek. Při této představě je potom pochopitelné, že jednotlivé spektrální složky světla se odráží v různých místech mřížky. Podle velikosti periody odpovídá danému úseku konkrétní Braggova rezonanční vlnová délka. Při odrazu světla na mřížce to potom znamená, že jednotlivé složky světla urazí různou dráhu a dochází tak k jejich časovému posunu. Časové zpoždění je dané profilem chirpu, toto zpoždění se nazývá skupinovým. Pro lineárně chirpovanou mřížku je průběh skupinového zpoždění, v rozmezí odražené šířky pásma, přibližně lineární. Tato vlastnost lze s výhodou využít např. ke kompenzaci chromatické disperze. Více o využití chirpovaných vláknových mřížek je uvedeno v literatuře [22], [23].

### 3.1 ZNÁMÉ METODY PRO SIMULACI SPEKTRÁLNÍCH CHARAKTERISTIK VLÁKNOVÝCH MŘÍŽEK

Existuje několik metod, které mohou být použity pro analýzu pole šířícího se proměnnými strukturami. Nejpoužívanější z těchto metod jsou metody založené na teorii vázaných vidů a vrstvení dielektrika. Teorie vázaných vidů (CMT) se často používá k získání kvantitativních informací o difrakční efektivitě a spektrálních závislostí vláknových mřížek. Obousměrně šířící se složky pole (získané zavedením strukturálních poruch do ideálního vlnovodu), které se šíří uvnitř struktury, jsou propojeny pomocí vázaných diferenciálních rovnic. Řešení komplikovanějších

struktur vede k numerickému řešení dvou vázaných diferenciálních rovnic, analytické řešení je možné pouze pro homogenní mřížky.

Pro výpočet nehomogenních mřížek (tzn.  $\delta n$  a  $\Lambda$  nejsou konstantní v závislosti na poloze  $z$ ) je zapotřebí použít složitější modely vycházející z elementární struktury vláknové mřížky. Analytické řešení pro mřížku délky  $L$  s libovolnou modulací změny indexu lomu a periody ale nemá jednoduchou formu, protože proměnné  $\delta n$  a  $\Lambda$  od sebe nemohou být odděleny z důvodu společného ovlivňování přenosové funkce. V této práci je pro výpočty spektrálních charakteristik použita metoda vrstvení dielektrika (MTFS) založena na Rouardově metodě. Rouardova metoda je rekurzivní početní metoda, která se běžně používá při návrhu provrstvování tenkými vrstvami. MTFS byla modifikována Weller-Brophym a Hallem pro analýzu difrakčních mřížek ve vlnovodech [24]. Tato metoda je vhodná pro výpočet libovolných mřížkových struktur. Na rozdíl od teorie vázaných vidů, ve které mřížka vystupuje jako obecná periodická struktura, uvažuje metoda vrstvení dielektrika mřížku jako posloupnost tenkých dielektrických vrstev s jasnou fyzikální podstatou. Skládáním tenkých vrstev potom mohou být vytvořeny libovolné struktury s přesně daným vnitřním uspořádáním. Obr. 3.2 ukazuje tenkovrstvou strukturu s vyznačenými vstupními a výstupními složkami pole a indexy lomu každé vrstvy. Odrazivosti  $r_1$  a  $r_2$  závisí čistě na indexech lomu sousedních vrstev,  $n$ .



**Obr. 3.2:** Struktura vrstveného dielektrika

Pole v každé vrstvě je tedy rovno součtu polí procházející,  $u$ , a odražené,  $v$ , vlny. Aplikací podmínky spojitosti na rozhraní dielektrických vrstev a rovnice šíření vln v nemagnetickém homogenním prostředí dostaneme pro první vrstvu po úpravě soustavu rovnic v maticové formě [22]:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1} \begin{bmatrix} 1 & r_1 \\ r_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

kde odrazivost  $r_l$  a propustnost  $t_l$  na rozhraní prostředí jsou dány [22]:

$$r_l = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad t_l = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}. \quad (3.3)$$

Opětovnou aplikací předchozích podmínek na další rozhraní dostaneme [22]:

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{t_2} \begin{bmatrix} e^{j\varphi_2} & r_2 e^{j\varphi_2} \\ r_2 e^{-j\varphi_2} & e^{-j\varphi_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Fáze  $\varphi_j = 2\pi n_j \delta l_j / \lambda$ , kde  $n_j$  je index lomu  $j$ -té vrstvy,  $\delta l_j$  je délka  $j$ -té vrstvy a  $\lambda$  je vlnová délka.

Využitím metody přenosové matice (TMM) ke spojování polí jednotlivých vrstev struktury je možné rovnici (3.4) přepsat do tvaru:

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11}^2 & \mathbf{T}_{12}^2 \\ \mathbf{T}_{21}^2 & \mathbf{T}_{22}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^2 \begin{bmatrix} u_3 \\ v_3 \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

kde koeficienty přenosové matice jsou  $\mathbf{T}_{11}^2 = \frac{e^{j\varphi_2}}{t_2}$ ,  $\mathbf{T}_{12}^2 = \frac{r_2 e^{j\varphi_2}}{t_2}$ ,  $\mathbf{T}_{21}^2 = \frac{r_2 e^{-j\varphi_2}}{t_2}$ ,  $\mathbf{T}_{22}^2 = \frac{e^{-j\varphi_2}}{t_2}$ .

Zavedením metody přenosové matice lze potom celou strukturu popsat maticí:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{11} & \mathbf{T}_{12} \\ \mathbf{T}_{21} & \mathbf{T}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_n \\ v_n \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} u_n \\ v_n \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

kde  $\mathbf{T}$  je celková přenosová matice,  $\mathbf{T} = \mathbf{T}^1 \cdot \mathbf{T}^2 \cdot \dots \cdot \mathbf{T}^{n-1}$ .

Odrazivost celé mřížky  $\rho$  a její skupinové zpoždění  $t_g$  jsou pak dány koeficienty celkové přenosové matice:

$$\rho = \frac{\mathbf{T}_{21}}{\mathbf{T}_{11}}, \quad t_g = -\frac{d}{d\omega} \arg[\rho(\omega)], \quad (3.7)$$

kde  $\omega = 2\pi\nu$  je úhlový kmitočet,  $\nu$  je frekvence světla.

Tato metoda má jednu zřejmou nevýhodu, a to, že čas výpočtu je přímo závislý na počtu vrstev, což může být pro výpočet dlouhých mřížek velmi zdoluhavé. Pro periodické struktury však lze vytvořit optimalizační algoritmy, které výpočet značně urychlují. Hlavní výhodou této metody je možnost vytvoření libovolné struktury, včetně případných poruch v periodicitě a možnost modelovat tvar jednotlivých period mřížky.

### 3.2 MATEMATICKÝ MODEL VLÁKNOVÝCH DIFRAKČNÍCH STRUKTUR

Při návrhu vláknových mřížek lze využít mnoha metod. Od nejjednodušší analýzy, která vede pouze k přibližnému určení, až ke složitějším metodám jako jsou CMT, MTFS, TMM. Ať už se jedná o kteroukoliv ze zmíněných metod, vždy návrh mřížky probíhá na základě definování rozměrů, materiálových vlastností použitého vlákna a struktury mřížky, a následně simulaci odezvy na definované vstupní

elektromagnetické pole. Návrh vláknových mřížek tedy spočívá v hledání takových vstupních parametrů mřížky, aby docházelo k požadované odezvě. Tento postup vyžaduje poměrně velké znalosti chování vláknových mřížek, protože jednotlivé vstupní parametry jsou navzájem provázané a nelze tedy přesně určit vazby mezi vstupními a výstupními závislostmi těchto parametrů. Návrh tak nejčastěji probíhá na základě znalostí technologie výroby, hrubého výpočtu některých parametrů, odborného odhadu, mnoha simulací a experimentů.

Teorie vázaných vidů, přesněji řečeno rovnice vycházející z teorie vázaných vidů řešené pro periodické poruchy harmonického charakteru, může být použita k velice přesnému výpočtu odezvy vláknových mřížek. Omezení této metody spočívá v tom, že rovnice platí pouze pro homogenní, slabě odrazný úsek mřížky. Slabě odrazná mřížka je taková, která dosahuje malé hodnoty koeficientu odrazivosti. Uvažovanou hranici pro slabě odraznou mřížku lze stanovit pro odrazivost maximálně 20% [22]. Při překročení této hranice dochází k nárůstu chyby výpočtu. Tato dvě omezení se dají obejít rozdělením mřížky na několik různých elementů a jejich následným spojením pomocí metody přenosové matice. Hlavní omezení, které je při použití metody vázaných vidů limitující, spočívá v nemožnosti simulace strukturálních poruch na úrovni kratší než jedna perioda. Není tedy možné definovat vlastní tvar periody.

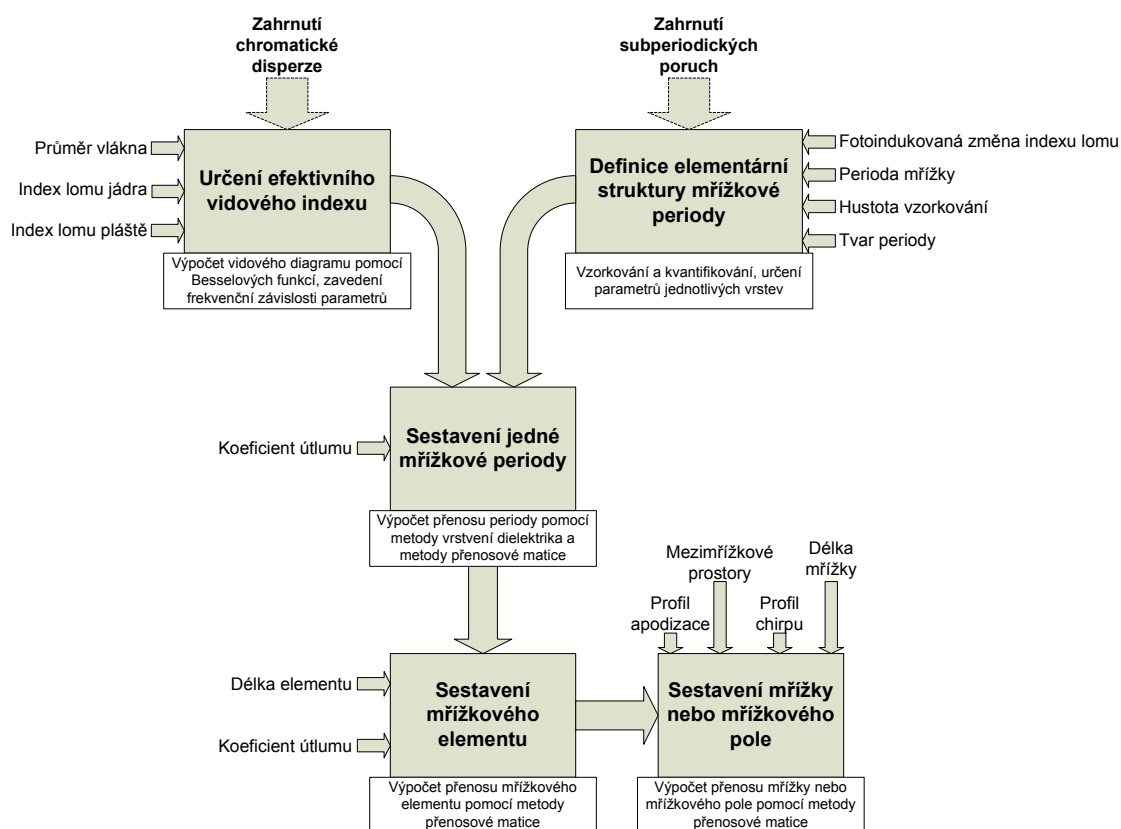
Při srovnání jednotlivých metod pro simulaci vláknových mřížek [25], [26] se ukazuje jako metoda s nejširšími možnostmi metoda vrstvení dielektrika společně s využitím metody přenosové matice. Protože při simulacích využívajících tyto techniky je mřížka popsána sendvičovou strukturou tenkých vrstev dielektrika, lze pomocí této metody modelovat libovolnou strukturu. Touto cestou lze definovat strukturu mřížky v prakticky neomezeném měřítku, včetně tvaru jednotlivých period nebo strukturálních poruch mřížky. Omezujícím faktorem MTFs je velký počet početních operací, který je úměrný počtu vrstev. Výpočet potom může vést k nepřesnostem v důsledku zaokrouhlování a velice dlouhé době výpočtu. Počet operací lze výrazně omezit použitím vhodných optimalizačních algoritmů, a tím lze významně snížit početní chyby i čas potřebný k simulaci.

Sebelepší početní metoda však nezaručuje bezpečně nejlepší výsledky. Velice důležitý je způsob implementace metody do vhodného modelu. Pokud by byl totiž samotný model mřížky příliš zjednodušený, nebylo by možné určit přesnější chování vláknových mřížek, mřížkových polí a složitějších difrakčních členů ani při využití sofistikovanějších metod. Složitější model, zahrnující mimo základní parametry ještě další vlivy, se potom stává univerzálnějším a dokáže lépe přiblížit skutečné chování vláknových mřížek. Pro základní výpočet mřížky stačí znát pouze konstantu popisující efektivní vidový index vlákna  $n_{\text{eff}}$ , periodu mřížky  $A$ , změnu indexu lomu vyvolanou osvitom  $\delta n$  a délku mřížky  $L$ . Pokud by však bylo zapotřebí vytvořit mřížku apodizovanou nebo chirpovanou, bylo by nutné definovat další parametry jako je průběh profilu apodizace a chirpu.

Protože je tato práce zaměřena na návrh složitých mřížkových členů, byla tvorbě samotného modelu mřížky věnována velká pozornost. Při výběru vhodné metody

výpočtu byl kladen důraz na možnost co nejhlubšího popisu struktury mřížky. Z představených metod připadaly v úvahu metoda vázaných vidů a metoda vrstvení dielektrika. Po důkladném studiu a porovnání obou metod [27] byla zvolena MTFS v kombinaci s TMM. Hlavním důvodem pro výběr MTFS byla možnost modelování vnitřní struktury jednotlivých period mřížky nebo neperiodických úseků mřížky. Při použití CMT by nebylo možné simulovat jevy, jako jsou poruchy periodicity způsobené nepřesnostmi při výrobě fázové masky, fázové skoky způsobené volným prostředím mezi mřížkami v mřížkových polích, atd.

Kromě jevů souvisejících bezprostředně s parametry mřížek jsou ale také důležité jevy vyskytující se ve vlákně samotném. V reálném optickém vlákně dochází k interakci mezi šířícím se elektromagnetickým vlněním a materiálem, které se projevuje útlumem a disperzí. Při modelování jednoduchých struktur a krátkých mřížek nemají tyto parametry velký vliv, pokud se ale modeluje např. velmi dlouhá mřížka vyššího řádu nebo vláknový rezonátor dostatečné délky, mohou mít tyto parametry zásadní vliv. Na Obr. 3.3 je znázorněno blokové schéma modelu, který byl v rámci této disertační práce vytvořen.



**Obr. 3.3:** Blokové schéma modelu mřížky

Na základě popsaného matematického modelu byl vytvořen program pro výpočet mřížek a mřížkových polí. Program byl vytvořen ve vývojovém prostředí Matlab. Toto prostředí bylo zvoleno z důvodu, že má implementované metody pro velké množství matematických funkcí a práce v tomto prostředí je velice přehledná

i v případě relativně složitých úkolů. Drobnou nevýhodou se stává fakt, že Matlab je tzv. skriptovací jazyk, a při výpočtech nemusí dosahovat takových rychlostí, jako programy přeložené do strojového kódu. Model je poměrně rozsáhlý a obsahuje velké množství vstupních parametrů. Hlavně z tohoto důvodu byl program rozdělen do několika modulů (skriptů), podle Obr. 3.3. Další důvod, proč byl program rozdělen do několika podprogramů, je ten, že se některé úseky kódu v určitých částech programu opakují. Jejich vyjádření v samostatných skriptech potom přispívá k celkovému zpřehlednění programu a k redukci opakujících se pasáží.

### 3.3 ANALÝZA CHOVÁNÍ VLÁKNOVÝCH MŘÍŽEK A MŘÍŽKOVÝCH POLÍ

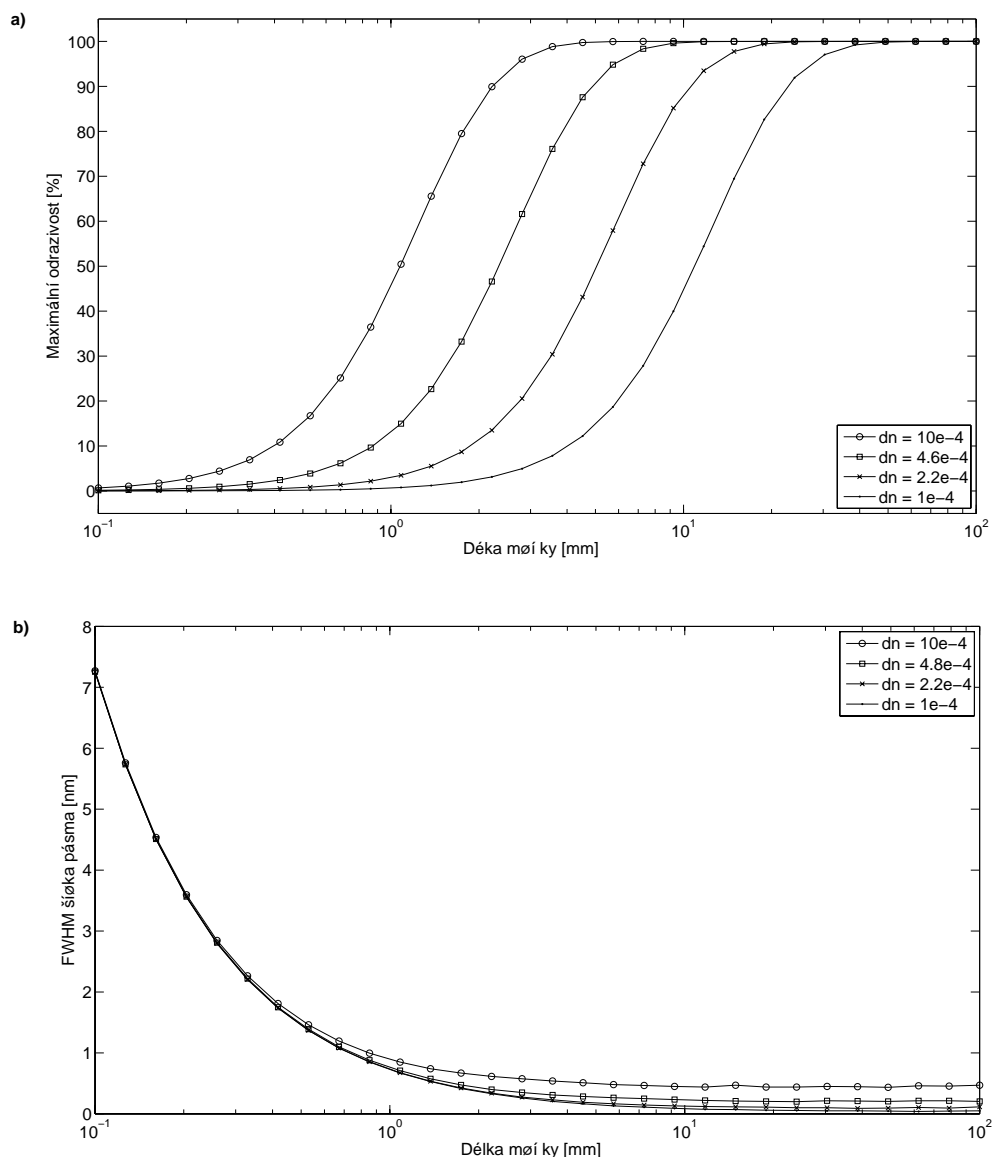
Hlavním cílem této práce bylo vytvoření algoritmu pro syntézu parametrů mřížkových struktur z požadované spektrální odezvy. Před vývojem takového algoritmu bylo zapotřebí analyzovat vliv jednotlivých parametrů na spektrální odezvu mřížkových struktur. Vliv mnohých parametrů není jednoznačný, protože parametry jsou vzájemně provázány, a dochází tak k ovlivnění stejných výstupních spektrálních vlastností více parametry. Analýzy byly provedeny pro základní parametry homogenních mřížek, vliv profilů apodizace a chirpu vláknových mřížek a parametry ovlivňující spektrální odezvu mřížkových polí.

Při analýze základních vstupních parametrů se sledují tři výstupní vlastnosti – pozice hlavního maxima, odstup hlavního maxima od vedlejších (odstup signál – šum) a FWHM šířka hlavního maxima. Další pozorovanou vlastností by také mohl být tvar hlavního maxima, zda je spíše „ostré“ nebo „ploché“.

První sledovaná vlastnost, pozice hlavního maxima, je dána rovnicí (3.1). Pozice hlavního maxima je primárně dána periodou a řádem mřížky. K rezonanci dochází vždy na lichých řádech, přitom odrazivost je dána efektivní délkou mřížky.

Analýza dalších dvou výstupních vlastností, maximální odrazivosti mřížky,  $R_{\max}$ , a FWHM šířky spektra,  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ , není už tak jednoduchá a jednoznačná. Při analýze sledovaných vlastností  $R_{\max}$  a  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$  vystupují do popředí hned tři vzájemně provázané vstupní parametry – délka mřížky  $L$ , perioda  $\Lambda$  a změna indexu lomu  $\delta n$ . Přitom změna  $R_{\max}$  a  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$  nemohou být pomocí vstupních parametrů měněny nezávisle [28].

Na Obr. 3.4 je znázorněna závislost  $R_{\max}$  a  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$  na  $L$  s parametrem  $\delta n$ . Z Obr. 3.4a) je patrné, že se zvyšující se délkou mřížky dochází postupně ke zvyšování  $R_{\max}$  až téměř k hodnotě 100%. Po dosažení maximální odrazivosti nastává saturace a  $R_{\max}$  se již dále nemění. Současně dochází k přibližně exponenciálnímu poklesu  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$  a následnému ustálení, jak je znázorněno na Obr. 3.4b). Místo, kde nastává saturace  $R_{\max}$  a současně ustálení hodnoty  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$  se nazývá efektivní délka mřížky. Při dovršení efektivní délky mřížky dochází k maximální rezonanci signálu ve vláknové mřížce a k maximálnímu možnému odrazu. Další prodlužování mřížky pak již nemá na signál procházející mřížkou příliš vliv [28].



**Obr. 3.4:** Závislost a)  $R_{\max}$ , b)  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$  na délce mřížky  $L$  pro různá  $\Delta n$ . Závislosti jsou vypočteny pro Braggovu rezonanční vlnovou délku  $\lambda_{\text{Bragg}} = 1550$  nm ve vlákně Corning SMF-28.

Při navrhování vláknových mřížek je nutné dbát na to, aby nedocházelo k překročení efektivní délky mřížky, protože se zvyšující se délkou mřížky se zvyšuje náročnost na technologii a stabilitu výrobního procesu mřížek a tím i náklady na jejich výrobu. Nevhodným návrhem příliš dlouhých mřížek však již nedochází ke zlepšení parametrů, pouze ke zvyšování jejich ceny.

U homogenních mřížek se odstup postranních laloků zpravidla pohybuje někde okolo 10 – 20 dB. Pro mnohé aplikace (např. sensorové) je většinou tento odstup signálu od šumu dostatečný. V některých aplikacích, jako jsou filtry pro telekomunikační účely nebo stabilizaci laserů je ale nutné zajistit výrazně vyšší odstup signálu od šumu, aby po průchodu signálu delší optickou soustavou nedocházelo k ovlivnění užitečného signálu šumem. Malý odstup signál-šum by

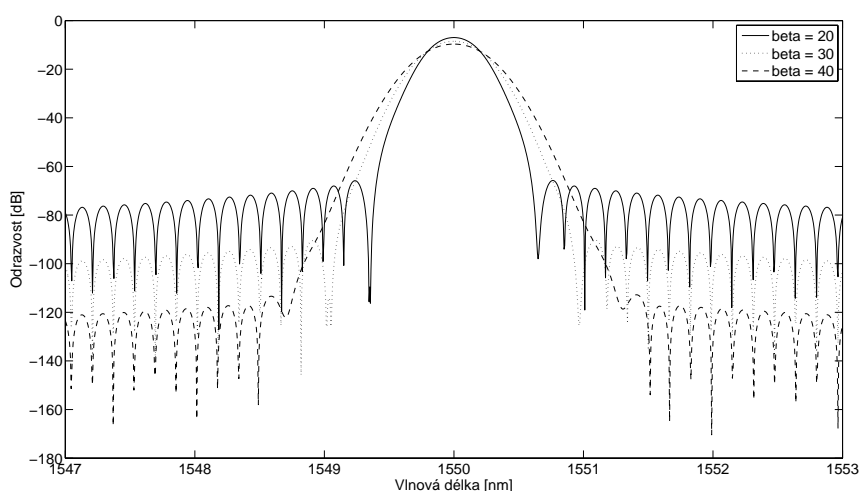


v takovém případě mohl vést k neurčité detekci signálu na vzdáleném konci a tím velké chybovosti přenosu.

Zavedením vhodného profilu apodizace je možné výrazně měnit tvar spektrální charakteristiky mřížky a zvyšovat tak odstup signálu od šumu. Popsaný matematický model obsahuje tři předdefinované průběhy apodizace (Gaussovským profilem, profiy  $\cos^n$  a  $\text{sinc}^n$ ).

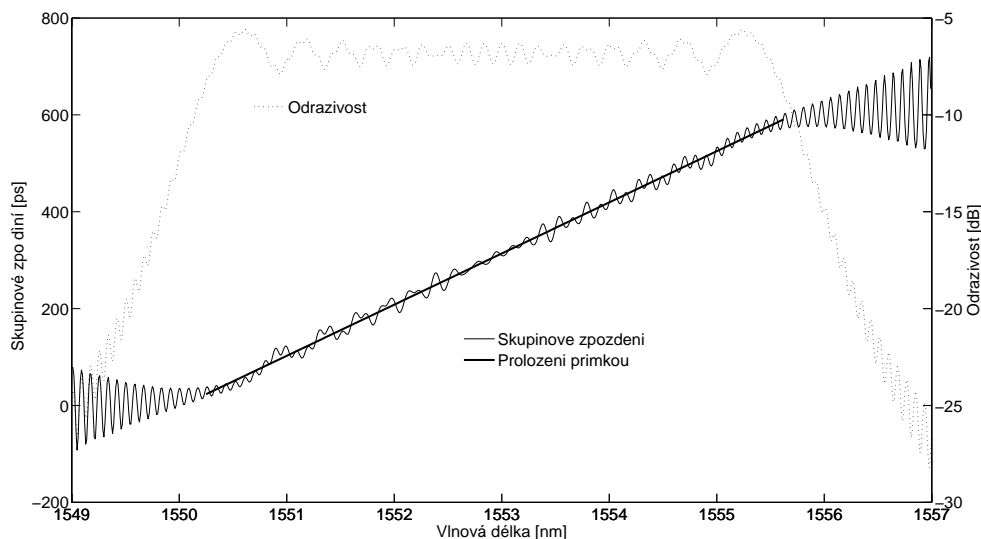
Při apodizaci nejčastěji používaným, Gaussovským, profilem je závislost  $\delta n = \delta n(z)$  tvořena částí Gaussovy křivky se střední hodnotou  $L/2$  a směrodatnou odchylkou danou parametrem  $\beta$  podle rovnice  $\sigma = \sqrt{\frac{K^2}{2\beta}}$ . Na Obr. 3.5 jsou

znázorněny křivky spektrálních průběhů odrazivosti mřížek s Gaussovským profilem apodizace a různými hodnotami  $\beta$ . Parametr  $\beta$  je nepřímo úměrný střední kvadratické odchylce  $\sigma^2$ , se zvyšujícím se parametrem  $\beta$  dochází k „zeštíhlení“ Gaussovy křivky. Jak je patrné z Obr. 3.5, čím štíhlejší Gaussova křivka je, tím dochází k většímu potlačení postranních pásem ve spektrální odezvě mřížky. Současně ale dochází ke zvětšení šířky odraženého pásma a poklesu maximální odrazivosti [26]. Zavedením profilu apodizace je možné dosáhnout odstupů signálu od šumu až 100 dB.



**Obr. 3.5:** Spektrální závislost odrazivosti mřížek s čistě apodizovaným Gaussovským profilem,  $L = 5$  mm,  $\delta n = 3 \times 10^{-4}$ ,  $\lambda_{\text{Bragg}} = 1550$  nm ve vlákne Corning SMF-28

Chirpované mřížky mohou být s výhodou použity ke kompenzaci chromatické disperze. Zavedením lineární změny velikosti periody v závislosti na souřadnici  $z$  je dosažena plynulá monotónní změna Braggovy rezonanční délky uvnitř mřížky. Při průchodu signálu mřížkou tak dochází k různému zpoždění jednotlivých spektrálních složek signálu, protože každá spektrální složka je odražena v jiném místě mřížky a urazí tak jinou dráhu. Toto zpoždění se nazývá skupinové zpoždění (group delay)  $t_g$  a je vyjádřeno rovnicí (3.7).

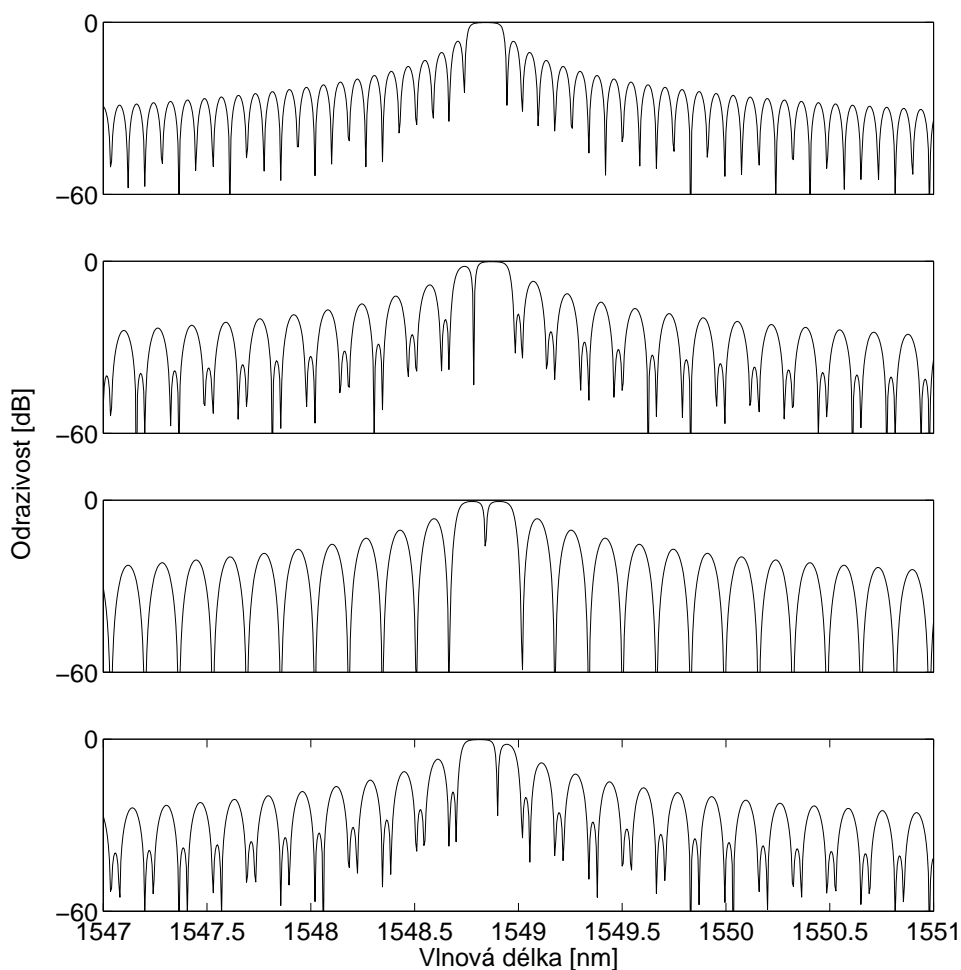


**Obr. 3.6:** Analýza spektrálních charakteristik lineárně chirpované mřížky,  $L = 10$  mm,  $\lambda_0 = 530,4$  nm,  $\delta n = 5 \times 10^{-4}$ ,  $\kappa = 0,2$  nm/mm ve vlákne Corning SMF-28

Spektrální závislosti odrazivosti a skupinového zpoždění lineárně chirpované mřížky jsou znázorněny na Obr. 3.6. Z obrázku je patrné, že v rozsahu odražených vlnových délek dochází k přibližně lineárnímu průběhu skupinového zpoždění. Tuto oblast lze proložit přímkou a z její směrnice určit úroveň kompenzace disperze. Na Obr. 3.7 je průběh skupinového zpoždění proložen přímkou v oblasti FWHM šířky spektra. Vypočítaná směrnice (úroveň kompenzace) vychází pro tuto mřížku přibližně 105 ps/nm. Například pro standardní telekomunikační vlákno Corning SMF-28 se disperze v oblasti vlnových délek okolo 1550 nm pohybuje kolem 17,3 ps/(nm.km). Zmíněná mřížka by tedy dokázala vykompenzovat disperzi cca 6 kilometrů dlouhé optické trasy.

Nejjednodušší formou mřížkového pole je dvojice mřížek zařazená do série. Jednotlivé mřížky mohou mít v takovémto případě stejné nebo rozdílné parametry. V každém případě ale do analýzy vstupuje další parametr, a to vzájemná vzdálenost těchto dvou mřížek.

Základní analýza dvou identických mřížek v sérii je zobrazena na Obr. 3.7. V tomto případě je mezimřížková vzdálenost  $l$  klíčovým parametrem. Zařazením mezery mezi mřížky vznikají mezimřížkové rezonance a dojde k rozštěpení původního hlavního maxima na dvě části. Tím vznikne úzké propustné pásmo, jehož pozice je dána vzdáleností mezi mřížkami (fázovým rozdílem). Zvětšování mezimřížkové vzdálenosti  $l$  v rozsahu  $0 - \lambda$  znamená jedno „přeběhnutí šterbiny“ přes hlavní maximum, a to směrem od nižších vlnových délek k vyšším. S dalším zvyšováním vzdálenosti se poloha šterbiny mění opět periodicky, přitom poloha pro  $l = n\lambda$  (kde  $n$  je celé číslo) se rovná poloze při  $l = 0$ .



**Obr. 3.7:** Spektrum odrazivosti mřížkového pole složeného ze dvou identických homogenních mřížek s parametry  $L = 5$  mm,  $\Lambda = 530$  nm,  $\delta n = 3 \times 10^{-4}$ , mezimřížková vzdálenost (shora)  $l = 0$ ,  $l = \Lambda/4$ ,  $l = \Lambda/2$ ,  $l = 3\Lambda/4$

V této kapitole byla zobrazena a popsána pouze malá část z celkové analýzy vláknových mřížek a mřížkových polí, která byla provedena v rámci disertační práce. Pro tuto kapitolu byly vybrány pouze charakteristiky, ze kterých jsou zřejmé některé rysy popisující fungování vláknových mřížek a mřížkových polí. Celkově je ale problematika vláknových mřížek a mřížkových polí komplexnější. Analýzy jednotlivých vstupů byly prováděny z hlediska majoritních vlivů na vybrané výstupy. Tím bylo dosaženo znalostí potřebných k vývoji algoritmu pro syntézu parametrů složitějších vláknových mřížkových struktur.

## 4 SYNTÉZA PARAMETRŮ SLOŽITÝCH VLÁKNOVÝCH DIFRAKČNÍCH STRUKTUR

Hlavním cílem této práce byl návrh metody pro určení vstupních parametrů složité vláknové difrakční struktury na základě požadovaného spektrálního průběhu odrazivosti. Tato metoda by měla sloužit k návrhu speciálních optických vláknových prvků s požadovanou odrazivostí v závislosti na vlnové délce. Primárním vstupem pro návrh takových prvků je požadovaná spektrální odezva, výstupem jsou potom parametry vláknové difrakční struktury pro její výrobu. Návrh celé metody je veden tak, aby byly výstupem reálně použitelné parametry struktury. Do modelu jsou proto zavedeny omezení vyplývající z výrobních procesů mřížkových struktur. Současně s metodou byl vyvíjen i program pro syntézu parametrů v prostředí Matlab. Tím byla v průběhu vývoje ověřena funkčnost metody a byl stanoven přesný algoritmus popisující jednotlivé fáze vedoucí k získání parametrů složité vláknové difrakční struktury.

Metoda pro syntézu parametrů složité vláknové difrakční struktury na základě požadovaného spektrálního průběhu odrazivosti (dále jen metoda) vychází z modelu a analýzy vláknových mřížek, popsanych v kapitole 3. Základní myšlenka vedoucí k této metodě spočívá v sériovém seřazení několika homogenních vláknových mřížek tak, aby jejich spojením došlo k vytvoření komplexní struktury. Odrazivost této struktury v závislosti na vlnové délce se potom blíží zadanému průběhu.

Protože cílem metody je návrh vláknových mřížek s parametry reálnými pro následnou výrobu, byla při jejím vývoji požadována možnost zavedení omezení vyplývajících ze známých technologií výroby vláknových mřížek. Metoda využívá matematický model vláknových mřížek a mřížkových polí se zavedením příslušných technologických omezení. Jedním omezením je diskretizace velikosti periody mřížky. Uvažovaná technologie výroby složité vláknové difrakční struktury předpokládá použití fázové masky. Fázové masky jsou zpravidla vyráběny pomocí elektronové litografie a následného leptání. Změna periody fázové masky (potažmo vláknové mřížky) tedy nemůže být spojitá. Fázové masky jsou vyráběny s určitým krokem periody a určitou přesností. Prvním omezením metody je tedy minimální krok periody, se kterým může být fázová maska vyrobena. Dalšími omezeními jsou potom maximální celková délka výsledné struktury, minimální délka mřížkového segmentu, maximální a minimální dosažitelná změna indexu lomu.

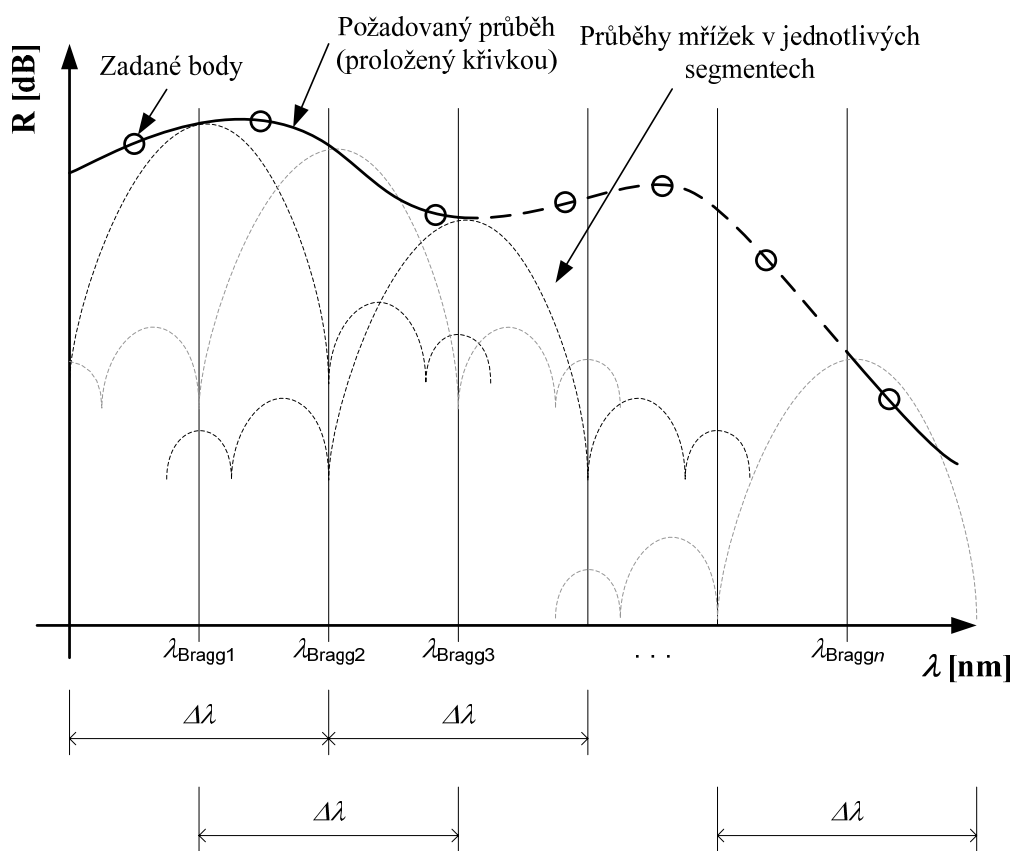
Při výpočtu odezvy vláknové mřížky je struktura popsána soustavou komplexních přenosových matic. Neexistuje tedy analytický tvar rovnic popisující strukturu, ale výpočet se řeší na základě numerických metod. Zpětné získání vstupních parametrů takové struktury při zadaných výstupních vlastnostech znamená vytvoření algoritmu, který na základě vhodných počátečních parametrů a jejich následné optimalizaci dosáhne požadované odezvy. Nejedná se tak o metodu zpětnou, ale o metodu přímou se zavedením zpětné vazby. U metod tohoto typu vystupují do popředí dva základní problémy - správné určení počátečních podmínek a zaručení konvergence celého algoritmu. Nevhodné počáteční podmínky mohou vést ke

značnému prodloužení doby výpočtu, v horším případě i ke vzniku bezvýhodné situace znemožňující výpočet. Druhý problém nastává v případě zavedení nevhodné zpětné vazby, kdy může dojít k oscilacím výsledku kolem požadované hodnoty nebo dokonce k divergenci výsledné hodnoty. Oběma problémům byla během vývoje věnována velká pozornost. Metoda vymezuje tři fáze, ve kterých probíhá syntéza parametrů.

#### 4.1 PRVOTNÍ URČENÍ PARAMETRŮ (1. FÁZE)

Prvním krokem je interpolace zadaných bodů na požadované spektrální charakteristice křivkou. Následuje rozdělení požadované charakteristiky na několik segmentů, jak je znázorněno na Obr. 4.1. Počet segmentů vychází ze dvou parametrů – prvním z nich je uživatelem zadaná doporučená hodnota (podle kvalifikovaného odhadu, požadavku na přesnost a rychlost výpočtu), druhý parametr představuje omezení vycházející z možností při výrobě fázové masky (zadáva se jako minimální krok periody fázové masky).

Každá ze svislých čar na Obr. 4.1 znázorňuje střed segmentu, který je vypočítán podle rovnice (3.1) pro velikost periody vycházející z možností výroby fázové masky. Na střed každého segmentu je potom umístěna homogenní vláknová mřížka, jejíž maximální odrazivost odpovídá zhruba požadované odrazivosti v daném místě. Přitom plná šířka pásma se rovná přibližně dvojnásobku šířky segmentu, jak je naznačeno na Obr. 4.1.

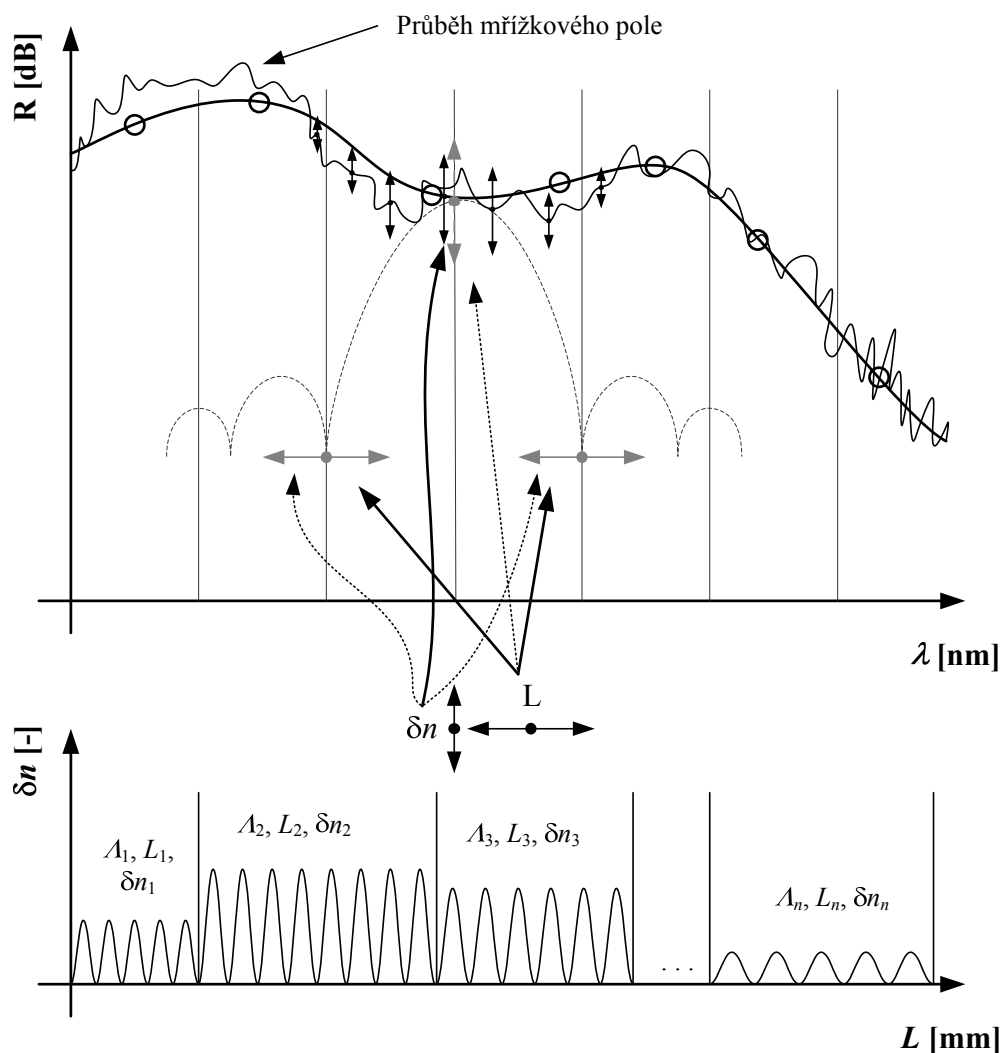


**Obr. 4.1:** Rozdělení požadovaného průběhu na segmenty a určení parametrů mřížek v jednotlivých segmentech (bez ohledu na odezvu celkové struktury)

Je tedy patrné, že v první fázi výpočtu se mřížková struktura nepočítá jako celek, ale odděleně se určují části průběhu bez ohledu na odezvu výsledného mřížkového pole. Vstupní parametry jednotlivých mřížek ( $A$ ,  $L$  a  $\delta n$ ) jsou využity jako počáteční hodnoty pro druhou, optimalizační, fázi.

## 4.2 OPTIMALIZACE ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ MŘÍŽKOVÉHO POLE (2. FÁZE)

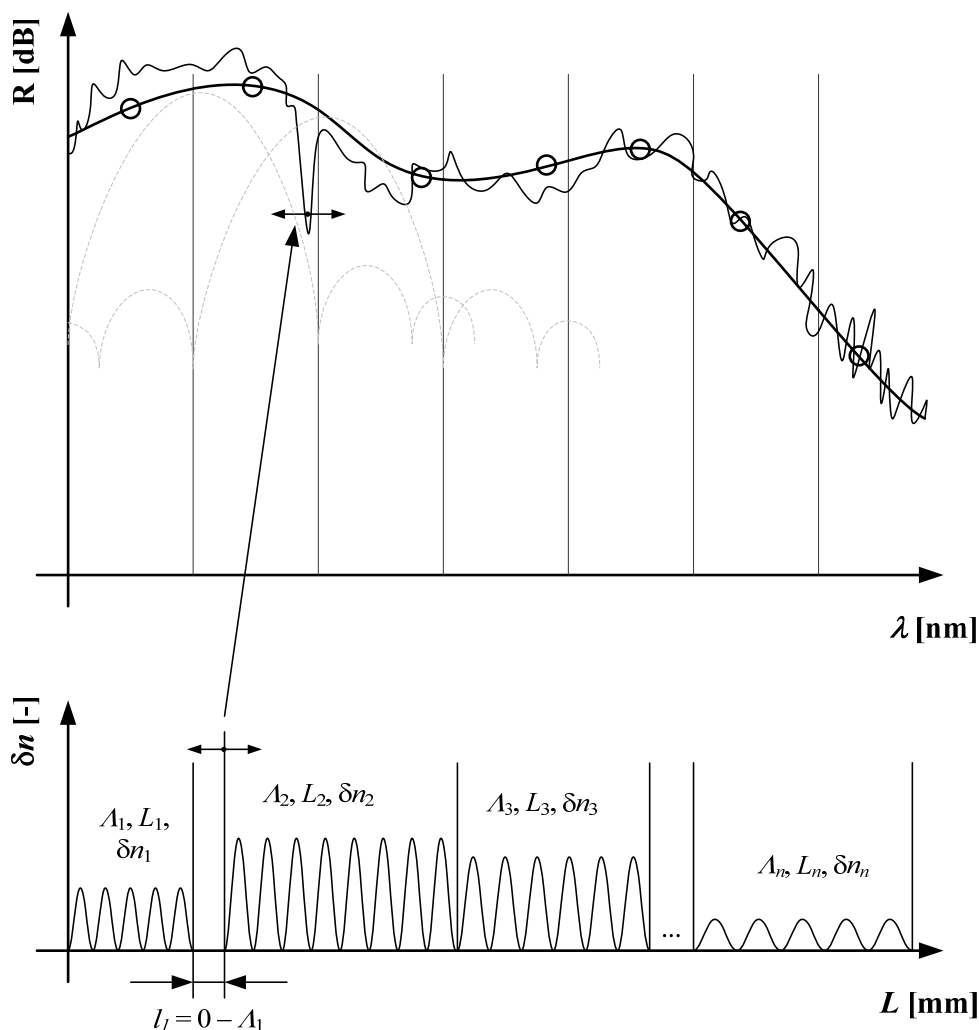
V druhé fázi jsou mřížky jednotlivých segmentů spojeny do jednoho celku, mřížkového pole. Složením mřížek dochází ke vzniku odezvy, která při správně nastavených parametrech jednotlivých segmentů přibližně kopíruje tvar požadovaného průběhu. Dále se postupně provádí optimalizace mřížek v jednotlivých segmentech a sleduje změna odezvy celého mřížkového pole, jak je naznačeno na Obr. 4.2. Pomocí vážené metody nejmenších čtverců je následně určeno optimum, kdy je odchylka vypočítaného průběhu odrazivosti co možná nejmenší od požadovaného.



**Obr. 4.2:** Optimalizace mřížkového pole změnou parametrů jednotlivých segmentů. Změnou parametrů  $\delta n$  a  $L$  jednotlivých segmentů se mění odezva celého pole v jeho okolí

### 4.3 OPTIMALIZACE MEZIMŘÍŽKOVÝCH PROSTOR (3. FÁZE)

Poslední, třetí, fáze představuje optimalizaci mezimřížkových prostor. Jak bylo popsáno v kapitole 3, změnou vzdálenosti sousedních mřížek v rozsahu  $0 - \Lambda$  dochází ke změně mezimřížkových rezonancí a tím ke změně spektrální odezvy. V některých případech tak může dojít vlivem změny mezimřížkových prostor k přiblížení odezvy vypočítané struktury k odezvě požadované



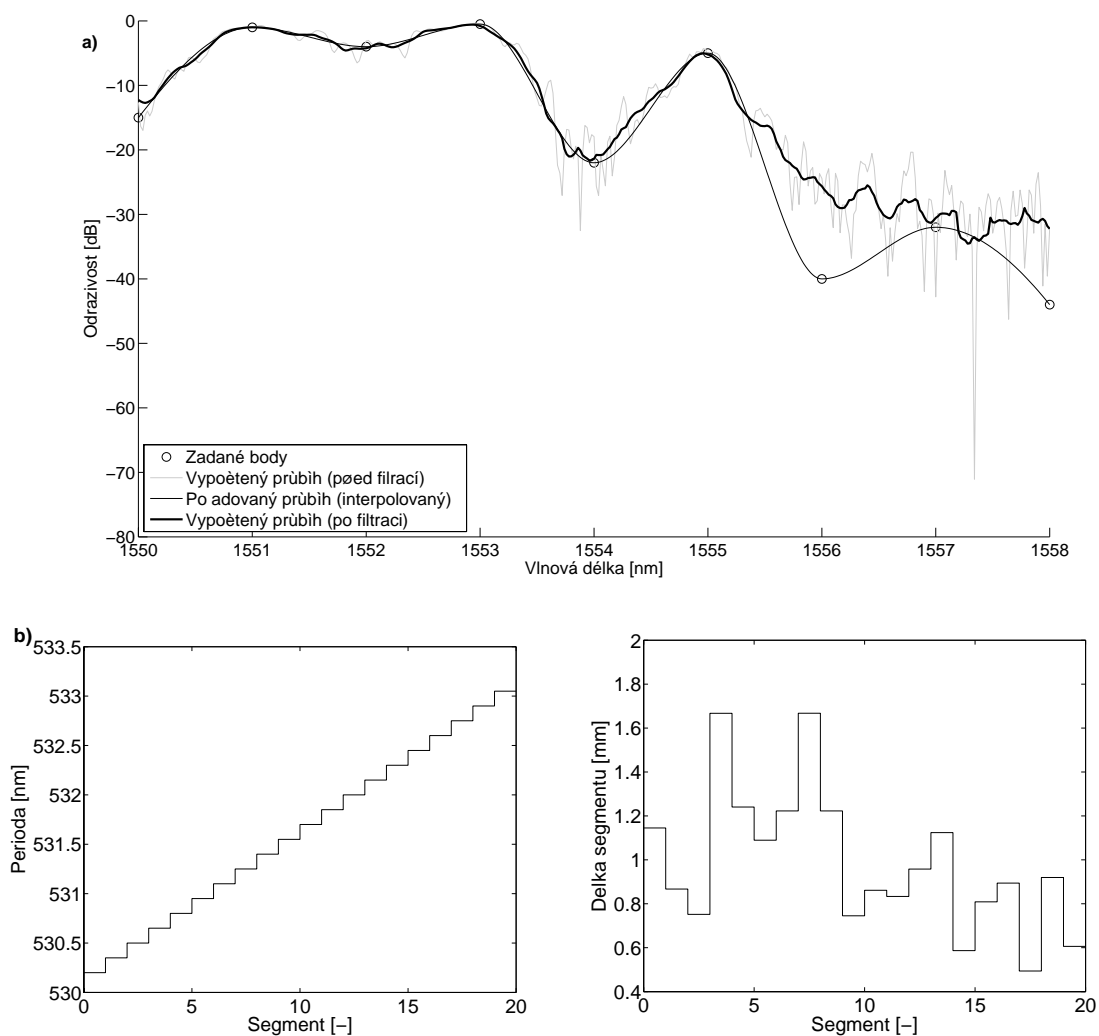
**Obr. 4.3:** Optimalizace odezvy mřížkového pole změnou délky mezimřížkových prostor, vlivem fázového skoku dochází ke vzniku „štěrbiny“ ve spektru odrazivosti

### 4.4 SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

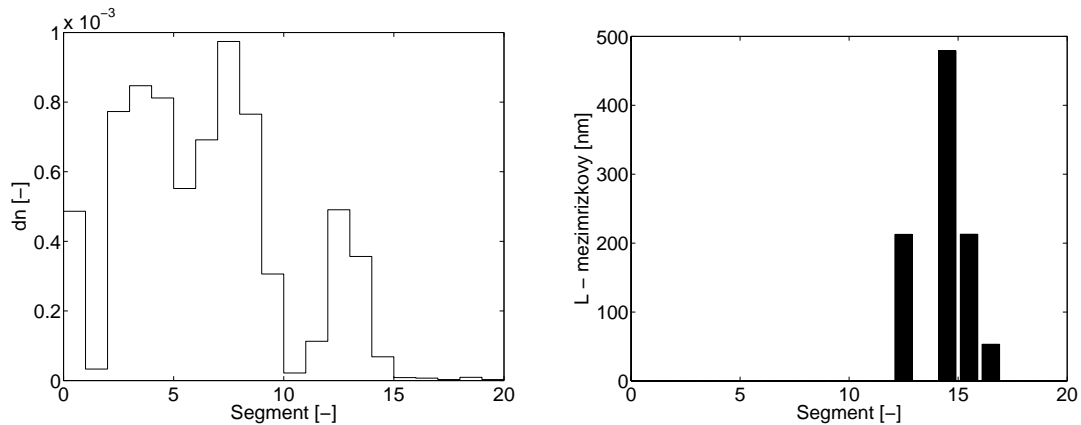
Navržená metoda je určena pro návrh složitých mřížkových struktur s požadovaným průběhem odrazivosti, přesto má její aplikace určitá omezení. Protože vlivem vnitřních rezonancí mezi sousedními mřížkami vždy dochází ke „zvrásnění“ průběhu odrazivosti, není prakticky možné dosáhnout výsledků s přesností vyšší než jednotky procent. V některých případech může u části vypočítané charakteristiky dojít k nárůstu chyby až na několik desítek procent. Právě z důvodu rezonancí uvnitř struktury není možné dosáhnout přesnějších výsledků

a tento jev se stává pro metodu limitujícím. Druhé omezení spočívá v možnostech definování struktury při velkém rozsahu hodnot odrazivosti zadaného průběhu. Pokud je odstup odrazivosti jednotlivých částí průběhu příliš velký, nastává situace, že je část charakteristiky s nízkou odrazivostí pod úrovní šumu sousedních úseků. V takovém případě je taková část průběhu zahlcena šumem okolních segmentů a není prakticky možné měnit tvar charakteristiky změnou parametrů v příslušném segmentu. I přes tato omezení je pomocí metody možné velmi dobře navrhovat vláknové difrakční struktury na základě požadovaného průběhu odrazivosti a technologických možností pro jejich výrobu.

Na Obr. 4.4 je uveden příklad požadovaného a vypočítaného spektrálního průběhu odrazivosti včetně výsledných parametrů popisujících složitou vláknovou difrakční strukturu. Požadovaný vstup byl definován celkem 9-ti souřadnicemi ( $\lambda$ ,  $A_R$ ). Zadané body jsou na obrázku vyznačeny jako „o“. Tyto body byly interpolovány křivkou s rozlišením 50 hodnot/nm. Výpočet proběhl ve všech třech fázích, vypočítaná charakteristika před a po vyfiltrování je vyobrazena na Obr. 4.4a).







**Obr. 4.4:** Příklad výpočtu a) spektrálního průběhu odrazivosti dle zadaných hodnot, b) parametry popisující hledanou difrakční vláknovou strukturu

Jak je z Obr. 4.4a) patrné, pro odstup signálu o cca 30 dB od svého maxima již vypočítaná křivka příliš nekopíruje tvar požadovaného průběhu. Toto je důsledek rezonancí uvnitř struktury, které převyšují hodnotu „šumové“ úrovně. Pro výpočet byly nastaveny omezení maximální celkové délky struktury  $L_{\max} = 20$  mm, minimální délka segmentu  $L_{\min} = 100$   $\mu\text{m}$ , maximální a minimální změny indexu lomu  $\delta n_{\min} = 10^{-6}$  a  $\delta n_{\max} = 10^{-3}$ , minimální krok periody fázové masky 0,1 nm. Na Obr. 4.4b) jsou znázorněny hledané parametry popisující strukturu, s ohledem na omezení vyplývající z výroby. Jedná se o parametry mřížkové struktury v jednotlivých sériově seřazených segmentech (v pořadí jak jdou za sebou) –  $A$ ,  $L$ ,  $\delta n$  a mezimřížkové vzdálenosti  $l$ .

V průběhu vývoje byly do programu zavedeny různé algoritmy urychlující celý proces syntézy parametrů. Čas výpočtu je však závislý na zadaných optimalizačních parametrech, požadované přesnosti a rozsahu zadaného průběhu. Protože s každou iterací optimalizačního algoritmu je spojeno velké množství matematických operací převážně s komplexními čísly, je vhodné na základě kvalifikovaného odhadu přizpůsobit parametry optimalizace na únosné hodnoty. V případě správného nastavení vstupních hodnot lze docílit i u rozsáhlejších úloh času výpočtu okolo 15-20 minut. V opačném případě může stejný výpočet zabrat i několik hodin. Protože se však jedná o velice specifický obor, nebylo při vývoji programu uvažováno jeho využití pro širokou veřejnost. Pro obsluhu a správné použití programu je tak zapotřebí alespoň základních znalostí prostředí Matlab, principů fungování a návrhu vláknových mřížek.

## 5 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo vyvinout metodu pro syntézu parametrů složitých vláknových difrakčních struktur s požadovaným spektrálním průběhem odrazivosti. Navržená metoda je založena na předpokladu, že složitou mřížkovou strukturu je možné rozdělit na několik krátkých homogenních mřížek s přesně definovanými parametry. Struktura jako celek pak dosahuje požadované odezvy. Protože struktura jako celek nevykazuje vlastnosti jako prostý součet jejích částí, bylo hlavní jádro problému v navržení postupů, které by pomocí zpětné analýzy vedly k určení neznámých vstupních parametrů.

Pro dosažení tohoto cíle však bylo nejprve nutné získat hluboké znalosti v oblasti metod pro modelování spektrálních charakteristik odrazivosti a skupinového zpoždění na základě rozměrů mřížek a fyzikálních vlastností vlákna [26]. V této části práce bylo nutné provést studii ke zjištění, která ze známých metod je vhodná pro další práci. Protože zvolená metoda pro návrh a simulaci vláknových mřížek tvoří základ celé práce, byla výběru vhodné metody věnována patřičná pozornost. Metody byly podrobeny analýze při návrhu a simulacích pokročilých vláknových mřížek [25]. Na základě znalostí základních parametrů mřížek [28] a metod, jejich srovnání [27] a porozumění byla zvolena metoda vrstvení dielektrika. Tato metoda poskytuje možnost modelování struktury mřížky na úrovni elementární struktury.

Na základě zvolené metody vrstveného dielektrika byl vytvořen matematický model popisující vláknové mřížky a mřížková pole. Při vývoji matematického modelu mřížky byl kladen důraz na jeho univerzálnost a možnosti zahrnutí co možná nejširší škály parametrů, které mohou ovlivnit odezvu mřížkových struktur. Ve vytvořeném modelu je možné zadávat nejen základní, ale i rozšířené rozměrové a materiálové vlastnosti použitého vlákna. Tak je možné sledovat velké množství vlivů, které působí na odezvu vláknových mřížek. Mezi tyto vlivy patří například fluktuace tvaru mřížky, strukturální poruchy způsobené nepřesnostmi při výrobě fázové masky použité pro výrobu mřížek, tvar jednotlivých mřížkových period. Z parametrů, které nesouvisí přímo s mřížkami, ale s vláknem do kterého je mřížka zapsána, je to například promítnutí vlivu disperze a útlumu do odezvy mřížky nebo mřížkového pole.

V rámci vývoje matematického modelu mřížky a mřížkových polí byl vytvořen program pro simulaci jejich spektrálních vlastností. Program byl napsán ve vývojovém prostředí Matlab. V období, kdy vznikala tato práce, byl popisovaný program také použit v rámci projektů k návrhu vláknových mřížek. Jedním byl projekt MPO pod označením FT/TA2/087 „Výzkum nových metod měření tlaku s galvanickým oddělením pro výbušné a elektromagneticky rušené průmyslové prostředí (OPTO)“, kde byla navržená mřížka použita pro kalibraci laserových diod. Druhý projekt, kde byl program využíván k návrhu vláknových mřížek pro stabilizaci polovodičových laserů, byl projekt GAAV pod označením B200650503 „Využití vláknových mřížek při konstrukci polovodičových laserových zdrojů pro přesnou laserovou interferometrii a spektroskopii“. Při řešení těchto projektů byly také publikovány některé výsledky spojené s touto částí práce [30], [29].

V další části práce bylo nezbytné (pomocí programu pro simulaci spektrálních průběhů odrazivosti a skupinového zpoždění) analyzovat chování vláknových mřížek a mřížkových polí. Na základě analýz byly získány cenné poznatky o tom, jaké změny tyto parametry způsobují ve spektru odrazivosti mřížky a jakou mírou se každý parametr na změně podílí.

Metoda pro syntézu parametrů složitých vláknových difrakčních struktur s požadovaným spektrálním průběhem odrazivosti byla vyvinuta na základě poznatků získaných při analýze chování vláknových mřížek a mřížkových polí. Motivací k vytvoření této metody byla skutečnost, že doposud známé metody pro návrh vláknových mřížek jsou založeny na simulacích spektrálního průběhu odrazivosti při zadaných parametrech popisujících mřížku (délka, změna indexu lomu, perioda, průběhy apodizace a chirpu). Návrh tedy probíhá pomocí kvalifikovaného odhadu parametrů mřížek a následným ověřením průběhu. V případě jednoduchých mřížkových struktur je možné poměrně rychle získat přehled o zadávaných parametrech a jejich adekvátních hodnotách. V případě složitějších struktur a specifických tvarech požadovaných průběhů je však prakticky nemožné navrhnout sadu správných parametrů. Proto byla vyvinuta metoda, která pro požadovaný spektrální průběh odrazivosti nalezne parametry popisující strukturu. Uspořádání vypočítané struktury je tvořeno několika do série zařazenými homogenními vláknovými mřížkami. Každá z těchto mřížek představuje segment struktury, v rámci kterého jsou parametry popisující tento segment (perioda, délka, změna indexu lomu) konstantní. Hledané parametry jsou v souladu se zadanými omezeními, která vychází z technologie výroby vláknových mřížek. Hledaná mřížková struktura má tedy parametry reálné pro výrobu. Řešeným problémem byl návrh algoritmu, který by vedl ke struktuře s požadovanou odezvou. Toho bylo docíleno použitím vhodných počátečních podmínek a výpočtem pomocí přímé metody se zavedením zpětné vazby. Využití tohoto postupu je mezi metodami pro návrh mřížek unikátní a vede k velice dobrým výsledkům. Navrženou metodu a program je možné s výhodou použít k návrhu optických filtrů pro speciální aplikace, senzorů s požadovanou odezvou a dalších specializovaných optických prvků.

Možnosti v dalším pokračování práce jsou na poli optimalizace výpočtů a rozvoji metody především v oblasti přizpůsobování parametrů pro následnou výrobu. Při výpočtu se nyní vychází pouze ze spektrálního průběhu odrazivosti, tedy amplitudové charakteristiky přenosové funkce. Program je jednoduše možné rozšířit o optimalizaci parametrů založenou i na skupinovém zpoždění mřížkové struktury, tedy o zahrnutí i fázové složky přenosové funkce. Současná verze programu pro syntézu parametrů je použitelná především pro rozvoj metody a její testování. Podnětem k další práci by mohlo být také dotažení programu do podoby použitelné pro širší využití a vytvoření pracoviště pro návrh a výrobu vláknových mřížek určených pro speciální aplikace.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] K. O. HILL, Y. FUJII, D. C. JOHNSON, B. S. KAWASAKI, *Applied Physics Letters* 32, 647, 1978.
- [2] P. J. LEMAIRE, R.M. ATKINS, V. MIZRAHI, W.A. REED, High pressure H loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO doped optical fibers, *Electron. Lett.* 29, pp. 1191–1193, 1993.
- [3] S. PISSADAKIS, L. REEKIE, An elliptical Talbot interferometer for fiber Bragg grating fabrication, *Review of scientific instruments*, vol. 76, 2005.
- [4] S. A. SLATTERY, D. N. NIKOGOSYAN, G. BRAMBILLA, Fiber Bragg grating inscription by high-intensity femtosecond UV laser light: comparison with other existing methods of fabrication, *Journal of the optical society of america B-optical physics*, vol. 22, pp. 354-361, 2005.
- [5] K. CHUANG, Y. LAI, Complex fiber grating structures fabricated by sequential writing with polarization control, *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 4, pp. 340-342, 2004.
- [6] P.G. KRYUKOV, YU.V. LARIONOV, A.A. RYBALTOVSKI, K.A. ZAGORUL'KO, A. DRAGOMIR, D.N. NIKOGOSYAN, A.A. RUTH, Long-period fibre grating fabrication with femtosecond pulse radiation at different wavelengths, *Elsevier, Microelectronic Engineering.*, no. 69, pp. 248–255, 2003.
- [7] D. D. DAVIS, T. K. GAYLORD, E. N. GLYTSIS, S. G. KOSINSKI, S. C. METTLER, AND A. M. VENGSARKAR, Long-period fiber grating fabrication with focused CO laser pulses, *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 302–303, 1998.
- [8] S. G. KOSINSKI AND A. M. VENGSARKAR, Splicer-based long-period fiber grating, in *Proc. Optical Fiber Communication Conf.*, pp. 278–279, 1998.
- [9] M. AKIYAMA, K. NISHIDE, K. SHIMA, A. WADA, R. YAMAUCHI, A novel long-period fiber grating using periodically released residual stress of pure-silica core fiber, in *Proc. Optical Fiber communication Conf.*, pp. 276–277, 1998.
- [10] K. HWANG, S. H. YUN, B. Y. KIM, Long-period fiber gratings based on periodic microbends, *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 1263–1265, 1999.
- [11] M. FUJIMAKI, Y. OHKI, Fabrication of long-period optical fiber gratings by use of ion implantation, *Opt. Lett.*, vol. 25, pp. 88–89, 2000.
- [12] W. H. LOH, M. J. COLE, M. N. ZERVAS, S. BARCELOS, R. I. LAMING, Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber-scanning beam technique, *Opt. Lett.* 20, pp. 2051-2053, 1995.
- [13] J. ALBERT, K. O. HILL, B. MALO, S. THERIAULT, F. BILODEAU, D. C. JOHNSON, L. E. ERICKSON, Apodization of the spectral response of fiber Bragg gratings using a phase mask with variable diffraction efficiency, *Electron. Lett.* 31, pp. 222-223, 1995.
- [14] C. YANG, Y. LAI, Apodised fibre Bragg gratings fabricated with uniform phase mask using low cost apparatus, *Electron. Lett.* 36, pp. 655-657, 2000.
- [15] R. KASHYAP, P. F. MCKEE, D. ARMES, UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibers using phase-shifted phase masks, *Electron. Lett.* 30, pp. 1977-1978, 1994.
- [16] J. CANNING, M. G. SCEATS, Pi-phase-shifted periodic distributed structures in optical fibers by UV post-processing, *Electron. Lett.* 30, pp. 1344-1345, 1994.

- [17] J. POULIN, R. KASHYAP, Novel tuneable on-fiber polymeric phase-mask for fiber and planar waveguide Bragg grating fabrication, *Optics express*, vol. 13, pp. 4414-4419, 2005.
- [18] L. P. CHI, W. F. LIU, C. W. WU, et al., Fabrication of fiber gratings using a heating process, *Optical Engineering*, vol. 44, 2005.
- [19] OZCAN A, DIGONNET MJF, LABLONDE L, et al., A new iterative technique to characterize and design transmission fiber Bragg gratings, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 1913-1921, 2006
- [20] BASKAR S, SUGANTHAN PN, NGO NQ, et al., Design of triangular FBG filter for sensor applications using covariance matrix adapted evolution algorithm, *Optics Communications*, vol. 260, pp. 716-722, 2006
- [21] IOCCO A., *Tunable fiber Bragg grating filters*, chap. 2, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Ph.D. thesis, 1999
- [22] KASHYAP R., *Fiber Bragg gratings*, Academic Press, San Diego, 1999
- [23] OTHONOS A., KALLI K., *Fiber Bragg gratings – Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Artech House, INC., Norwood, 1999
- [24] WELLER-BROPHY L., HALL D., Analysis of waveguide gratings: Application of Rouard's method, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 2, pp. 864-871, 1985
- [25] HELÁN R., MIKEL B., Simulation of Apodized Fiber Bragg Gratings, *Photonics Prague 2005 proceedings*, pp. 157-158, 2005
- [26] HELÁN R., URBAN F., MIKEL B., Design of Apodized-Chirped Fiber Bragg Gratings Based on Layered Dielectric Media and Transfer Matrix Methods, *EDS '05 IMAPS CS International Conference Proceedings*, pp. 423-428, 2005
- [27] HELÁN R., Comparison of methods for fiber Bragg gratings simulation, *In 29th International Spring Seminar on Electronics Technology, Conference Proceedings*, Dresden, Germany, pp. 163-168, 2006
- [28] HELÁN R., Uniform Fiber Bragg Gratings Properties, *Proceedings of the 11th conference student EEICT 2005, volume 2*, pp. 242-246, 2005
- [29] MIKEL B., HELÁN R., ČÍP. O, Stabilization of semiconductor lasers by fiber Bragg gratings for absolute laser interferometry, *Semiconductor Lasers and Dynamics II*. Washington, USA, pp. 61841-61848, 2006
- [30] KADLEC J., HELÁN R., VRBA R., Pressure sensor for explosive industrial environment based on optical measurement principle, *Proceedings of the International Conference on Systems (ICONS 2006)*. Morne, Mauritius, pp. 33-35, 2006

## CURRICULUM VITAE

Jméno: Radek HELÁN  
Narozen: 17. 6. 1981 v Brně  
Kontakt: helanr@gmail.com

### Vzdělání

- 1995 – 99 **Střední průmyslová škola elektrotechnická v Brně**  
Obor Telekomunikační technika
- 1999 – 04 **Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
Magisterské studium, obor Elektrotechnická výroba a management  
Téma diplomové práce: „Tenké vrstvy pro elektrochromní prvky“
- 2004 – 09 **Vysoké učení technické v Brně, Ústav mikroelektroniky**  
Postgraduální studium, obor Mikroelektronika a technologie  
Téma disertační práce: Modelování a optimalizace komplexních vláknových difrakčních struktur

### Praxe

- 2005 – 2008 **Vysoké učení technické v Brně, Ústav mikroelektroniky**  
Technický pracovník, částečný úvazek
- 2006 – 2007 **Akademie věd České republiky, Ústav přístrojové techniky v Brně**  
Pomocný vědecký pracovník, částečný úvazek
- od 2008 **Network Group, s.r.o**  
Obchodní a produktový manažer

### Účast na řešení projektů

- 2005 – 2007 **GAAV B200650503** Využití vláknových mřížek při konstrukci polovodičových laserových zdrojů pro přesnou laserovou interferometrii a spektroskopii (člen vývojového týmu)
- 2005 – 2008 **FT-TA2/087**, Výzkum nových metod měření tlaku s galvanickým oddělením pro výbušné a elektromagneticky rušené průmyslové prostředí – OPTO (člen vývojového týmu)
- 2006 Implementace metod pro simulaci vláknových mřížek do výuky (hlavní řešitel projektu)
- 2007 Systém pro měření spektrálních vlastností Braggových vláknových mřížek, (hlavní řešitel projektu)

### Jazyková znalost

Angličtina – slovem i písmem

### Ostatní dovednosti

Pokročilé programování v Matlabu, středně pokročilé programování v Delphi, znalosti strukturovaných metalických a optických kabeláží, znalosti optických prvků

### ***Abstrakt***

Disertační práce je věnována simulacím, analýze a návrhu vláknových mřížek. V současné době existuje několik přímých metod pro simulaci spektrálních charakteristik vláknových mřížek a mřížkových polí na základě zadaných parametrů popisujících jejich rozměry a materiálové vlastnosti. Tato práce se však zabývá problémem opačným, syntézou vstupních parametrů z požadované odezvy mřížkové struktury. Hlavním cílem práce je vytvoření metody, pomocí které bude možné nalézt parametry popisující složitou mřížkovou strukturu na základě zadaného spektrálního průběhu odrazivosti. Základním požadavkem pro syntézu vstupních parametrů je dosažení hodnot reálných z hlediska následné výroby navržené struktury.

Navržená metoda pro syntézu parametrů popisuje složitou vláknovou mřížkovou strukturu jako posloupnost několika homogenních mřížkových úseků zařazených do série. Na základě požadovaných a vypočítaných výstupních vlastností spektrální odezvy struktury jsou v iteracích postupně optimalizovány parametry vstupní. Optimalizace probíhá s přihlédnutím k technologickým možnostem pro následnou výrobu. Metoda může být s výhodou použita k návrhu optických pásmových zádrží, horních a dolních propustí nebo filtrů se speciálními vlastnostmi.

### ***Abstract***

The thesis discusses the fiber Bragg gratings simulations, analysis and design. In the present time, there are several methods to simulate fiber gratings response based on the stated parameters that define their dimensions and material features. However, this work deals with a different issue, that is the synthesis of the input parameters for demanded spectral responses. The main aim of the work is to achieve a synthesis method that would help to discover parameters describing advanced grating structure, based on the required spectral reflectivity. The basic demand for the parameter synthesis is an achievement of the real values in terms of the consequent production of the suggested structure.

The described synthesis method considers advanced fiber grating structure as a structure of several uniform grating sections. Establishment of input parameters is done subsequently, based on the demanded and calculated output spectral reflectivity properties. Optimizing process is limited by possibilities of the grating manufacture technology. It is possible to assemble arbitrary fiber grating structure taking in term the demanded spectral response. Nevertheless, the calculated input parameters are real for the following manufacture. This method could be used to design optical band stop filter, high-pass and low-pass filters or filters for special applications.