



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

FOTONICKÁ KRYSTALICKÁ VLÁKNA

PHOTONIC CRYSTAL FIBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN DOČKAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN ŠPORIK

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Martin Dočkal

ID: 101848

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Fotonická krystalická vlákna

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je prostudovat možnosti využití nekonvenčních optických vláken, především fotonických krystalických vláken. Student nastuduje a popíše jednotlivé typy vláken, provede jejich bližší charakteristiku. Popíše princip, na kterém fungují.

Student navrhne a ve vhodném programovém prostředí demonstruje princip funkce jednorozměrné periodické struktury, kterou by bylo možno použít jako vlnovod. Provede simulace disperzních charakteristik konvenčně dostupných mikrostrukturálních vláken a provede návrh změny struktury jádra za účelem získání disperzních charakteristik vhodných k aplikaci ve vláknové optice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JOANNOPOULOS, John, et al. Photonic Crystals : Molding the Flow of Light. 2nd. Princeton : Princeton University Press, 2008. 304 s.

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

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jan Šporík

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá využitím nekonvenčních optických vláken se zaměřením na fotonická krystalická vlákna. Jsou zde popsány jednotlivé typy fotonických krystalických vláken z hlediska fyzikálních a optických vlastností a přenosových parametrů. Je zde vysvětleno, co jsou fotonické krystaly, na jakém principu pracují a jaké jsou možné typy těchto krystalů. Dále jsou popsány typy fotonických vláken běžně užívaných v oboru optických vláken. Také je objasněno fotonické krystalické vlákno, zejména jeho struktura a hierarchie jednotlivých typů. V práci jsou charakterizovány, znázorněny a popsány jednotlivé typy fotonických krystalických vláken a je zde uvedeno využití konkrétních vláken. Pomocí programového prostředí je demonstrován princip funkce jednorozměrné periodické struktury na Braggově vlákně. Graficky jsou zde porovnány jednotlivé simulované návrhy struktury jádra s komerčně dostupnými vlákny. Výsledkem této práce je snaha o přiblížení funkčnosti fotonických krystalických vláken a možnosti nalezení nových vláken s vhodnými disperzními charakteristikami k možné aplikaci ve vláknové optice.

KLÍČOVÁ SLOVA

Braggovo vlákno, Brillouinova zóna, Disperze, Fotonický krystal, Mikrostruktura, Optické vlákno, Periodicita, Zakázané pásmo.

ABSTRACT

This graduation thesis deals with use of unconventional optical fiber with the intention of photonic crystal fiber. There are described types of photonic crystal fiber, their physical, optical and transfer characteristics. There is explained what are the photonic crystals, principle of their function and possible types of crystals. There are also detailed types of photonic fiber commonly used in the optical fiber branch. There is also explained photonic crystal fiber its structure a hierarchy of its types. In this thesis are described and demonstrated different kinds of photonic optical fiber and their use. There is demonstrated principle of one-dimensional periodical structure of Bragg fiber using simulation software. There can be seen graphical comparison of the simulated optical fiber core to commonly obtainable fiber. Outcome of this graduation thesis should be explanation of function of photonic crystal fiber and possibility of finding new type of fiber with optimal dispersion characteristics for use in fiber optics.

KEYWORDS

Bragg fiber, Brillouin zone, Dispersion, Photonic crystal, Microstructure, Optics fiber, Periodicity, Band gap.

CITACE PRÁCE

DOČKAL, M. *Fotonická krystalická vlákna*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 71 stran. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Šporik.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Fotonická krystalická vlákna“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 26.5.2011


.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Šporiku, za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování práce.

V Brně dne 26.5.2011


.....

podpis autora

OBSAH

Seznam tabulek.....	9
Seznam obrázků	10
Úvod	12
1 Fotonické krystaly	13
1.1 Rozdělení fotonických krystalů.....	13
1.1.1 Jednorozměrný fotonický krystal	13
1.1.2 Dvourozměrný fotonický krystal.....	14
1.1.3 Trojrozměrný fotonický krystal.....	14
1.2 Zakázané pásmo	16
2 PCF vlákna	17
2.1 Geometrie PCF vlákna.....	17
2.2 Typy PCF vláken.....	18
2.2.1 Braggovo vlákno.....	19
2.2.2 HC PCF	21
2.2.3 IG PCF	24
2.2.3.1 HN PCF	25
2.2.3.2 PM PCF	29
2.2.3.3 ESM PCF	34
2.2.3.4 LMA PCF	36
3 Simulace PCF vláken.....	41
3.1 Jednorozměrná periodická struktura	45
3.2 Návrh jádra PCF vlákna	48
3.2.1 LMA-5	49
3.2.2 LMA-10.....	54
3.2.3 LMA-15.....	58
3.2.4 LMA-20.....	62
3.2.5 Zhodnocení.....	66
Závěr	67
Seznam literatury	68
Seznam zkratek a symbolů.....	69
Seznam příloh	70
Přílohy.....	71

SEZNAM TABULEK

Tab. 2. 1: Fyzické vlastnosti HC vláken [14], [15], [16]	22
Tab. 2. 2: Optické vlastnosti HC vláken [14], [15], [16]	22
Tab. 2. 3: Charakteristické vlastnosti HC vláken [14], [15], [16]	23
Tab. 2. 4: Fyzické vlastnosti vláken s malým jádrem [11], [19]	26
Tab. 2. 5: Optické vlastnosti vláken s malým jádrem [11], [19]	27
Tab. 2. 6: Fyzické vlastnosti vláken s větším jádrem [11], [13]	27
Tab. 2. 7: Optické vlastnosti vláken s větším jádrem [11], [13]	27
Tab. 2. 8: Charakteristické vlastnosti pro HN vlákna větším jádrem [11], [13]	27
Tab. 2. 9: Fyzické vlastnosti PM vláken [18]	29
Tab. 2. 10: Optické vlastnosti PM vláken [18]	30
Tab. 2. 11: Fyzické vlastnosti LMA-PM vláken [11], [12], [16]	31
Tab. 2. 12: Optické vlastnosti LMA-PM vláken [11], [12], [16]	31
Tab. 2. 13: Doplnující optické parametry LMA-PM vláken [11], [12], [16]	31
Tab. 2. 14: Fyzické vlastnosti ESM vláken [11], [12]	35
Tab. 2. 15: Optické vlastnosti ESM vláken [11], [12]	35
Tab. 2. 16: Parametry přenášených vidů ESM vláken [11], [12]	35
Tab. 2. 17: Fyzické vlastnosti LMA vláken [11], [12]	38
Tab. 2. 18: Optické vlastnosti LMA vláken [11], [12]	39
Tab. 3. 1: Rozměry navržených prstenců	45
Tab. 3. 2: Výsledné hodnoty simulací	46
Tab. 3. 3: Fyzické vlastnosti simulovaných LMA vláken	49
Tab. 3. 4: Vidová analýza LMA-5	50
Tab. 3. 5: Frekvenční analýza LMA-5	51
Tab. 3. 6: Analýza překrytí LMA-5	51
Tab. 3. 7: Porovnání vláken LMA-5	51
Tab. 3. 8: Vidová analýza LMA-10	55
Tab. 3. 9: Frekvenční analýza LMA-10	55
Tab. 3. 10: Analýza překrytí LMA-10	56
Tab. 3. 11: Porovnání vláken LMA-10	56
Tab. 3. 12: Porovnání disperzí vláken LMA-10	56
Tab. 3. 13: Vidová analýza LMA-15	59
Tab. 3. 14: Frekvenční analýza LMA-15	59
Tab. 3. 15: Analýza překrytí LMA-15	60
Tab. 3. 16: Porovnání vláken LMA-15	60
Tab. 3. 17: Porovnání disperzí vláken LMA-15	60
Tab. 3. 18: Vidová analýza LMA-20	63
Tab. 3. 19: Frekvenční analýza LMA-20	63
Tab. 3. 20: Analýza překrytí LMA-20	64
Tab. 3. 21: Porovnání vláken LMA-20	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. 1: Jednorozměrný fotonický krystal	13
Obr. 1. 2: Dvourozměrný fotonický krystal	14
Obr. 1. 3: Trojrozměrný fotonický krystal	14
Obr. 1. 4: Periodicita a Brillouinova zóna [3], [4], [5]	15
Obr. 1. 5: Zakázané pásmo	16
Obr. 1. 6: Disperzní diagram 1. Brillouinovy zóny	16
Obr. 2. 1: Geometrie obecného PCF vlákna [2], [4], [6], [7]	17
Obr. 2. 2: Rozdělení PCF vláken	19
Obr. 2. 3: Obecné Braggovo vlákno	20
Obr. 2. 4: Obecné HC PCF vlákno	21
Obr. 2. 5: FC/PC konektor a spojka [10]	24
Obr. 2. 6: Vlákno s malým jádrem	25
Obr. 2. 7: Vlákno s větším jádrem	25
Obr. 2. 8: Obecné HN PCF vlákno	26
Obr. 2. 9: Obecné PM PCF vlákno	30
Obr. 2. 10: FC/APC konektor [10]	33
Obr. 2. 11: SMA-905 HP konektor [9]	33
Obr. 2. 12: PM PCF [7]	33
Obr. 2. 13: Obecné ESM vlákno	34
Obr. 2. 14: Obecné LMA PCF vlákno	37
Obr. 2. 15: LMA PCF vlákno se zápornou CD	38
Obr. 3. 1: Návrh jádra v MODE Solutions	41
Obr. 3. 2: Vidová analýza jádra v MODE Solutions	42
Obr. 3. 3: Frekvenční analýza jádra v MODE Solutions	43
Obr. 3. 4: Analýza překrytí jádra v MODE Solutions	44
Obr. 3. 5: Prstenec A: a) návrh struktury, b) rozložení intenzity elektrického pole E vidu	46
Obr. 3. 6: Prstence B: a) návrh struktury, b) rozložení intenzity elektrického pole E vidu	47
Obr. 3. 7: Prstence C: a) návrh struktury, b) rozložení intenzity elektrického pole E vidu	47
Obr. 3. 8: Rozložení intenzity energie E vidu s průměrem jádra 5 μm : a), c) s mikrostrukturami 1 μm , b), d) s mikrostrukturami 2 μm	50
Obr. 3. 9: Efektivní index simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	52
Obr. 3. 10: Útlum komerčně dostupného vlákna LMA-5 [11]	52
Obr. 3. 11: Útlum simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	53
Obr. 3. 12: Disperze simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	53
Obr. 3. 13: Navrhnuté vlákno LMA-10	54
Obr. 3. 14: Rozložení intenzity energie E vidu s průměrem jádra 10 μm : a) s 5 prstenci a mikrostrukturami 2 μm , b) se 7 prstenci a mikrostrukturami 2 μm	54
Obr. 3. 15: Efektivní index simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	57
Obr. 3. 16: Útlum simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	57
Obr. 3. 17: Disperze simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	58
	10

Obr. 3. 18: Přenosové parametry vlákna LMA-10k v závislosti na vlnové délce a) útlum, b) disperze [11]	58
Obr. 3. 19: Efektivní index simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	61
Obr. 3. 20: Útlum simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	61
Obr. 3. 21: Disperze simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	62
Obr. 3. 22: Přenosové parametry vlákna LMA-15k v závislosti na vlnové délce a) útlum, b) disperze [11]	62
Obr. 3. 23: Efektivní index simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	65
Obr. 3. 24: Útlum simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	65
Obr. 3. 25: Disperze simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce	66
Obr. 3. 26: Přenosové parametry vlákna LMA-20k v závislosti na vlnové délce a) útlum, b) numerická apertura a průměr plochy základního vidu [11]	66

ÚVOD

V dnešní době začíná být využita maximální kapacita (šířka pásma, přenosová kapacita, intenzita přenosu, počet vlnových délek), kterou mohou nabídnout „obyčejná optická vlákna“ bez úhony. Hlavní nevýhodou těchto vláken je útlum a deformace signálu zapříčiněny nečistotami při výrobě vlákna. Aby byly nežádoucí vlivy potlačeny a signál prošel celou trasou bez úhony, musí být na trati užity opakovací a zesilovače. Tím roste energetická náročnost na větší vzdálenosti. Proto vědci začali vyvíjet nové technologie jak zefektivnit přenos optického signálu. Jedním z těchto výzkumů byla oblast tzv. dutých optických vláken. Zde vycházeli z fyzikálních zákonů pro šíření světla ve vakuu a plynu (vzduch). Výsledkem bylo „duté optické vlákno“ připomínající mikrotrubičku. Tato „dutina“ nahradila jádro z křemičitého skla. Světelný paprsek se přenáší dutinou, tedy vzduchem po celé délce vlákna. Takto zkonstruované vlákno dosahuje vyšších přenosových rychlostí. Může také pracovat na vyšších vlnových délkách oproti klasickým optickým vláknům, protože se světelné paprsky nedeformují a neutlumují, jako tomu bylo při průchodu sklem. Ale tento výzkum měl jednu velkou nevýhodu. Vzduch má nízký index lomu, proto se světlo při dopadu na stěnu pláště vlákna neodrazí zpět do prostoru, ale vyváže se z vlákna ven. Tak přišly na řadu vlastnosti fotonových krystalů.

Vědci z Massachusettského technologického institutu MIT, Bathu a Corningu postupem času přišly na to jak využít fotonových krystalů v optickém vlákne. Vyvinuli strukturu z křemíku, pomocí které se podařilo zamezit průchodu světla na vlnových délkách od 1300 nm do 1700 nm. Tato struktura umí změnou rozložení děr přenášet světlo o dané vlnové délce a ostatním vlnovým délkám zamezí průchod vláknem. Toto seskupení odpovídá dvojrozměrnému fotonickému krystalu, pro který se také užívá název mikrostruktura. Tato mikrostruktura je vrstvou mezi jádrem a obalem optického vlákna tvořící „optické zrcadlo“ filtrující nežádoucí vlnové délky. Tak vznikly fotonická krystalická vlákna (PCF), také nazývaná mikrostrukturní optická vlákna MOF. Problematika těchto vláken je tématem této diplomové práce.

První kapitola je zaměřena na fotonické krystaly a jejich dělení. Dále zde budou uvedeny a vysvětleny periodické struktury, periodičita, Brillouinova zóna a princip zakázaného pásma.

Druhá kapitola popisuje obecné fotonické krystalické vlákna a jejich stavbu. Dále jsou uvedeny typy jednotlivých vláken, se zaměřením na bližší charakteristiku, vlastnosti, možnosti a dostupnost.

V třetí části jsou provedeny simulace za účelem demonstrace principu funkce jednorozměrné periodické struktury a návrhu struktury jádra za účelem získání vhodných disperzních charakteristik. Tyto vlákna jsou srovnána s komerčně dostupnými vlákny.

1 FOTONICKÉ KRYSTALY

Fotonický krystal v literatuře také nazýván jako fotonická pásmová propust je periodická dielektrická struktura, která v určitém kmitočtovém pásmu zabraňuje vniknutí elektromagnetických vln. Jak z názvu vyplývá, propouští jen fotony s určitou vlnkovou délkou. Tento jev se ukázal jako užitečný při výrobě optických vláken. Nejprve byly tyto krystaly vyvinuty pro mikrovlnné záření a následně pro infračervené záření.

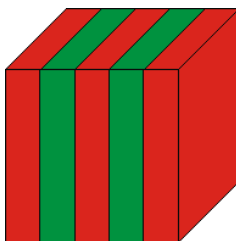
1.1 ROZDĚLENÍ FOTONICKÝCH KRYSTALŮ

Fotonické krystaly se dělí podle prostoru:

- Jednorozměrné.
- Dvouřozměrné.
- Trojřozměrné.

1.1.1 Jednorozměrný fotonický krystal

Jednorozměrný fotonický krystal lze nazvat pro jeho strukturu vícevrstevným filmem viz Obr. 1. 1. Nazývá se jednorozměrný, protože dielektrická konstanta ϵ se mění pouze podle jednoho směru. Například podle směru z , bude dielektrická konstanta ϵ závislá na z a budeme ji značit $\epsilon(z)$. Z toho vyplývá, že periodická dielektrická struktura neboli fotonický krystal bude periodický podle z [1].

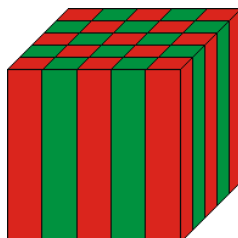


Obr. 1. 1: Jednorozměrný fotonický krystal

Systém se skládá ze střídajících se vrstev materiálů (červená a zelená) s různými dielektrickými konstantami viz Obr. 1. 1, to znamená s jinými prostorovými periodami.

1.1.2 Dvourozměrný fotonický krystal

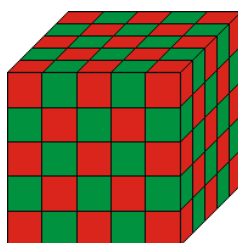
Dvourozměrný krystal Obr. 1. 2 může mít periodicitu ve 2 směrech a třetí zůstává konstantní. Toho se využívá pro šíření vln v optickém mediu. Dva směry mají periodicitu o rozsahu, který určuje Brillouinova zóna se svými třemi body určující symetrii [1]. Většinou se tato struktura zobrazuje v tzv. čtvercové nebo trojúhelníkové mříží viz Obr. 1. 4.



Obr. 1. 2: Dvourozměrný fotonický krystal

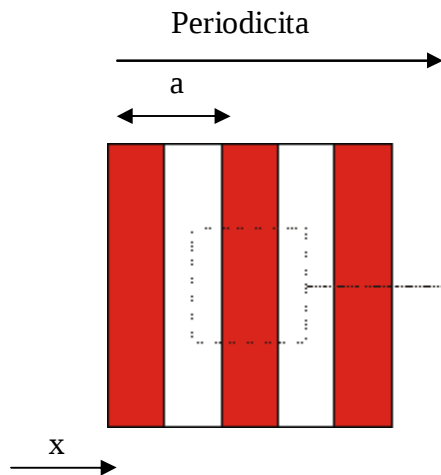
1.1.3 Trojrozměrný fotonický krystal

Trojrozměrný fotonický krystal, který je vidět na Obr. 1. 3 může mít periodicitu ve třech směrech. Tato varianta se u optických vláken nevyužije. Pro tyto účely postačí dvourozměrné pole s dvourozměrnou periodicitou.

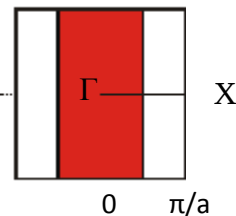


Obr. 1. 3: Trojrozměrný fotonický krystal

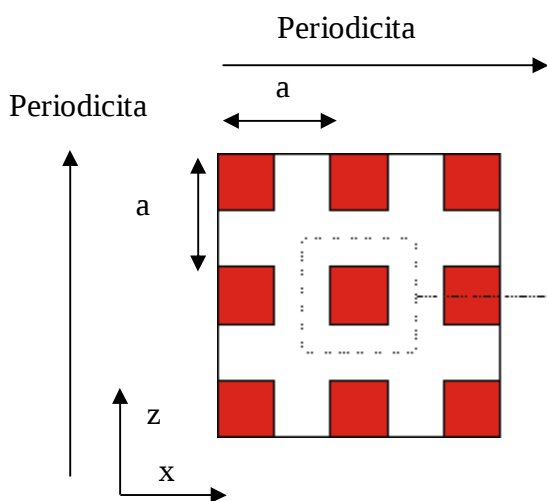
Další obrázek Obr. 1. 4 popisuje jednorozměrné, dvourozměrné a trojrozměrné struktury a z nich vycházející periodicitu. Na pravé straně je Brillouinova zóna s body symetrie pro daný rozměr.



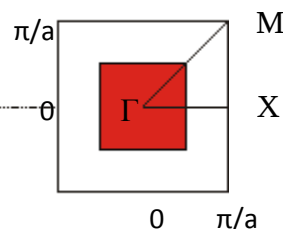
Elementární buňka v reciproční mřížce s vyznačenými body symetrie a nedělitelnými hranicemi Brillouinovy zóny definovaná pro 1D periodicitu.



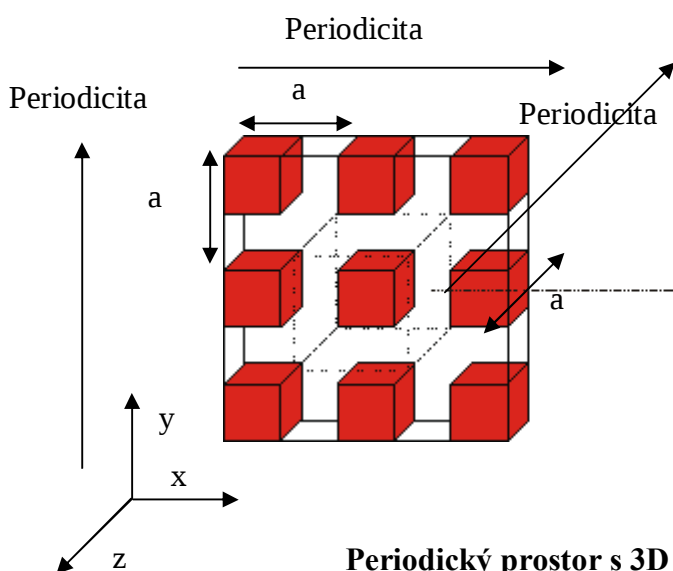
Periodický prostor s 1D periodicitou



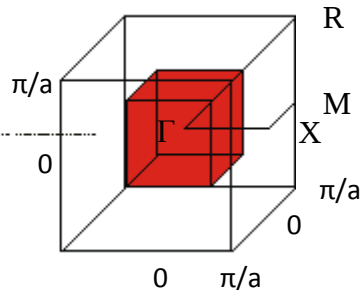
Elementární buňka v reciproční mřížce s vyznačenými body symetrie a nedělitelnými hranicemi Brillouinovy zóny definovaná pro 2D periodicitu.



Periodický prostor s 2D periodicitou



Elementární buňka v reciproční mřížce s vyznačenými body symetrie a nedělitelnými hranicemi Brillouinovy zóny definovaná pro 3D periodicitu.

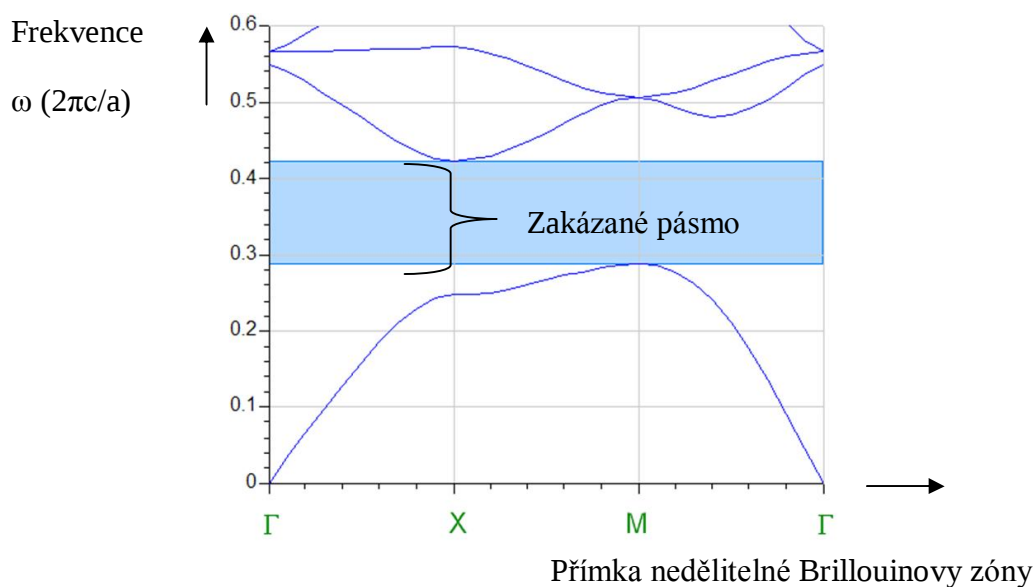


Periodický prostor s 3D periodicitou

Obr. 1. 4: Periodicita a Brillouinova zóna [3], [4], [5]

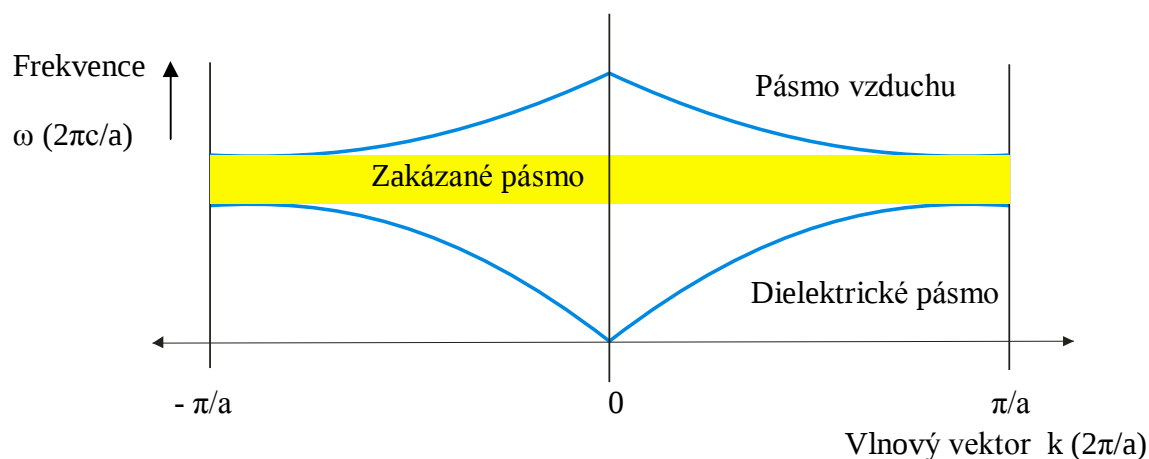
1.2 ZAKÁZANÉ PÁSMO

Fotonické zakázané pásmo viz Obr. 1. 5 [2], [8], nazývané také PBG je pro tento typ vlákna zásadní parametr. PBG určuje šířku pásma, ve kterém se světlo nešíří, ale pouze se odráží. To vychází ze struktury fotonických krystalů. Tyto krystaly se pro danou frekvenci chovají jako ideální zrcadlo. Toto zakázané pásmo je dvourozměrné, kde na ose x má 3 body symetrie spojené spojnicí definující přímkou nedělitelné Brillouinovy zóny [1], [3]. Na ose y jsou vyneseny hodnoty frekvence v závislosti na ose x .



Obr. 1. 5: Zakázané pásmo

Brillouinova zóna je oblast vymezující rozsah periody [8]. Pro první periodu je první zóna, pro druhou periodu druhá zóna, atd. Na obr. Obr. 1. 6 je možné vidět první Brillouinovu zónu [3], která vychází z 1D. Žlutý pruh zde popisuje zakázané pásmo. Vlnový vektor je označen jako k , a frekvence ω [1].



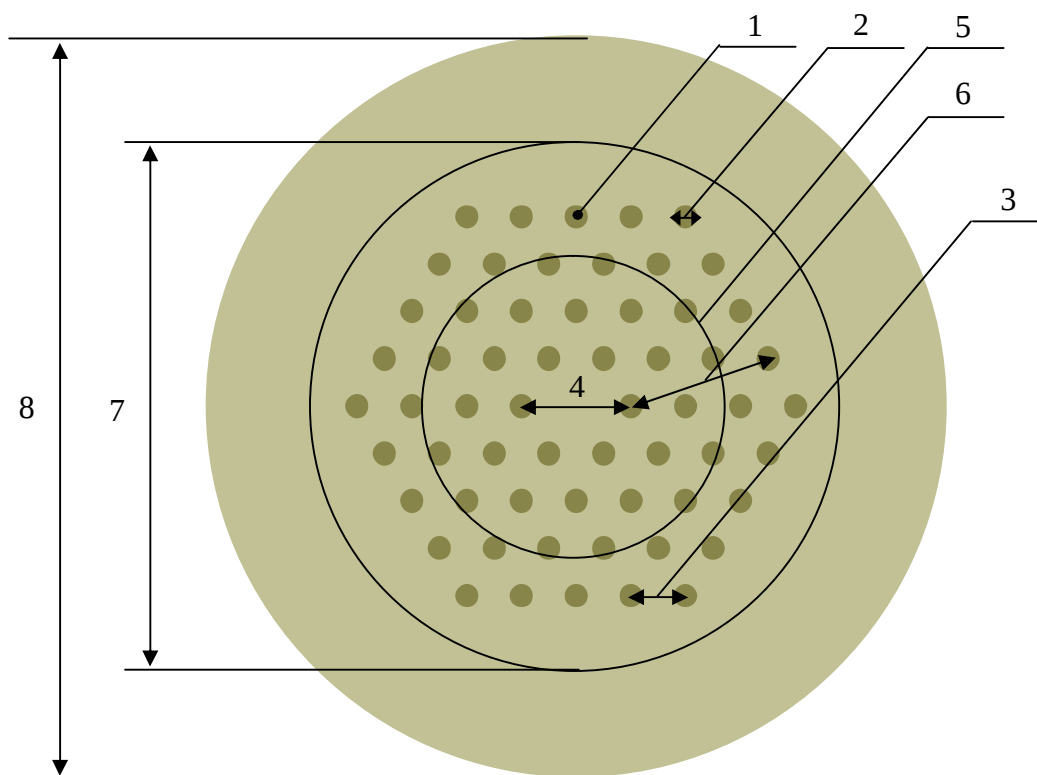
Obr. 1. 6: Disperzní diagram 1. Brillouinovy zóny

2 PCF VLÁKNA

Photonic Crystalline Fiber nebo také mikrostrukturní optická vlákna, je možné rozdělit do několika kategorií podle několika parametrů. Oproti klasickým vláknům nemají klasické prvky jako je jádro s vyšším indexem lomu světla a plášť s nižším indexem lomu světla. I přesto je technologický postup při výrobě podobný. Také se vychází z preformy, která je tažena za tepla do patřičných rozměrů. Jen preforma má profil několikrát zvětšeného PCF vlákna daného typu.

2.1 GEOMETRIE PCF VLÁKNA

Na Obr. 2. 1 je znázorněna geometrie obecného PCF vlákna zobrazeného i s jednotlivými parametry.



- 1 – Mikrostruktura
- 2 – Průměr mikrostruktury – d
- 3 – Rozteč mikrostruktur - Λ
- 4 – Průměr jádra - D_j
- 5 – Prstenec mikrostruktur
- 6 – Průměr regionu mikrostruktur
- 7 – Průměr pláště
- 8 – Průměr vlákna

Obr. 2. 1: Geometrie obecného PCF vlákna [2], [4], [6], [7]

Oproti klasickým optickým vláknům mají PCF vlákna poněkud složitější geometrii, díky různým typům jader a použití mikrostruktur. Mikrostruktury v anglické literatuře „hole“, někdy také „air hole“ snižují ve skle efektivní index lomu světla, hlavní důvod proč jsou vlastně mikrostruktury užity. Díky těmto mikrostrukturám se z vláken nevyvazují světelné paprsky s určitou vlnovou délkou.

Další parametry vlákna:

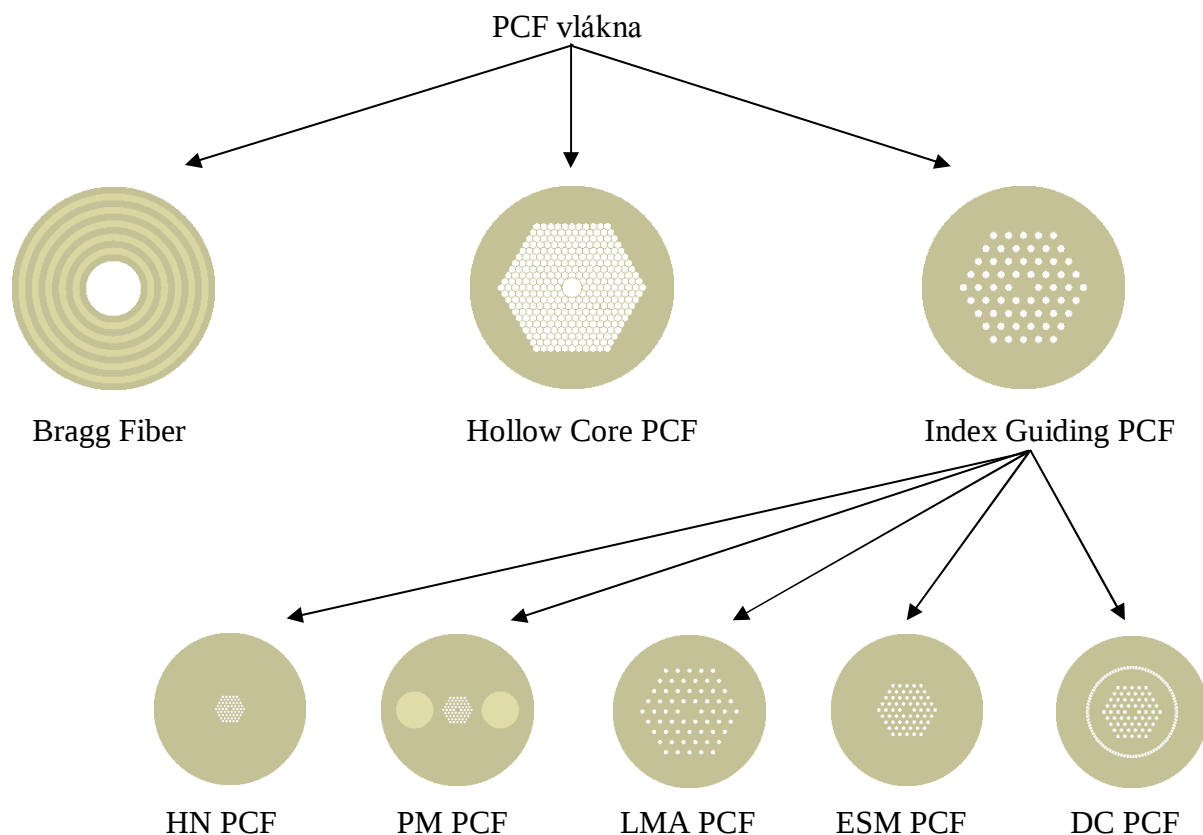
- Tvar mikrostruktur – nejčastěji bývají cylindrické, eliptické, hexagonální a čtvercové.
- Normalizovaná velikost mikrostruktury – d/Λ – vyjadřuje procentuální podíl vzduchu ke sklu ve vlákně, jsou-li všechny mikrostruktury stejné. Udává charakteristiku vlákna.
- Prstenec – mikrostruktury stejně vzdálené od jádra.
- Počet prstenců – se zvětšujícím se počtem prstenců klesají propagační ztráty.

2.2 TYPY PCF VLÁKEN

PCF vlákna se dělí na tři hlavní kategorie, a to na PCF vlákna jednorozměrná, PCF vlákna s dutým, prázdným jádrem, a PCF vlákna s pevným, skleněným jádrem.

První kategorie, byla vyvinuta dříve, jedná se o tzv. válcová vlákna, která využívá jednorozměrný fotonický krystal. Pro PCF vlákna s dutým jádrem se používá název Hollow Core Photonic Crystal Fiber. Třetí skupinou jsou vlákna s plným jádrem, většinou z křemičitého skla, jako u klasických optických vláken. Tato skupina se nazývá Index Guiding Photonic Crystal Fiber a dělí se na další typy podle stavby, vlastností a využití vlákna viz Obr. 2. 2.

Jak se časem ukáže, není to tak jednoduché, jak to na obrázku vypadá. Jednotlivé vlákna mohou být tvořena i různými kombinacemi. Například vlákna typu PM většinou bývají sloučena s LMA nebo HN typy, a tak vznikají efektivnější vlákna, i když zde je budeme řadit pod vlákna PM. To platí i při dotování různými prvky, pro zlepšení různých vlastností.



Obr. 2. 2: Rozdělení PCF vláken

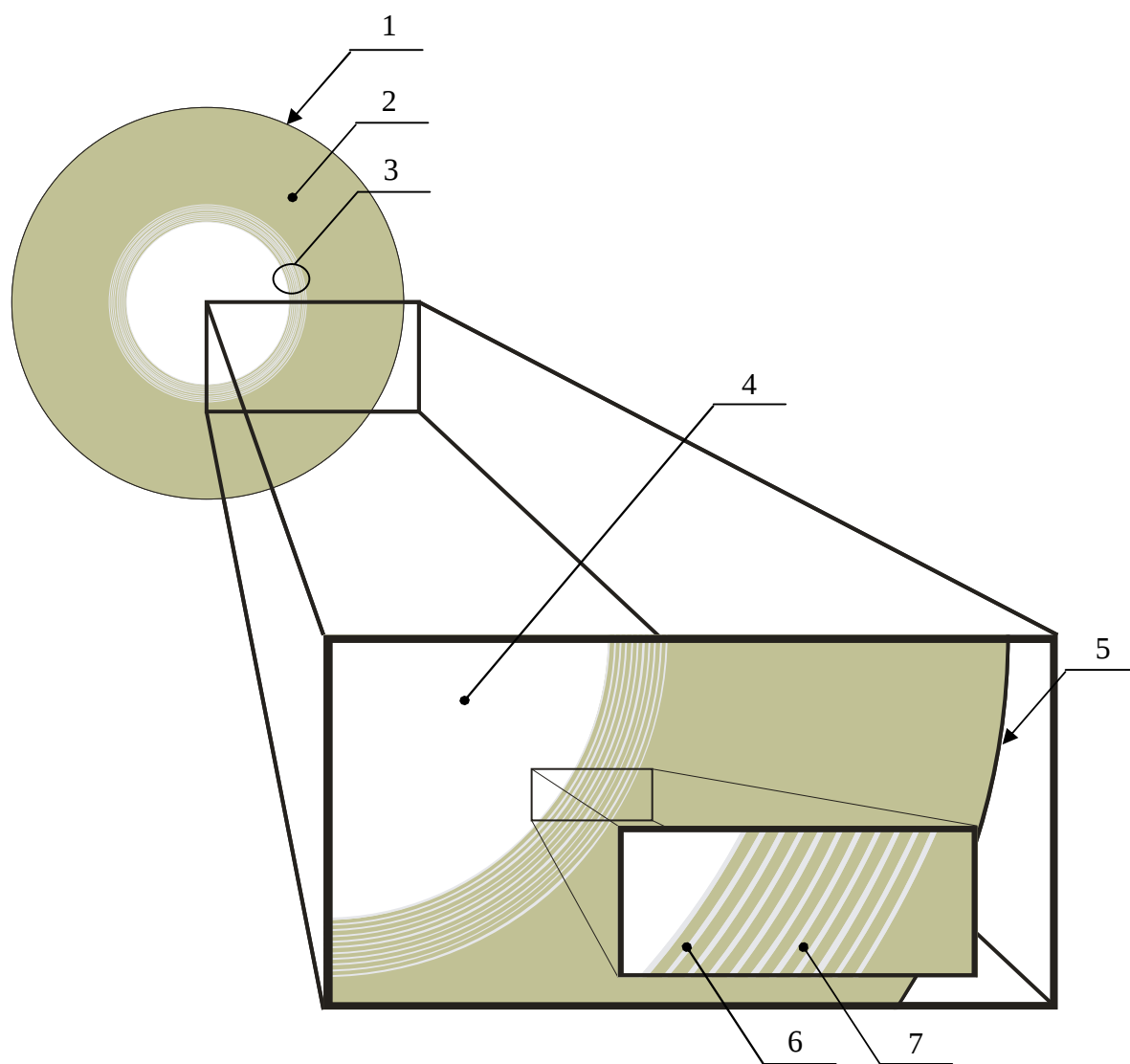
2.2.1 Braggovo vlákno

Dříve než se začaly používat vlákna s dvojrozměrnými fotonickými krystaly, a tedy dvourozměrnou periodicitou, bylo vyvinuto vlákno s jednorozměrnými fotonickými krystaly. To znamená, že paprsek se periodicky pohybuje mezi prostředími ve směru osy z , a tedy má jednorozměrnou periodicitu. Struktura takového vlákna byla jednoduchá, kolem jádra se vytvoří vícevrstvá folie, kde se střídá polymer s křídovým sklem. To je jen teoreticky řečeno, neboť tento typ vlákna má duté jádro, jak je možné vidět na Obr. 2. 3 a tedy by se dal zařadit i do kategorie Hollow Core. Tato struktura je známá jako Braggovo vlákno a bylo navrženo Melekhinem a Manekovem v roce 1968 [1]. V roce 1999 navrhl Fink využití všesměrového zrcadla pro tento typ vlákna. Všeměrový režim souvisí s nejpevnějšími optickými zábranami.

V laboratoři bylo vytvořeno vlákno s dutým jádrem a všesměrovým zrcadlem tvořeným vícevrstvou strukturou. Tato struktura se skládá z polymeru, střídajícího se v kruzích s křídovým sklem. Polymer zde tvoří vrstvy s nízkým indexem lomu světla, naopak křídové sklo zde zastupuje složku s vysokým indexem lomu světla. Tyto dvě složky byly určeny také z důvodu stejných tepelných vlastností, důležité při tvorbě vlákna. Protože vlákna se vytváří, většinou, tažením za tepla. Takže materiály s různými vlastnostmi by se při tažení za určité teploty chovaly jinak, a také by se roztahovaly jinak. Tím by se nedocílilo požadovaného výsledku.

Tyto vlákna omezí světlo na prostor dutého jádra, stejně jako vlákna typu Holog Core. Z tohoto důvodu byly použity pro usměrňování světla u vysokovýkonných laserů pro endoskopické operace na vlnových délkách, které jsou pro materiály s pevnou strukturou, sklo, umělá hmota a jiné, velmi ztrátové. Jednou z takových neobvyklých vlnových délek je například 1060 nm, které leží mimo telekomunikační okno TO.

Na Obr. 2. 3 je možné vidět průřez Braggova vlákna s všesměrovým zrcadlem. Ve zvětšeném výřezu je pak vidět vícevrstvá struktura.

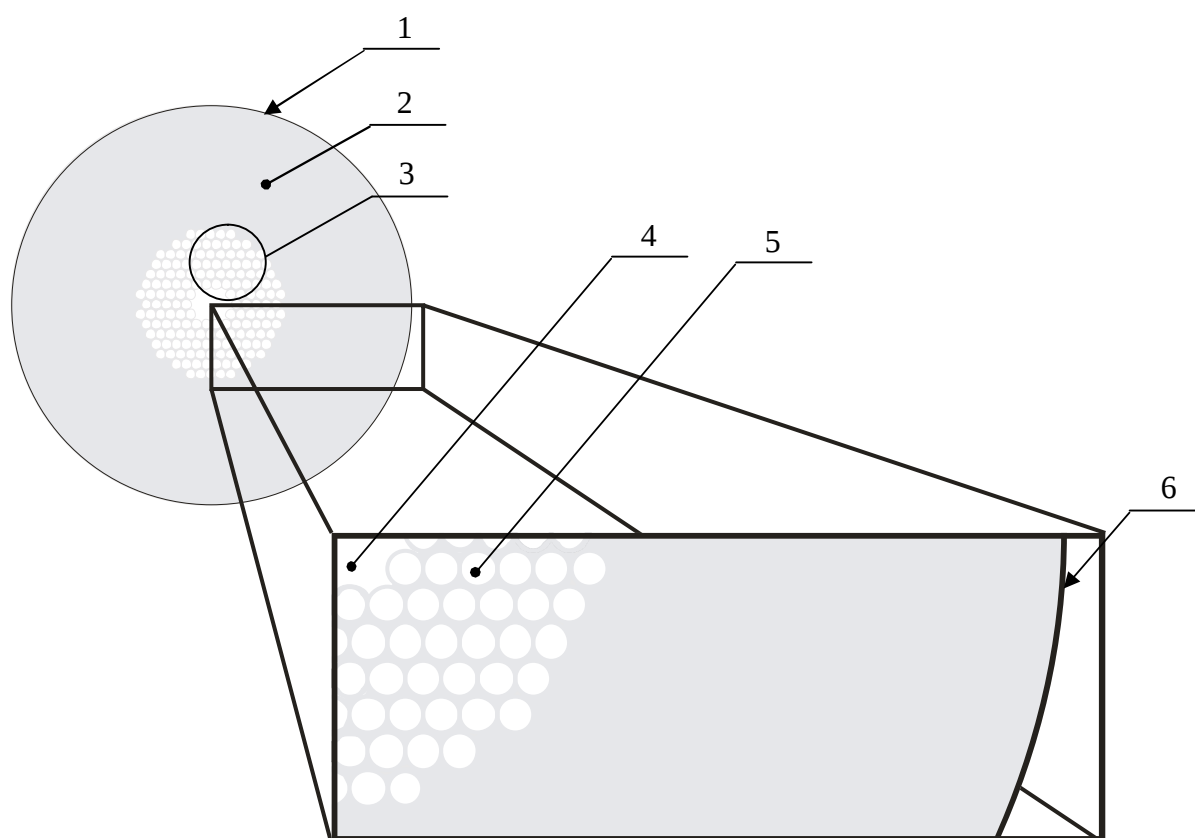


- 1 – Průřez Braggovým vláknem
- 2 – Plášť vlákna
- 3 – Vícevrstvá struktura
- 4 – Duté jádro
- 5 – Akrylátový nátěr - ochrana
- 6 – Vrstva polymeru
- 7 – Vrstva křídového skla

Obr. 2. 3: Obecné Braggovo vlákno

2.2.2 HC PCF

Hollow Core PCF nazývané také zkratkou PBF z anglického Photonic Bangap Fiber, jsou fotonická optická vlákna s prázdným jádrem, viz Obr. 2. 4. Photonic Bangap Fiber proto, že vlákna využívají mechanismu zakázaného pásma k šíření určitých vlnových délek. Jádro bývá vytvořené většinou vynecháním 7 až 20 buněk. Tím vznikne „díra“, která je vyplněná vzduchem, nebo jiným plynem. Z pravidla platí, čím větší prázdné (vzduchové) jádro, tím je vlákno určeno pro větší vlnové délky [2]. Vlákna sou tvořena z čistého křemičitého skla. Jejich ochrana je pak tvořena ochranným akrylátovým nátěrem. Poměr vzduchu k pevným částem regionu mikrostruktur je více než 90 % u tohoto typu vláken. Z toho vyplývá, že více než 95 % optického signálu se šíří vzduchem. Index vidu se pohybuje okolo 0,99.



- 1 – Průřez HC PCF vlákna
- 2 – Plášť vlákna
- 3 – Region mikrostruktur
- 4 – Duté jádro
- 5 – Mikrostruktura
- 6 – Akrylátový nátěr – ochrana

Obr. 2. 4: Obecné HC PCF vlákno

V dnešní době vyrábí dánská laboratoř NKT Photonics, jeden z největších výrobců PCF, vlákna HC PCF s 7 a 19 buněčnými jádry. V dnešní době se vyrábí několik typů HC vláken, např. HC19-1550-01 což je vlákno s 19 buněčným jádrem. Více v Tab. 2. 1. Tyto typy jsou určeny pro jednotlivé vlnové délky uvedené v Tab. 2. 2. V tabulce Tab. 2. 3 jsou uvedeny

dodatečné informace, jako například vlnová délka s nulovou disperzí – ZDW, velikost jader v buňkách a jiné.

Tab. 2. 1: Fyzické vlastnosti HC vláken [14], [15], [16]

Typ vlákna	Rozteč [μm]	Průměr jádra [μm]	Průměr regionu mikrostruktur [μm]	Průměr pláště [μm]	Průměr vlákna [μm]
HC-440-02	-	$3,7 \pm 0,5$	~ 18	74 ± 5	225 ± 20
HC-532-02	-	$4,8 \pm 0,5$	~ 23	81 ± 5	241 ± 20
HC-580 -02	1,64	$6,6 \pm 1$	~ 26	89 ± 5	245 ± 20
HC-633-02	-	$5,8 \pm 1$	~ 37	102 ± 5	248 ± 20
AIR-6-800	-	6 ± 1	-	122 ± 5	243 ± 10
HC-800-01	2,3	$9,5 \pm 1$	~ 40	135 ± 5	220 ± 50
HC-1060-02	2,75	10 ± 1	~ 50	123 ± 5	220 ± 50
HC-1550-02	3,8	10 ± 1	70	120	220
HC-1550-04	$4,1 \pm 0,1$	$10,6 \pm 0,3$	76	121 ± 2	220 ± 50
HC19-1550-01	3,9	20 ± 2	73	115	220
HC-1550-PM-01	$4,0 \pm 0,1$	$11,8 \pm 0,3$	72	120 ± 2	240 ± 50
HC-2000-01	-	$14,5 \pm 0,5$	~ 90	155 ± 5	275 ± 50

Tab. 2. 2: Optické vlastnosti HC vláken [14], [15], [16]

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Numerická apertura [-]	Útlum vlákna [dB/km]	Průměr plochy základního vidu [μm]
HC-440-02	440 ± 5	420 – 485	$\sim 0,2$	~ 1500	4 ± 1
HC-532-02	530 ± 5	485 – 565	$\sim 0,2$	~ 1200	4 ± 1
HC-580 -02	~ 580	560 – 610	$\sim 0,2$	< 1000	$5,3 \pm 1$
HC-633-02	~ 675	610 – 725	$\sim 0,2$	< 700	$4,4 \pm 1$
AIR-6-800	$\sim 775 \pm 5$	750 - 800	-	< 400	-
	780		$\sim 0,17$		
	830		$\sim 0,22$		
HC-800-01	~ 830	790 – 860	-	< 300	8,8
HC-1060-02	1060	790 – 860	-	< 100	$7,5 \pm 1$
HC-1550-02	1550	1500 – 1700	0,2	< 30	7,5
HC-1550-04	1535 ± 5	1470 – 1590	-	< 15	7,5
	1550		$\sim 0,2$		
HC19-1550-01	1570	1530 – 1620	$0,13 \pm 0,03$	< 20	13
HC-1550-PM-01	1565 ± 5	1500 – 1620	$\sim 0,2$	< 25	9 ± 1
HC-2000-01	2025 ± 5	1940 – 2150	$\sim 0,2$	< 20	12 ± 2

Tab. 2. 3: Charakteristické vlastnosti HC vláken [14], [15], [16]

Typ vlákna	Vlnová délka ZDW [nm]	Počet buněk jádra [nm]	Výkon přenášený vzduchem [%]	Obsah pevného křemíku [%]
HC-580 -02	560 ± 10	7	95	-
HC-633-02	630 ± 10	7	95	-
HC-800-01	-	7	95	85
HC-1060-02	-	7	95	80
HC-1550-02	-	7	95	75
HC-1550-04	-	7	95	75
HC19-1550-01	-	19	97	65
HC-2000-01	2012 ± 10	7	95	-

Vlastnosti HC PCF:

- Jádru plněné plyny, částicemi.
- Na vlnových délkách v pracovním pásmu dochází k nulové disperzi.
- Odolné proti odrazovým ztrátám.
- Kvazi-Gaussovo rozložení intenzity.
- Téměř žádné optické nelinearity.
- Vysoký výkonový práh pro nelineární efekty.
- Pracovní pásmo je 10% uvažované vlnové délky.
- Široký rozsah vlnových délek.
- Žádné Fresnelovy odrazy na konci vlákna.
- Malé poloměry ohybu bez změny přenosových vlastností.

Využití HC PCF pro:

- Dodávku ultra krátkých vysoce výkonných optických impulzů.
- Impulzní komprese a tvarování.
- Senzory a spektroskopie.
- Plynové lasery.
- Optické gyroskopy.
- Kapesní buňky.
- Snímání.

Konektory:

Pro HC PCF lze použít konektory typu FC/PC viz Obr. 2. 5, jako u běžných optických vláken. Tato vlákna se tedy sestaví stejným způsobem jako běžná optická vlákna, jen zde prochází světlo na každém konci přes rozhraní vzduch – sklo, popřípadě jiný materiál nahrazující sklo.



Obr. 2. 5: FC/PC konektor a spojka [10]

Dostupnost:

Vlákna je možné koupit jako klasicky zastřížené na určitou délku balení, nebo již osazené konektory FC/PC dle výběru. Dostupnost těchto vláken je při objednání na stránkách výrobců nejčastěji 2-3 dny, pro daný stát [6], [7].

Cena:

Cena za metr, 474 € pro 7 buněčná a 800 € pro 19 buněčná [7], přičemž s větší délkou klesá cena. Záleží na výrobcí a na dodavatelských firmách. Také na typu vlákna, délce a na počtu kusů.

2.2.3 IG PCF

Index Guiding PCF, česky indexem řízená fotonická krystalická vlákna. Oproti předchozímu HC PCF nemají duté jádro a tedy světlo se zde šíří v jádru s pevnou strukturou, většinou z křemičitého skla často i dopovaného prvky s vysokým indexem lomu světla jako Yb, Ge a jiné za účelem zvýšení indexu lomu světla v jádře. Proto také nepracují na principu zakázaného pásma, ale využívají modifikovaný úplný vnitřní odraz. Zatím to vypadá jako klasické vlákno, až na to, že klasické vlákno pracuje na principu úplného vnitřního odrazu.

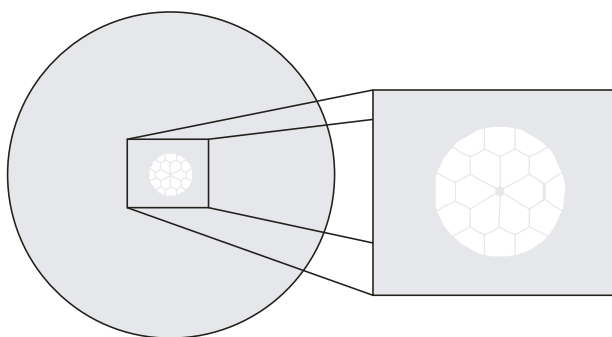
Proč tedy u IG PCF jsou mikrostruktury? Mikrostruktury tam jsou hned z několika důvodů. Hlavním důvodem je, že mikrostruktury snižují efektivní index lomu od jádra k plášti, nebo by se dalo říct také, že mikrostruktury snižují efektivní index lomu přímo pláště. U těchto vláken není totiž jednoznačně pevně určená hranice mezi jádrem a pláštěm [2]. Dále také snižují dráhu paprsku ve vlákně, snižují ztráty a ovlivňují chromatickou disperzi [4]. Tyto vlastnosti pak závisí na počtu prstenců obklopující jádro, s větším počtem prstenců hodnoty ztrát a disperze klesají.

2.2.3.1 HN PCF

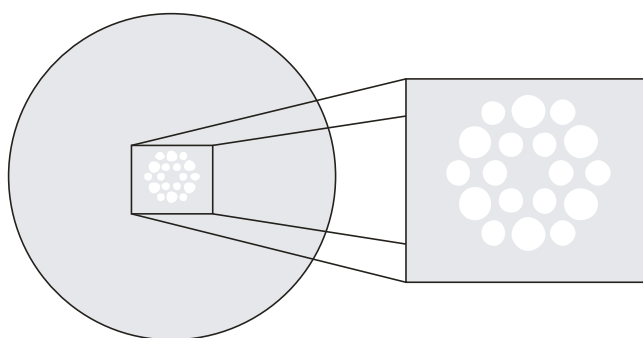
Highly Nonlinear PCF neboli vysoce nelineární PCF vlákno využívá úplného vnitřního modifikovaného odrazu. Na Obr. 2. 8 je možné vidět průřez obecným HN PCF vláknem. Existují dva typy.

První typ, má velmi malé jádro, které je velmi často dotované prvky, vkládající vysoký index lomu světla. To má za následek zvýšení vidové vazby. Jelikož je jádro velmi malé $1 - 2 \mu\text{m}$ má velmi malou vidovou plochu, jak je možné vidět na Obr. 2. 6. Mikrostruktury jsou naopak velmi velké, to vede k poměru vzduchu ke sklu d/Λ vyšším jak 90%. Protože je jádro dotované a mikrostruktury jsou velké, je zde velmi velký rozdíl mezi indexy lomu světla. Všechny tyto vlastnosti vedou k závěru, že tento typ je vhodný pro mnohavidový režim přenosu světelných signálů. A tedy i práce na nižších vlnových délkách jak je možné vidět v Tab. 2. 4. Optické parametry pak v Tab. 2. 5. Vláknem je možné užít pro supercontinuum.

Supercontinuum je termín zahrnující generování mnoha nelineárních efektů, které vedou k výraznému rozšíření spektra [6]. Tyto nelineární efekty zahrnují Ramanův rozptyl, vlastní fázovou modulaci, čtyřvlnné směšování a solitony – vlny šířící se prostorem. Superkontinuální spektra jsou produkována obvykle jako krátké, femtosekundové rozsahy, vysoko výkonné impulsy vstupující do nelineárních medií.



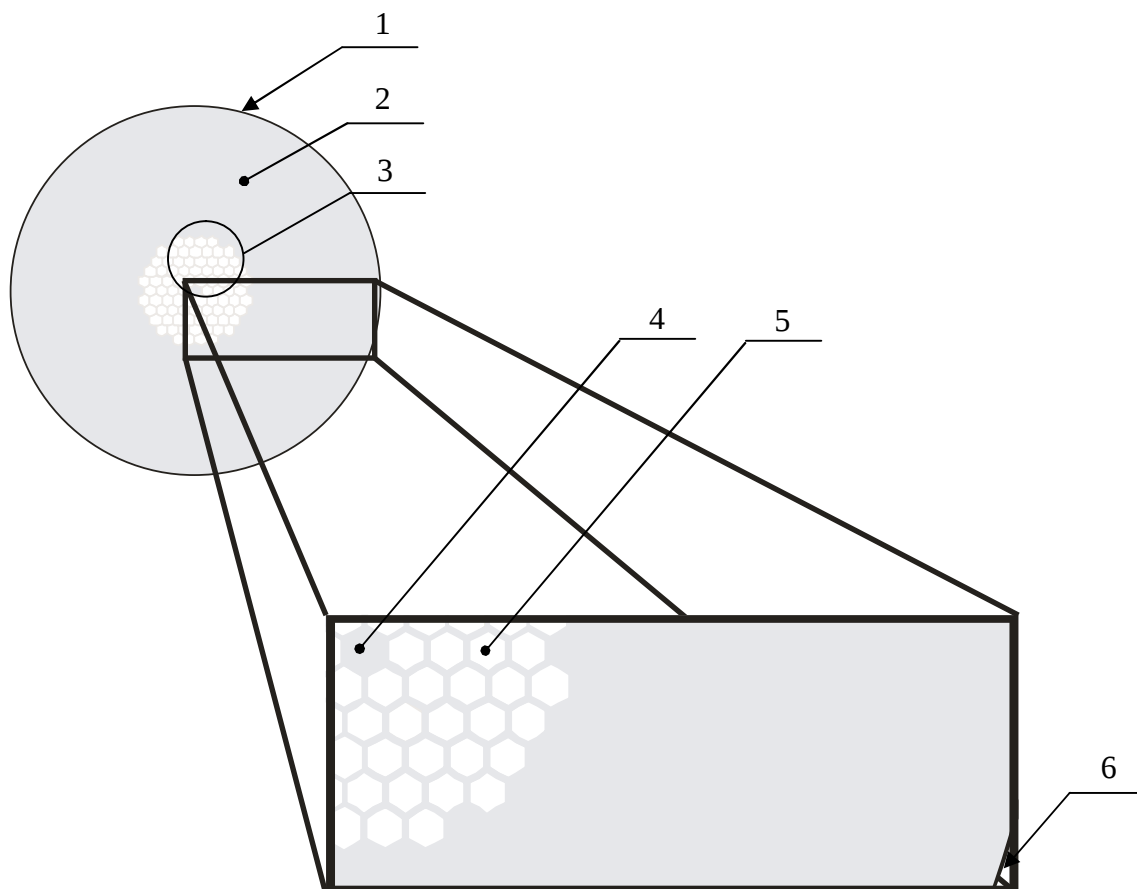
Obr. 2. 6: Vláknem s malým jádrem



Obr. 2. 7: Vláknem s větším jádrem

Oproti předchozímu typu má tento typ Obr. 2. 7 poněkud větší jádro $1,5 - 5 \mu\text{m}$. Jádro zde není dotované prvky zvyšující index lomu světla. Protože jádro není tak malé a dotované

nevzniká ve vlákně tak velký kontrast indexu lomu světla a tudíž také nedisponuje nelineárními efekty jako předchozí typ. V tomto případě jde pouze o nelineární funkce vlnové délky, tzn. průběhy různých charakteristik. Úpravou hodnot mikrostruktur lze upravovat disperzní charakteristiky. V Tab. 2. 6, Tab. 2. 7 a Tab. 2. 8 jsou uvedeny hodnoty HN vláken.



- 1 – Průřez HN PCF vlákna
- 2 – Plášť vlákna
- 3 – Region mikrostruktur
- 4 – Jádro – HN užívá dva typy
- 5 – Mikrostruktura
- 6 – Akrylátový nátěr – ochrana

Obr. 2. 8: Obecné HN PCF vlákno

Tab. 2. 4: Fyzické vlastnosti vláken s malým jádrem [11], [19]

Typ vlákna	Rozteč [μm]	Průměr jádra [μm]	Průměr regionu mikrostruktur [μm]	Průměr pláště [μm]	Průměr vlákna [μm]	Vzduchové plnění vlákna [%]
NL-1,5-670	$2,0 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	22	135 ± 5	260 ± 5	> 90
NL-2,4-800	$2,9 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,1$	$22 \pm 0,5$	104 ± 1	260 ± 5	> 90

Tab. 2. 5: Optické vlastnosti vláken s malým jádrem [11], [19]

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Útlum vlákna [dB/km]	Numerická apertura [-]	Koeficient nelinearity [$W^{-1} \cdot km^{-1}$]	ZDW [nm]	Průměr plochy základního vidu [μm]	Disperze [ps/nm/km]
NL-1,5-670	670	< 200	0,24	214	670 ± 5	1 ± 01	1
	1000	< 500					
	1380	< 120					
	1550	< 320					
NL-2,4-800	800	< 80	0,19	70	800 ± 5	$1,5 \pm 0,1$	0,55
	1000	< 60					
	1380	< 420					
	1550	< 50					

Tab. 2. 6: Fyzické vlastnosti vláken s větším jádrem [11], [13]

Typ vlákna	Průměr jádra [μm]	Průměr pláště [μm]	Průměr vlákna [μm]
NL-1050-ZERO-2	$2,3 \pm 0,3$	127 ± 5	245 ± 10
NL-1050-NEG-1	$2,3 \pm 0,3$	127 ± 5	245 ± 10
NL-1550-NEG-1	$2,1 \pm 0,3$	128 ± 5	250 ± 10
NL-1550-POS-1	$2,1 \pm 0,3$	128 ± 5	250 ± 10

Tab. 2. 7: Optické vlastnosti vláken s větším jádrem [11], [13]

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma - disperze [nm]	Numerická apertura [-]	Průměr plochy základního vidu [μm]	Disperze [ps/nm/km]
NL-1050-ZERO-2	1064	1025 – 1075	$\sim 0,37$	$2,2 \pm 0,5$	$< 4 $
NL-1050-NEG-1	1064	1025 – 1075	$\sim 0,37$	$2,2 \pm 0,5$	- 2
NL-1550-NEG-1	1550	1480 – 1620	$0,4 \pm 0,05$	$2,8 \pm 0,5$	< 0
		1510 – 1620			$> 1,7$
NL-1550-POS-1	1550	1480 – 1620	$0,4 \pm 0,05$	$2,8 \pm 0,5$	$0,5 > 1,5$

Tab. 2. 8: Charakteristické vlastnosti pro HN vlákna větším jádrem [11], [13]

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Koeficient nelinearity [$W^{-1} \cdot km^{-1}$]	Ztráty spojováním [dB]	Útlum vlákna [dB/km]
NL-1050-ZERO-2	980	1000 – 1100	-	-	-
	1064		~ 37	$< 0,7$	~ 30
NL-1050-NEG-1	980	1000 – 1100	-	-	-
	1064		~ 37	$< 0,7$	~ 30
NL-1550-NEG-1	1550	1510 – 1620	~ 11	$< 0,6$	< 9
NL-1550-POS-1	1550	1510 – 1620	~ 11	$< 0,5$	< 9

Vlastnosti HN PCF:

- Nenáchylné na ohyby velkých úhlů.
- Vysoká nelinearita.
- Vlnové délky 600 až 1700 nm s nulovou disperzí.
- Čtyřvlnné směšování FWM.

Využití HN PCF pro:

- Dodávku ultra krátkých vysoce výkonných optických impulzů.
- Ramanovo zesílení.
- Generace superkontinua pro optickou koherentní tomografii OCT.
- Spektroskopie.
- Femtosekundové lasery.
- Konverze vlnových délek.
- Optické parametrické zesilovače.

Konektory:

U tohoto typu lze použít konektory typu FC/PC viz Obr. 2. 5, jako u běžných optických vláken, nebo FC/APC viz Obr. 2. 10. Tyto vlákna se tedy sestaví stejným způsobem jako běžná optická vlákna. Další možností je vlákna určená pro supercontinuum zapouzdřit do kovového pouzdra s umývatelnými konci.

Dostupnost:

Vlákna je možné koupit jako klasicky zastřížené na určitou délku balení, nebo již osazené konektory dle výběru FC/PC, nebo FC/APC. Doručení těchto vláken je při objednání na stránkách výrobců nejčastěji 2-3 dny, záleží na vzdálenosti a dodavatelské službě.

Cena:

Výrobce na svých stránkách www.thorlabs.com udává cenu 1330,6 € za metr pro typy NL – nonlinearity [7]. Pro typy SC – supercontinuum je cena 599,9 € za metr [7].

2.2.3.2 PM PCF

Polarization Maintaining neboli vlákno které dokáže udržet nulovou polarizační vidovou disperzi pro celý rozsah vlnových délek. Jeho stavba je velmi zvláštní. Klasické jádro je ze dvou stran, ukončeno zvětšenými mikrostrukturami viz Obr. 2. 9. Díky tomu se nazývá jádro nekrhové, protože jej ovlivňují tyto dané mikrostruktury a tím i výsledný optický paprsek. Většinou se ale tyto dvě mikrostruktury považují za jádra. Index lomu světla je zde krokový, step index, což u klasických optických vláken bývá u mnohovidových vláken. PM vlákno je jednovidové s velkým indexem lomu mezi vzduchem a sklem. To má za následek silné formy Birefringencí.

Birefringence česky řečeno „dvojlom“ je proces kdy se světelný paprsek při lomu rozdělí na dva světelné paprsky, při přechodu některými materiály v závislosti na polarizaci světla [6]. Tento proces nastane tehdy, když je struktura materiálu anizotropní, tedy směrově závislý. A to v případě PCF vláken je. Má-li materiál jedinou anizotropní nebo optickou osu nazývá se jednoosým, pak dvojlom bude proces, kdy se přiřadí dva odlišné indexy lomu světla pro rozdílné polarizace materiálu. Výsledek je pak kratší délka odrazu, která snižuje spojování nucených ohybů mezi polarizačními stavy oproti ostatním PM vláknům bez dvojlomu. Teplotní koeficient je u těchto vláken 30krát nižší než u ostatních pnutě dvojlomných vláken.

Všechny tyto parametry pak dohromady zapříčiní, že PM vlákno má nulovou polarizační vidovou disperzi. To má za následek přenos vysokovýkonného polarizovaného světla bez nelineárních efektů a materiálových ztrát [2]. Největší podíl na tom však mají dvě jádra a vhodně rozložené mikrostruktury pro správné lomy vlnových délek.

Polarizační vidová disperze je důsledek rozdělení světla jakožto vlny na dvě složky, E a H. Každá ze složek se šíří s jiným indexem lomu světla. Zapříčiněno je to materiálem a vnějšími vlivy. Není závislý na vlnové délce. PM vlákna tento jev odstraňují.

Pro kabeláž těchto vláken může být užito ohebných ocelových trubek vyrobených opředěním. Nebo jsou vlákna opředena kevlarovou vrstvou, tvořící ochrannou trubičku. Při výběru se proto musí uvažovat, na co budou daná vlákna použita, kevlar dobře chrání proti napínání kabelu, ale není odolný na otěr ostrých předmětů [6].

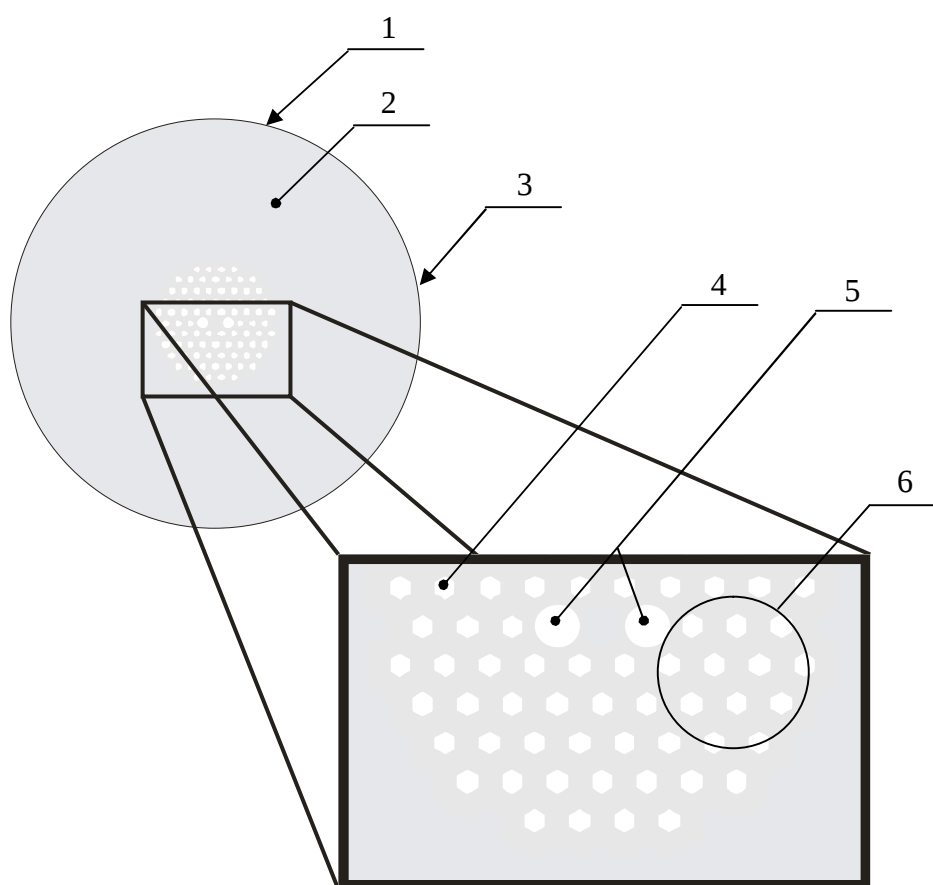
Tab. 2. 9: Fyzické vlastnosti PM vláken [18]

Typ vlákna	Rozteč [μm]	Průměr jader [μm]	Průměr mikrostruktur [μm]	Průměr regionu mikrostruktur [μm]	Průměr pláště [μm]	Průměr vlákna [μm]
PM-1550-01	4,4	4,5	2,2	40	125	245

Tab. 2. 10: Optické vlastnosti PM vláken [18]

Typ vlákna	Polarizace [nm]	Chromatická disperze [ps/nm/km]	PER [dB/100m]	Útlum vlákna [dB/km]	Průměr plochy základního vidu [μm]
PM-1550-01	1	54	> 30	< 1	3,6 / 3,1
	2	59			

Jediné klasické PM vlákno, označeno jako PM-1550-01 není sloučeno s jiným typem vlákna. Jeho fyzické a optické parametry jsou uvedeny v Tab. 2. 9 a Tab. 2. 10. Polarization Extinction Ratio – PER – je koeficient zániku polarizace a určuje hodnotu, kdy zanikne PM efekt.



- 1 – Průřez PM PCF vlákna
- 2 – Plášť vlákna
- 3 – Akrylátový nátěr – ochrana
- 4 – Mikrostruktura
- 5 – Dvojice jader
- 6 – Region mikrostruktur

Obr. 2. 9: Obecné PM PCF vlákno

Vlákna obsahující dva parametry jako například LMA-PM, jsou více užívaná, proto je také více typů. Jejich fyzické a optické parametry je možné vidět v Tab. 2. 11, Tab. 2. 12 a Tab. 2. 13.

Aktivní vlákna dopovaná Yb se mohou při zakončování omezit bloky křemíku, což umožní rozšířit délku rozptylu paprsku až na 8 mm.

Tab. 2. 11: Fyzické vlastnosti LMA-PM vláken [11], [12], [16]

Typ vlákna	Průměr jádra [μm]	Průměr pláště [μm]	Průměr vlákna [μm]
LMA-PM-5	5 ± 0,5	125 ± 3	245 ± 10
LMA-PM-10	10 ± 1	230 ± 5	350 ± 10
LMA-PM-15	15 ± 0,5	230 + 1/ - 5	350 ± 10

Tab. 2. 12: Optické vlastnosti LMA-PM vláken [11], [12], [16]

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Numerická apertura [-]	Útlum vlákna [dB/km]	Průměr plochy základního vidu [μm]
LMA-PM-5	470	400 – 2000	0,09 ± 0,01	< 30	4,2 ± 0,5
	1060		-	< 10	
LMA-PM-10	470	500 – 1700	-	< 30	8 ± 0,8
	1060		0,1 ± 0,05	< 5	
	1550		-	< 5	
LMA-PM-15	800	750 – 2000	-	< 25	12,5 ± 0,5
	1000		-	< 15	
	1060		0,09 ± 0,05	-	
	1550		-	< 10	

Tab. 2. 13: Doplnující optické parametry LMA-PM vláken [11], [12], [16]

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Dvojlom [-]	PER [dB]	Plocha základního vidu [μm ²]	Koeficient spojitosti [m ⁻¹]
LMA-PM-5	650	1,5 · 10 ⁻⁴	> 25	-	1,2 · 10 ⁻⁴
	1000				3,8 · 10 ⁻⁴
LMA-PM-10	-	~ 1,4 · 10 ⁻⁴	> 20	45 ± 10	-
LMA-PM-15	-	1,3 · 10 ⁻⁴	> 20	-	-

Vlastnosti PM PCF:

- Obsahuje dvě jádra.
- Jádro tvoří čisté křemenné sklo.
- Vidový profil se přibližuje Gaussovu rozložení – cylindrický tvar základního vidu.
- Jednovidové vlákno.
- Zachovává polarizaci pro všechny vlnové délky – nulová polarizační vidová disperze.
- Vlnová délka není závislá na průměru plochy základního vidu.
- Délka odrazu menší jak 4 mm.
- Nízké ztráty ve vláknu.
- Malé nelinearity.
- Nekonečně jednovidové operace bez velkého počtu vyvázání vidů z vlákna.
- Udrží vysoké průměrné hodnoty výkonů, stejně jako vysoké špičkové výkony.

Využití PM PCF pro:

- Dodávku ultra krátkých vysoce výkonných optických impulzů.
- Širokopásmová interferometrie – Interferometry.
- Senzory pro biomedicínu.
- Optické gyroskopy.
- Optické komunikace.
- Vidová filtrace.
- Zakončování laserů.
- Vedení více vlnových délek vláknem.
- Laboratorní aplikace.
- Možnost užití pro operace používající ESM vlákna.

Konektory:

Vlákna se zakončí koncovkou a nechají se oštípat pod úhlem 0° nebo 5° , kde délka koncovky určí rozptyl paprsku. Další možností je zakončení koncovkou a opatření konektorem. Pro PM PCF lze použít konektory typu FC/PC jako pro vlákno typu Hollow Core viz Obr. 2. 5, nebo FC/APC viz Obr. 2. 10. Další možností je užit konektor SMA-905HP viz Obr. 2. 11, pro vysokovýkonné optické přenosy. Ferule tohoto konektoru je tvořena z nerezové oceli a konektor tak dokáže přenášet výkony okolo 100 Wattů. Výrobce NKT Photonics ho proto doporučuje k těmto typům vláken [6].



Obr. 2. 10: FC/APC konektor [10]



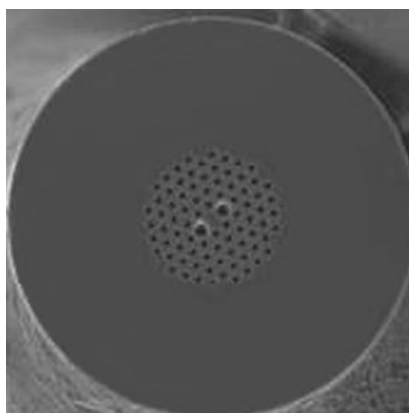
Obr. 2. 11: SMA-905 HP konektor [9]

Dostupnost:

Vlákna je možné koupit jako klasicky zastřižené na určitou délku balení, nebo již osazené konektory dle výběru buď FC/PC, FC/APC nebo SMA-905HP. Dostupnost těchto vláken je při objednání na stránkách výrobců nejčastěji 2-3 dny, pro daný stát.

Cena:

Cena za kus se pohybuje kolem 125 € za kus [6]. Nebo cena za metr 121 € [7], přičemž s větší délkou klesá cena. Záleží na výrobcí a na dodavatelských firmách. Také na typu vlákna, délce a na počtu kusů.



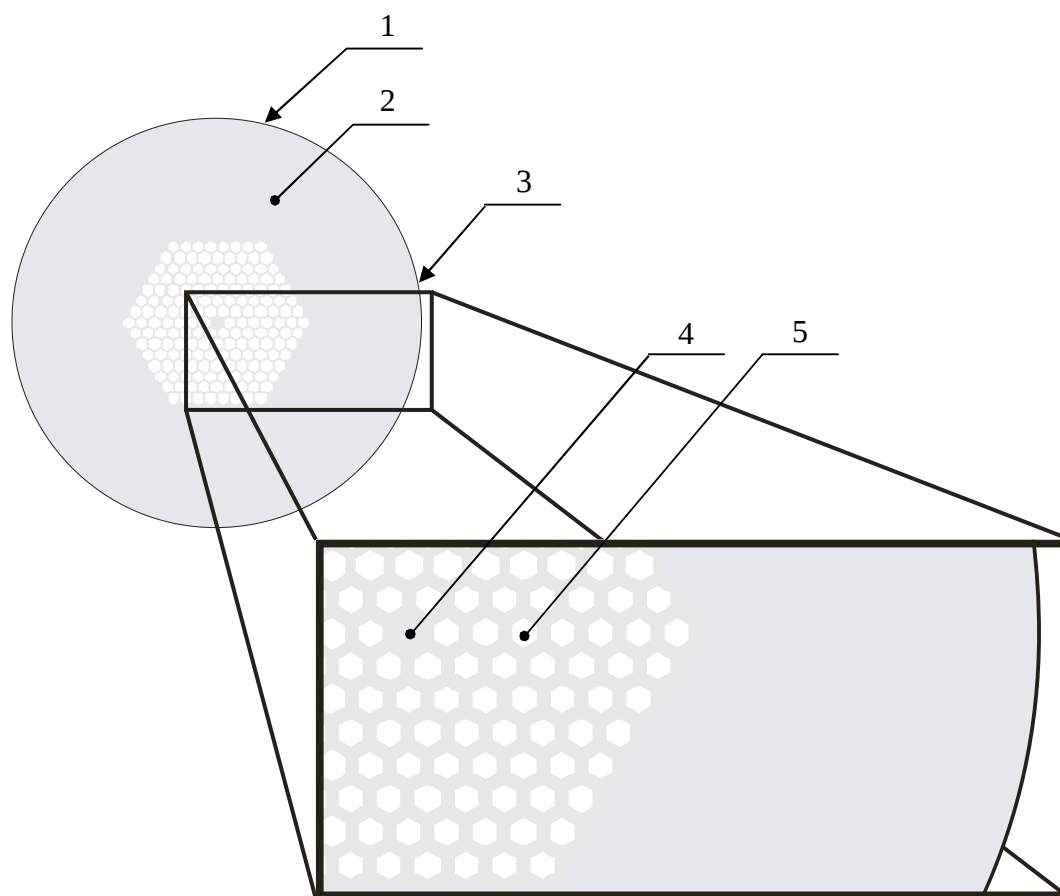
Obr. 2. 12: PM PCF [7]

2.2.3.3 ESM PCF

Endlessly Single Mode PCF, česky nazývané nekonečně jednovidové, nebo vlákno s nekonečně jednovidovým režimem. Vlákno získalo název díky tomu že, pro přenos optického signálu používá celý rozsah vlnových délek přibližně 800 až 1700 nm. A jak už z názvu vyplývá, je na tomto rozsahu vlákno jednovidové. Region mikrostruktur má tvar šestiúhelníku, jak je možné vidět na Obr. 2. 13.

Aby vlákno mohlo být jednovidové, musí splňovat několik podmínek. Jednovidový režim pracuje na větších vlnových délkách (1550 atd.). Proto normalizovaná frekvence musí být $v > 2,405$. S tím souvisí efektivní index lomu světla n_{eff} , musí být velký [2]. Velký bývá pro malé mikrostruktury. Z toho byl odvozen poměr $d/\Lambda \leq 0,45$, aby nebyla překročena hodnota 2,405.

Často se tyto vlákna slučují s vlákny typu PM a LMA a udávají se buď jako vlákna PM, LMA nebo ESM. Také často se tyto tři typy překrývají, a literaturu od literatury zařazují buď jako vlákna ESM nebo LMA, nebo podle toho jak to vyhovuje výrobci, [6], [7].



- 1 – Průřez ESM PCF vlákna
- 2 – Plášť vlákna
- 3 – Akrylátový nátěr – ochrana
- 4 – Jádro vlákna
- 5 – Mikrostruktura

Obr. 2. 13: Obecné ESM vlákno

Tab. 2. 14: Fyzické vlastnosti ESM vláken [11], [12]

Typ vlákna	Průměr jader [μm]	Průměr pláště [μm]	Průměr vlákna [μm]
ESM-12-02	12 ± 1	125 ± 3	240 ± 15

Tab. 2. 15: Optické vlastnosti ESM vláken [11], [12]

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Numerická apertura [-]	Útlum vlákna [dB/km]
ESM-12-02	1060	600 – 2000	-	< 4
	1384		-	< 15
	1550		0,1 ± 0.05	< 1

Tab. 2. 16: Parametry přenášených vidů ESM vláken [11], [12]

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Plocha základního vidu [μm ²]	Průměr plochy základního vidu [μm]
ESM-12-02	1060	80 ± 15	-
	1384		-
	1550		10 ± 0,1

Vlastnosti ESM PCF:

- Jádrem tvoří čisté křemenné sklo.
- Vlnová délka není závislá na průměru plochy základního vidu.
- Nízké ztráty ve vlákně.
- Malé nelinearity.
- Nekonečně jednovidové operace bez velkého počtu vyvázání vidů z vlákna.

Využití ESM pro:

- Dodávku ultra krátkých vysoce výkonných optických impulzů.
- Širokopásmová interferometrie – Interferometry.
- Optické komunikace.
- Senzory.

Konektory:

Vlákna se ukončují stejně jako u typu PM. Také se zakončí koncovkou a nechají se oštípat pod úhlem 0° nebo 5° . Další možností je zakončení koncovkou a opatření konektorem. Jako u PM PCF lze použít konektory typu FC/PC viz Obr. 2. 5, nebo FC/APC viz Obr. 2. 10. Další možností je užít konektor SMA-905HP viz Obr. 2. 11, pro vysokovýkonné optické přenosy [6], [17].

Dostupnost:

Vlákna je možné koupit jako klasicky zastřižené na určitou délku balení, tak jako tomu bylo u předchozího typu. Stejně tak osazené konektory dle výběru buď FC/PC, FC/APC nebo SMA-905HP, jako u předchozích typů. Dostupnost 2-3 dny, udávaná na stránkách výrobce.

Cena:

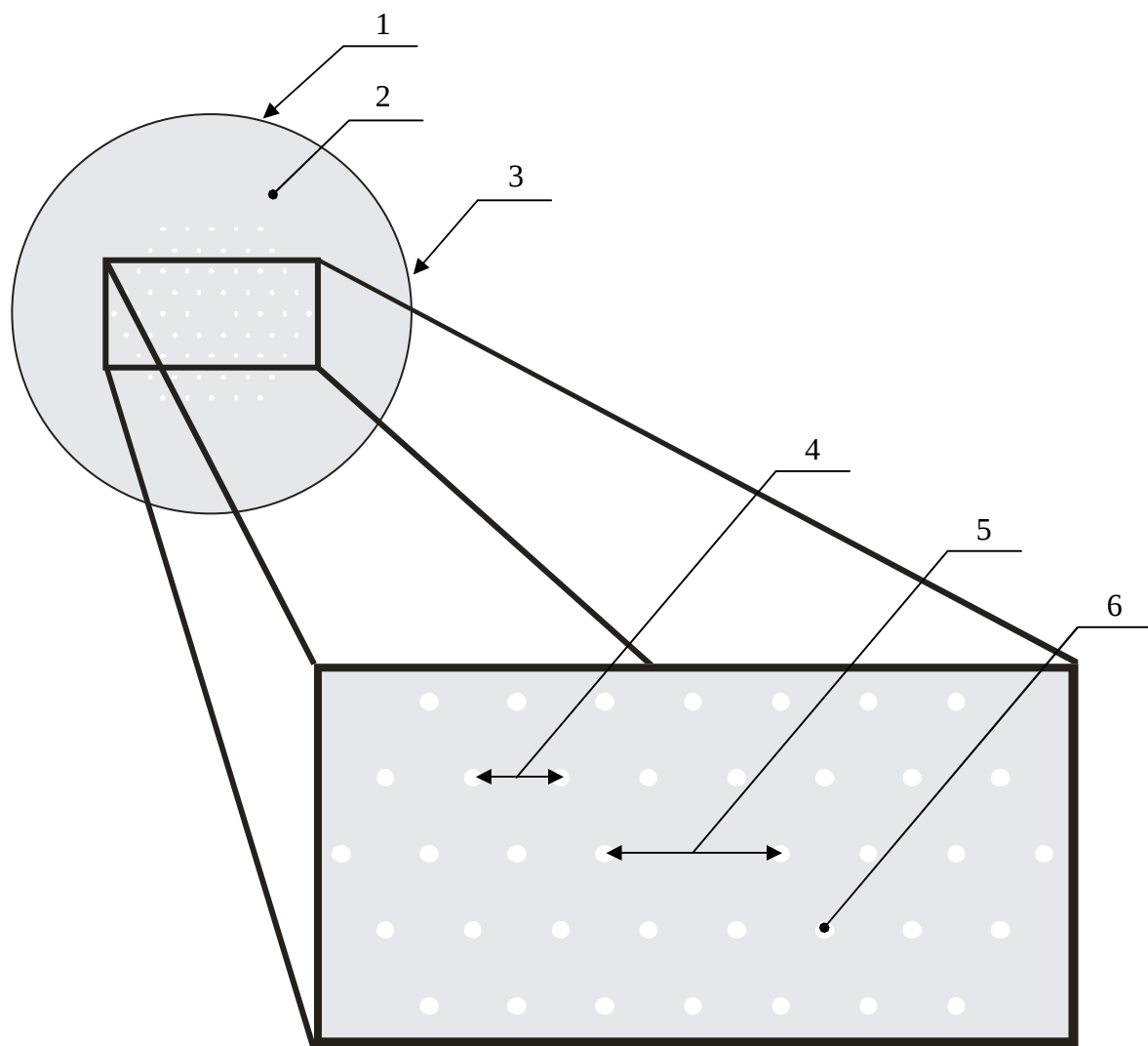
Ceny ESM a LMA vláken se pohybují stejně, a jsou udány u typu vlákna LMA.

2.2.3.4 LMA PCF

Large Mode Area mohou být užita pro přenos difrakcí omezených vysokých výkonů. Šířka pásma používající tyto vlákna jako pracovní vlnové délky bývá 750 – 1700 nm. Z toho vyplývá, že tento typ vláken je vhodný pro jednovidové užití [4]. Zde také platí, čím větší jádro, tím větší vlnové délky pro které je určeno. To je způsobeno malými průměry mikrostruktur, kontrastující s extrémně velkými roztečemi mikrostruktur [2]. Zároveň to má i za následek poměrně velký průměr jádra. Velmi velké vidové plochy umožňují přenášet optické signály o vysokých výkonech bez nelineárních efektů a materiálních ztrát. Čím menší jsou mikrostruktury, tím větší je nebezpečí vyvazování světelného paprsku z jádra do pláště. Proto jsou tato vlákna velmi náchylná na poloměr ohybu. Vlákna jsou často také ve verzích s nulovou polarizační vidovou disperzí pro celý rozsah vlnových délek.

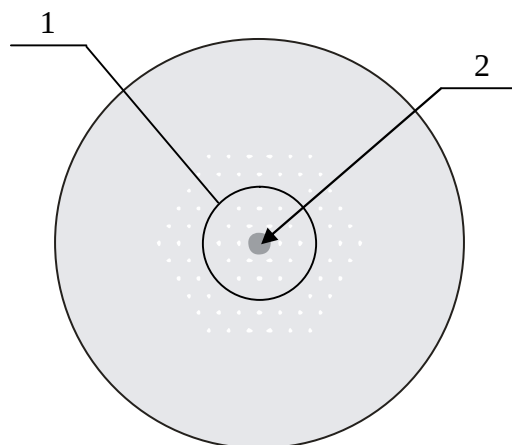
Klasická LMA vlákna jako na Obr. 2. 14 se pak mohou upravit tak, aby měli zápornou chromatickou disperzi. To se provádí tak, že se jádro často dopuje germaniem Ge a v regionu mikrostruktur vytváří defekty, tak aby vlákno mělo zápornou chromatickou disperzi. Průřez vláknem je možné vidět na Obr. 2. 15. V tomto typu vláken se světelné paprsky s malými vlnovými délkami šíří v dopovaném jádře a světelné paprsky s velkými vlnovými délkami se šíří v defektu mikrostruktur.

K čemu by ale bylo, aby se nám chromatická disperze dostala do záporných hodnot. Odpověď je jednoduchá. Vláka se zápornou chromatickou disperzí se připojí na konec, nebo začátek, vlákna s kladnou chromatickou disperzí, mohou se i střídát. Taková trasa pak má za splnění mnoha podmínek ve výsledku nulovou chromatickou disperzi CD.



- 1 – Průřez LMA PCF vlákna
- 2 – Plášť vlákna
- 3 – Akrylátový nátěr – ochrana
- 4 – Rozteč mikrostruktur Δ
- 5 – Jádru s velkým průměrem
- 6 – Mikrostruktura o menším průměru

Obr. 2. 14: Obecné LMA PCF vlákno



- 1 – Defekt v regionu mikrostruktur
2 – Jádro dopované Germaniem

Obr. 2. 15: LMA PCF vlákno se zápornou CD

V Tab. 2. 17 je možné vidět rozměry vyráběných LMA vláken. Optické parametry jako šířka pásma, utlum vlákna, a jiné, je pak možné vidět v Tab. 2. 18.

Tab. 2. 17: Fyzické vlastnosti LMA vláken [11], [12]

Typ vlákna	Průměr jádra [μm]	Průměr pláště [μm]	Průměr vlákna [μm]
LMA-5	$5 \pm 0,5$	125 ± 2	245 ± 10
LMA-8	$8,5 \pm 0,3$	125 ± 5	245 ± 10
LMA-10	10 ± 1	125 ± 2	240 ± 5
LMA-15	$15 \pm 0,5$	230 ± 5	350 ± 10
LMA-20	$20 \pm 0,4$	230 ± 5	350 ± 10
LMA-25	$25,2 \pm 0,4$	268 ± 5	410 ± 10

Tab. 2. 18: Optické vlastnosti LMA vláken [11], [12]

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Numerická apertura [-]	Útlum vlákna [dB/km]	Průměr plochy základního vidu [μm]
LMA-5	532	800 – 1700	0,1 ± 0,02	< 5	4,3 ± 0,5
	1060		0,2 ± 0,02		
LMA-8	450	500 – 1700	0,059 ± 0,01	-	7 ± 1
	532		-	< 30	
	635		0,083 ± 0,01	< 10	
	1064		-	< 5	
	1383			< 20	
	1550			< 2	
				LMA-10	
700	-	< 7			
780	0,09 ± 0,01				
980	0,1 ± 0,01				
1000	-	< 2	-		
1550					
LMA-15	532	600 – 1700	~ 0,04	< 30	12,5 ± 1,5
	780		~ 0,05	< 10	
LMA-20	780	780 – 1700	0,04 ± 0,01	< 7	15 ± 1,5
	1060		0,05 ± 0,01	< 2	
LMA-25	1064	900 – 1800	0,04 ± 0,01	< 3,5	19,8 ± 2
	1550		0,06 ± 0,01	< 1,5	

Vlastnosti LMA PCF:

- Jádru s průměrem 5 až 35 μm.
- Jádru tvoří čisté křemenné sklo.
- Vlnová délka není závislá na průměru plochy základního vidu.
- Nízké ztráty ve vláknu.
- Malé nelinearity.
- Nekonečně jednovidové operace bez velkého počtu vyvázání vidů z vlákna.
- Udrží vysoké průměrné hodnoty výkonů, stejně jako vysoké špičkové výkony.

Využití LMA PCF pro:

- Dodávku ultra krátkých vysoce výkonných optických impulzů.
- Širokopásmová interferometrie – Interferometry.
- Optické komunikace.
- Vidová filtrace.
- Zakončování laserů.
- Vedení více vlnových délek vláknem.

Konektory:

Vlákna se ukončují stejně jako u typů ESM a PM. Také se zakončí koncovkou a nechají se oštípat pod úhlem 0° nebo 5° [6]. Další možností je zakončení koncovkou a opatření konektorem. Jako u PM PCF lze použít konektory typu FC/PC viz Obr. 2. 5, nebo FC/APC viz Obr. 2. 10. Další možností je užít konektor SMA-905HP viz Obr. 2. 11, pro vysokovýkonné optické přenosy [17]. Ferule tohoto konektoru je tvořena z nerezové oceli a konektor tak dokáže přenášet výkony okolo 100 Wattů.

Dostupnost:

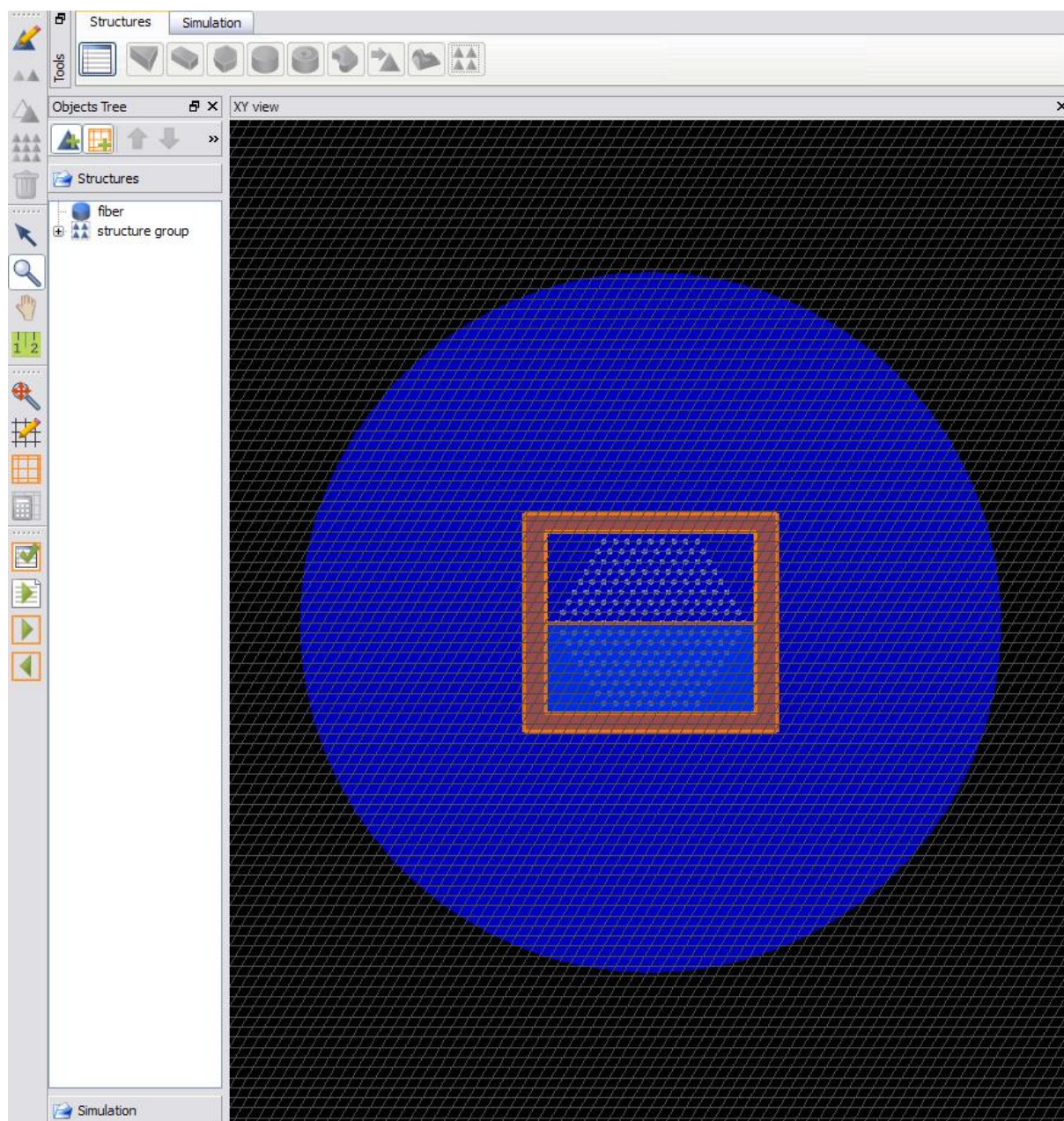
Vlákna je možné koupit jako klasicky zastřižené na určitou délku balení, tak jako tomu bylo u předchozích typů. Stejně tak osazené konektory dle výběru FC/PC, FC/APC nebo SMA-905HP, jako u předchozích typů. Dostupnost 2-3 dny, udávaná na stránkách výrobce.

Cena:

Cena za kus pro vlákno LMA-20 je 99,70 € za metr. Při nákupu velké délky cena klesá. Například Výrobce Thorlabs tento typ vlákna prodává za 53,40 € od 50 m výš [7].

3 SIMULACE PCF VLÁKEN

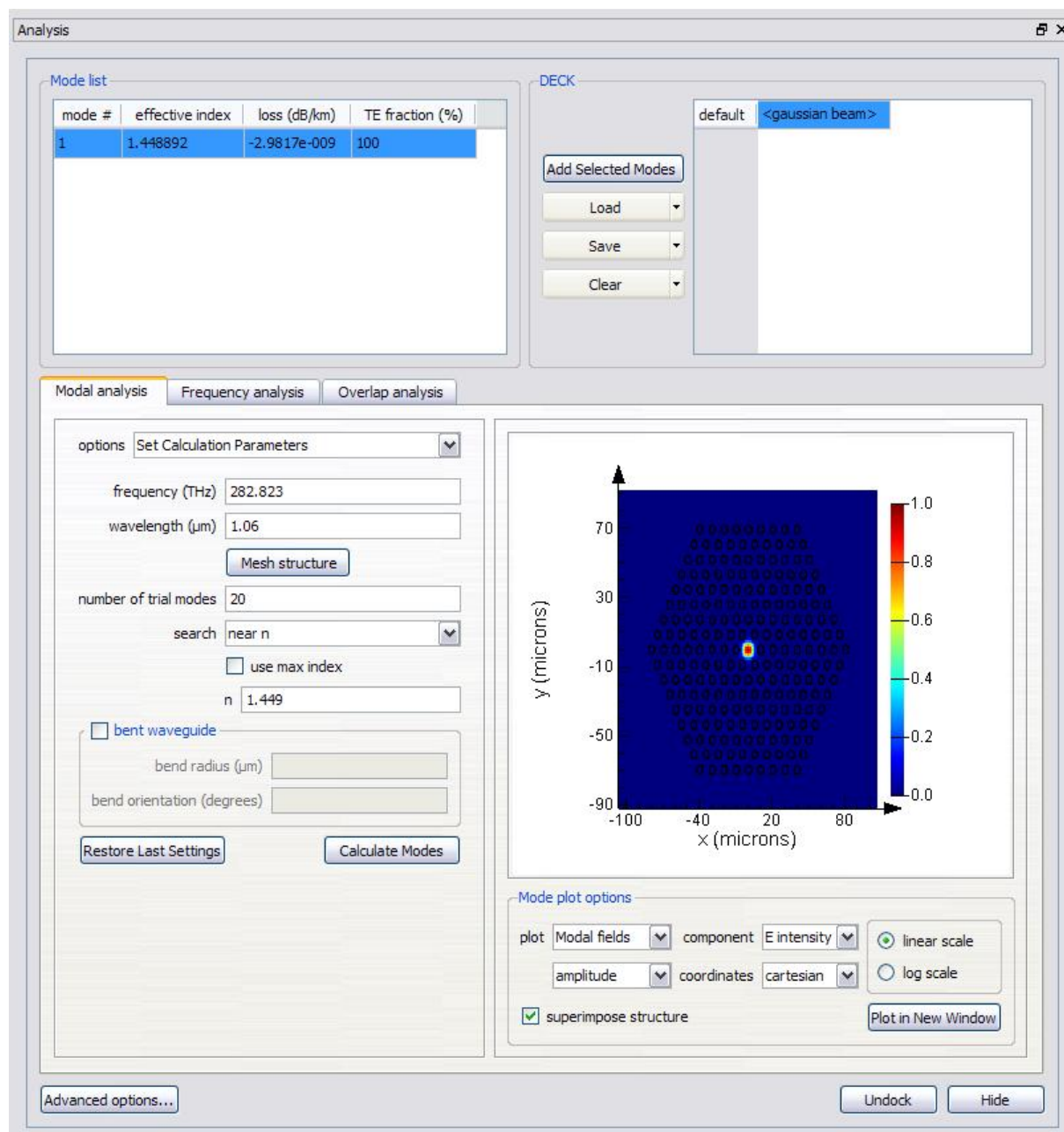
Praktická část se zabývá názornou ukázkou principiální funkčnosti jednorozměrné periodické struktury. Princip je zde vysvětlen na Braggově vlákně. Další částí je simulace a návrh jádra vláken využívající dvourozměrné periodické struktury fotonických krystalů. Pro toto zadání byl vybrán simulační program MODE Solutions. Kanadská firma Lumerical, nabízí tento komerční program určený k návrhům a simulacím zaměřeným na fotonická krystalická vlákna. Hlavním účelem je zde návrh jader vláken, jak jednorozměrných, tak i dvourozměrných fotonických krystalických vláken. Na Obr. 3. 1 je možné vidět návrh vlákna v programu Mode Solutions.



Obr. 3. 1: Návrh jádra v MODE Solutions

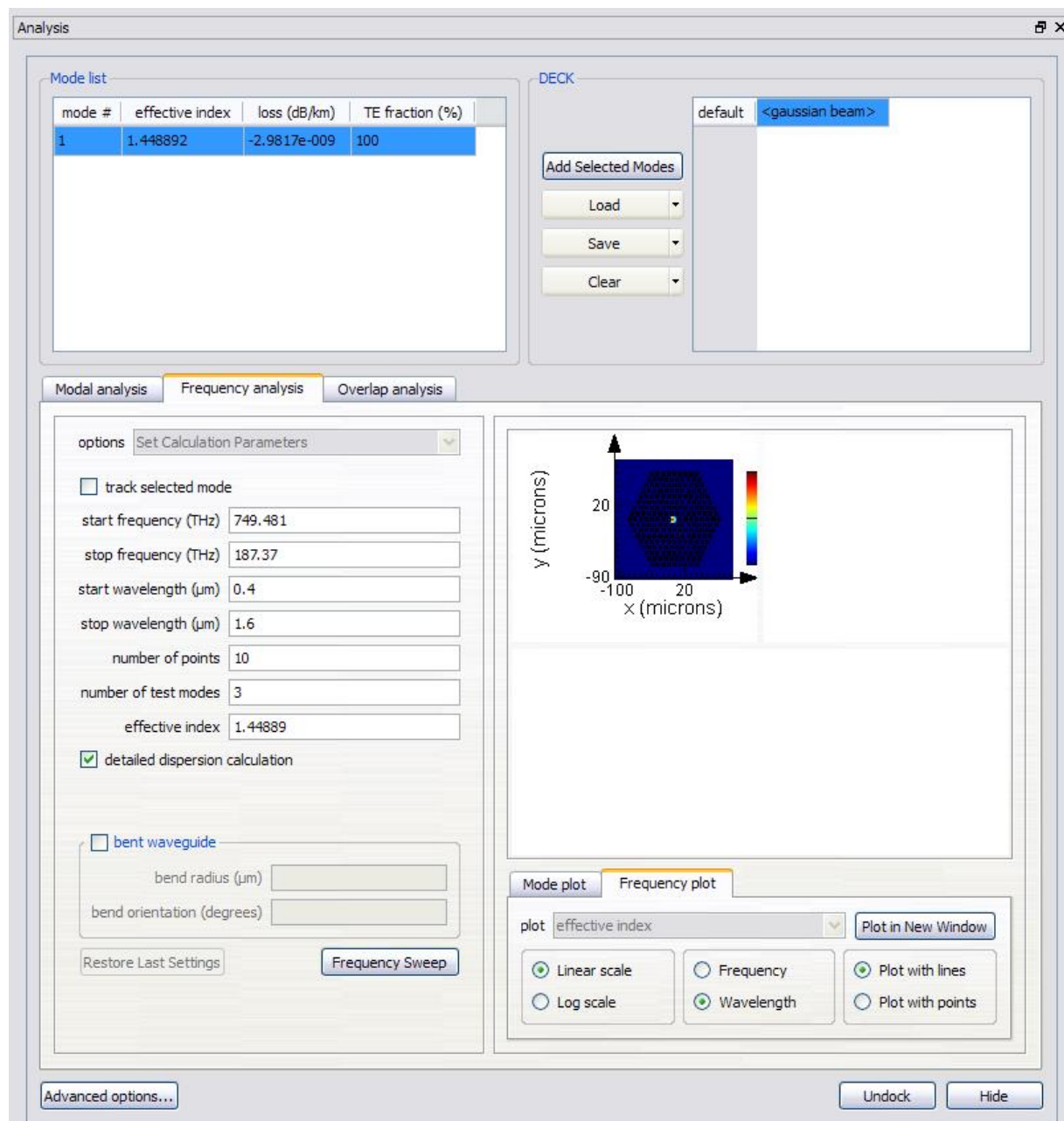
Program MODE Solutions se dělí na dvě základní části. První částí je návrh vlákna, fyzických parametrů, jako například průměry jader, mikrostruktur, rozteče mezi mikrostrukturami. Tato část se nazývá Structures – struktury. Druhou částí je samotná simulace navrženého vlákna, nebo pouze jádra. Tato část se nazývá Simulation – simulace a dělí se na tři vzájemně propojené části Modal analysis, Frequency analysis a Overlaps analysis.

Modal analysis, nebo také vidová analýza je první částí simulace, kde je možné zadat vlnovou délku nebo frekvenci, maximální počet vidů které mají být zobrazeny a index. Parametry slouží pro výpočet vidů procházející sestrojeným vláknem. V ideálním případě je nalezen jeden vid s energií E a H složek soustředěnými do jádra s 100% hodnotou a minimálním útlumem. Na Obr. 3. 2 lze vidět simulaci vidové analýzy.



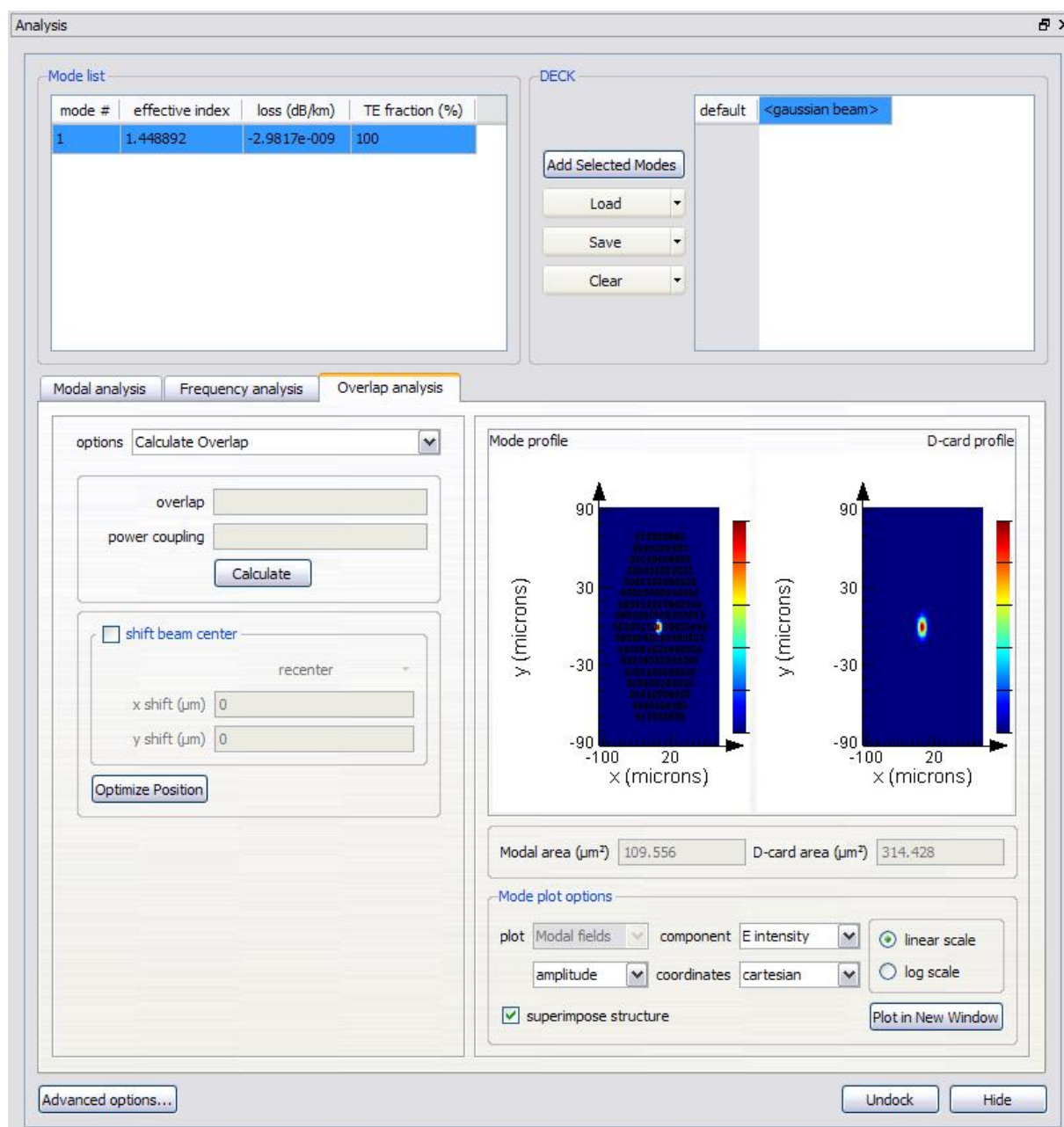
Obr. 3. 2: Vidová analýza jádra v MODE Solutions

Frequency analysis, česky frekvenční analýza navazuje na vidovou analýzu. Zde se pro vybraný vid z první části simulace počítají přenosové vlastnosti pro určené rozmezí vlnových délek. Nastavuje se zde počáteční a konečná vlnová délka nebo frekvence analýzy, počet bodů v tomto rozmezí a počet testovaných vidů. Poslední hodnota je efektivní index, viz Obr. 3. 3. Efektivní index byl při simulaci použit z předchozí části. Počet testovaných vidů byl zvolen tři, pro zmenšení pravděpodobnosti výskytu chyby při simulaci.



Obr. 3. 3: Frekvenční analýza jádra v MODE Solutions

Overlap analysis, analýza překrytí. Tato poslední část byla využita pouze pro získání hodnot vidového prostoru navržených a simulovaných vláken. Na Obr. 3. 4 je možné vidět poslední část simulace.



Obr. 3. 4: Analýza překrytí jádra v MODE Solutions

Před samotnou simulací, bych se rád zmínil o možné nepřesnosti výpočtu programu. Při vícenásobné simulaci jedné varianty v části vidové analýzy byla zjištěna pro stejný vid se stejným efektivním indexem jiná hodnota útlumu. To může vést k nepřesným a zkreslujícím výsledkům. Tyto výsledky simulací komerčně vyráběných vláken jsou ovlivněny neznalostí všech parametrů těchto vláken, aproximací a matematickým modelem použitým v programu. Z těchto důvodů nelze srovnávat komerčně vyrobené vlákno s jednou přesně danou variantou simulovaného vlákna. Proto je vhodné simulovat více variant pro jedno komerčně vyráběné vlákno, z kterých lze vybrat jednu vhodnou simulaci.

3.1 JEDNOROZMĚRNÁ PERIODICKÁ STRUKTÚRA

Jednorozměrná periodická struktura je základním prvkem k pochopení funkčnosti fotonických krystalů. Jejím hlavním v praxi užívaným zástupcem je Braggovo vlákno, na kterém bude názorně demonstrován princip funkce jednorozměrné periodické struktury, užívané v optice jako optický vlnovod. Jako jednorozměrné se považuje díky tomu, že periodická struktura tvoří kruhy střídajících se materiálů s malou a velkou dielektrickou konstantou ε .

Zabýváme se zde indexem lomu světla a dielektrickou konstantou, proto bude použito Snellova zákona

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2, \quad (3.1)$$

kde n_i je index lomu světla a θ_i je úhel paprsku svíraný s kolmicí na rozhraní dvou materiálů s dvěma odlišnými dielektriky $\varepsilon_1, \varepsilon_2$. Dielektrickou konstantu ε_i lze pak vyjádřit jako druhou mocninu indexu lomu světla n_i [1]. Upřesnění bude uvedeno v následující kapitole. Po úpravě

$$n_i = \sqrt{\varepsilon_i}. \quad (-) \quad (3.2)$$

Princip činnosti jednorozměrné periodické struktury bude demonstrován pomocí simulací v programu MODE Solutions. Zde byl navržen prstenec (vícevrstvý film), který dělí jádro od pláště v Braggově vlákne. Tento film je tvořen dvěma druhy střídajících se materiálů rozlišných barev viz Obr. 3. 5. Tyto materiály byly vybrány z databáze nabízené programem. Modré kruhy označují materiál s malou dielektrickou konstantou a tedy i malým indexem lomu. Index lomu světla je u tohoto materiálů $n_2 = 1,6$. Červené kruhy označují materiál s velkou dielektrickou konstantou a tedy i velkým indexem lomu. Index lomu světla je u tohoto materiálů $n_1 = 4,6$. Poměr šířek mezi druhy materiálů byly použity dle úvodního návodu firmy, materiál $\varepsilon_1 = 2 \cdot$ materiál ε_2 . Simulace byla provedena pro tři různě široké vrstvy, jak je uvedeno v Tab. 3. 1.

Tab. 3. 1: Rozměry navržených prstenců

Prstenec	Vnitřní průměr [μm]	Vnější průměr [μm]	Šířka jednotlivých pruhů [μm]	
			Materiál ε_1	Materiál ε_2
A	2,8	6,0	0,133	0,267
B	2,8	13,2	0,433	0,867
C	2,8	26,8	1	2

Při definování funkčnosti musíme vycházet ze základního vztahu pro bezrozměrnou frekvenci

$$\frac{\varpi \cdot a}{2 \cdot \pi \cdot c}, \quad (-) \quad (3.3)$$

kde a je perioda, c je rychlost světla ve vakuu. Tento vzorec lze upravit na

$$\frac{a}{\lambda}, \quad (-) \quad (3.4)$$

kde λ je vlnová délka ve vakuu

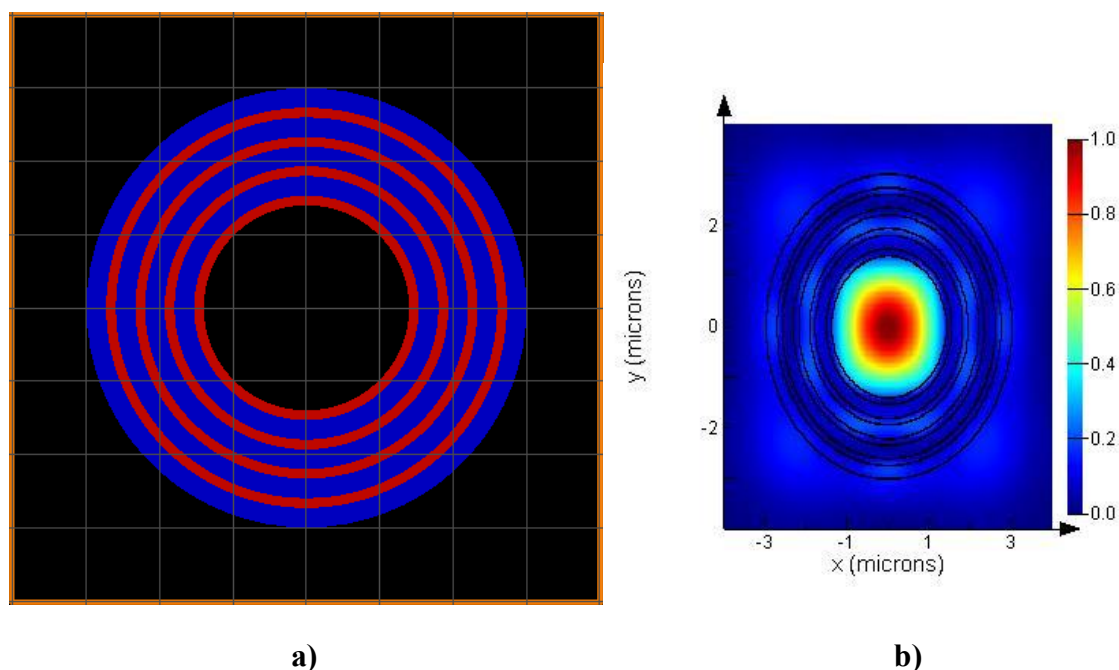
$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\omega} \quad (-) \quad (3.5)$$

Ze vzorce (3.3), (3.4), (3.5) je patrné, že frekvence je závislá na periodicitě, tedy i na periodě a [1]. Délka periody je závislá na šířce jednotlivých vrstev. Ze vzorce dále vyplývá, že ze zvyšující se šířkou by měla frekvence stoupat. To se také díky simulaci potvrdilo, jak je možné vidět v Tab. 3. 2. Dále je patrné, že s rostoucí frekvencí klesá i efektivní index lomu světla.

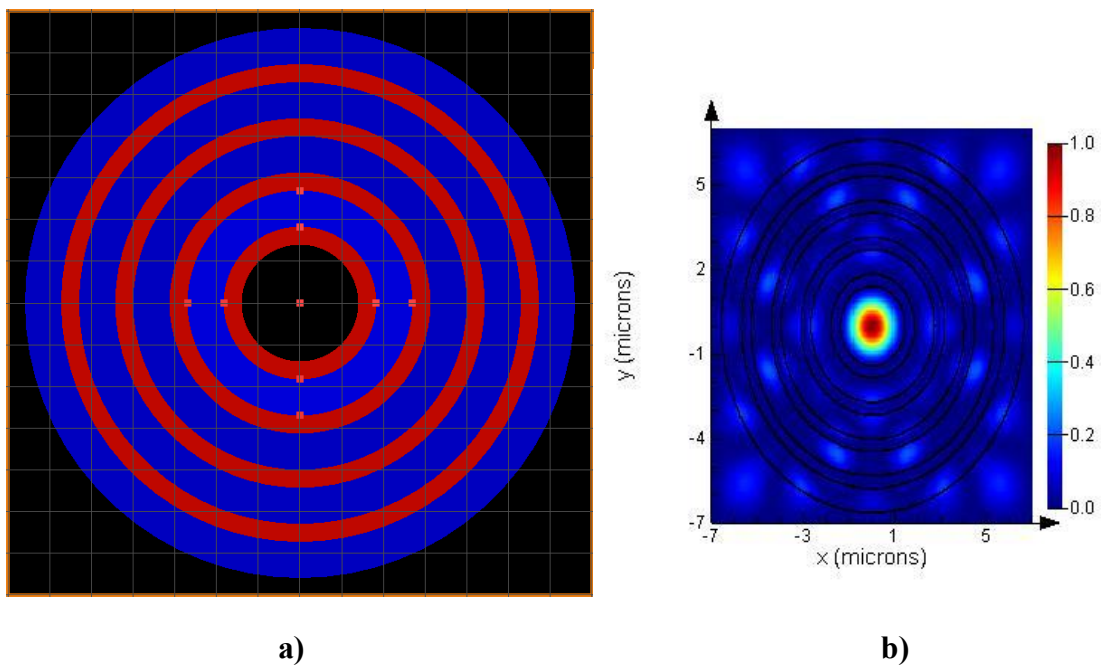
Tab. 3. 2: Výsledné hodnoty simulací

Prstenec	Efektivní index [-]	Vlnová délka [nm]	Frekvence [THz]	Útlum vlákna [dB/km]	Podíl TE v jádře [%]
A	0,37225860	5000	59,9585	0	50
B	0,23237780	4000	74,9481	0	50
C	0,06795301	3800	78,8928	0	50

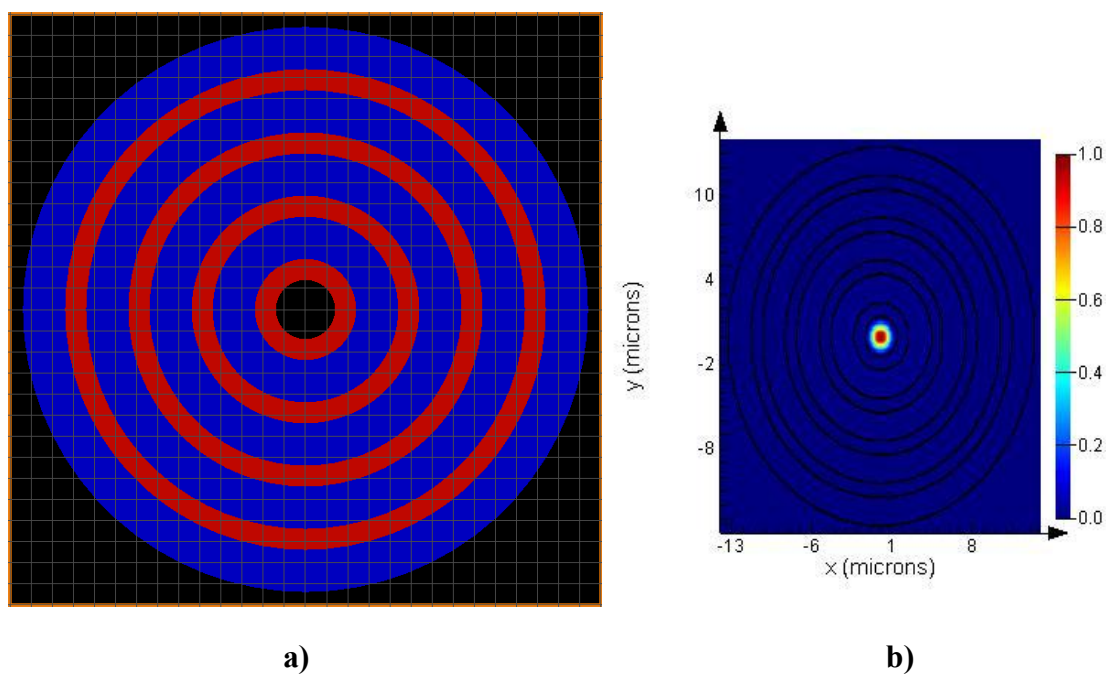
Na Obr. 3. 5, Obr. 3. 6, Obr. 3. 7 v části a) je možné vidět navrhnuté prstence vícevrstvého filmu, fungujícího jako polopropustné zrcadlo pro vlnové délky v zakázaném pásmu. Zrcadlo je polopropustné protože mají rozdílné indexy lomu světla n a dielektrické konstanty ε . Na druhém obrázku je vidět, že všechna energie intenzity elektrického pole E není koncentrována do jádra. To také potvrzují hodnoty v Tab. 3. 2.



Obr. 3. 5: Prstenec A: a) návrh struktury, b) rozložení intenzity elektrického pole E vidu



Obr. 3. 6: Prstence B: a) návrh struktury, b) rozložení intenzity elektrického pole E vidu



Obr. 3. 7: Prstence C: a) návrh struktury, b) rozložení intenzity elektrického pole E vidu

3.2 NÁVRH JÁDRA PCF VLÁKNA

Ještě než bude uvedena vlastní simulace, je potřeba vysvětlit některé parametry objevující se v simulačním programu. Protože program počítá pomocí makroskopických Maxwellových rovnic ve výpočetním prostředí MATLAB. Je možné si zobrazit složky E a H , které budou nyní vysvětleny.

Jelikož všechno z elektromagnetismu i šíření světla ve fotonických krystalech se řídí čtyřmi Maxwellovými rovnicemi

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho & \nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} &= \mathbf{J} \end{aligned} \quad (3.6)$$

kde E je intenzita elektrického pole, H je intenzita magnetické pole, D je elektrická indukce a B je magnetická indukce. Z diferenciálních tvarů první a třetí Maxwellovy rovnice je ρ hustota volného náboje a J hustota elektrického proudu [1].

Omezíme-li se pouze na šíření v rámci smíšeného dielektrického media, sloučenina regionů homogenního dielektrického materiálu je funkcí polohového vektoru $\vec{r}$, ve kterém je struktura neměnná v čase a nejsou zde volné náboje ani žádné proudy. Tato sloučenina nemusí být periodická. Šíří-li se v tomto typu media světlo a nejsou v něm žádné světelné zdroje, pak můžeme psát $\rho = 0$ a $J = 0$.

Spojíme-li D s E a B s H pomocí vhodného vztahu, kde D_i je částí D a E_i je částí E , obecně pak pomocí mocninné řady můžeme psát

$$\frac{D_i}{\epsilon_0} = \sum_j \epsilon_{ij} \cdot E_j + \sum_{j,k} x_{ijk} \cdot E_j \cdot E_k + O(E^3), \quad (3.7)$$

kde ϵ_0 je permitivita vakua [1]. Pro většinu dielektrických materiálů lze použít následující podmínky pro zjednodušení. Za prvé předpokládáme, že intenzity pole jsou velmi malé, vycházíme z linearit a můžeme zanedbat x_{ijk} . Za druhé předpokládáme, že materiál je makroskopický a izotropní, tak, aby $E(r, \omega)$ a $D(r, \omega)$ byli spojené pomocí ϵ_0 a roznásobené relativní permitivitou $\epsilon(r, \omega)$. Za třetí je ignorována frekvenční závislost na ϵ a přiřazena jí hodnota odpovídající frekvenčnímu rozsahu fyzického systému. Za čtvrté se zaměříme na materiály s reálným a kladným $\epsilon(r)$. Při splnění těchto podmínek se může psát $D(r) = \epsilon_0 \cdot \epsilon(r) \cdot E(r)$, $B(r) = \mu_0 \cdot \mu(r) \cdot H(r)$, kde je pro většinu dielektrických materiálů se relativní magnetická permeabilita $\mu(r) = 1$ a může se tedy zjednodušeně psát $B = \mu_0 \cdot H$. Pak se může psát, že index lomu světla

$$n = \sqrt{\epsilon}. \quad (-) \quad (3.8)$$

To platí i pro vzorec (3.2) v předchozí kapitole. Obecně pak platí, že

$$n = \sqrt{\epsilon \cdot \mu}. \quad (-) \quad (3.9)$$

Vidy každého dvourozměrného fotonického krystalu mohou být rozděleny na dvě polarizace, (E_x, E_y, H_z) nebo (H_x, H_y, E_z) . Transverse electric (TE) – příčný elektrický vid, elektrické pole je omezeno pouze na rovinu xy . Transverse magnetic (TM) – příčný magnetický vid, magnetické pole je omezeno pouze na rovinu xy . Vychází se z toho, že dvourozměrné

fotonické krystaly jsou periodické v určité rovině (xy), ale jsou neměnné s osou (z) kolmou na tuto rovinu [1].

Protože mnoho fyzických rozměrů a parametrů vlákna nebylo nikde udáno, bylo nutné simulovat více variant jednoho typu, pro docílení alespoň jednoho optimálního návrhu. Vláknem typu LMA bylo vybráno, protože se prolíná mezi další typy, jako například ESM, PM a další. Byly simulovány vyráběné a komerčně dostupné typy LMA-5, LMA-10, LMA-15 a LMA-20.

Pro samotnou simulaci jádra PCF vlákna bylo použito materiálů z databáze nabízené programem. Pro vlákno byl užít křemík a pro výrobu mikrostruktur materiál simulující vzduch. Tyto materiály byly doporučeny v návodu. Rozměry simulovaných vláken byly užity pro simulaci stejné, jako z katalogových listů jednotlivých typů. Tyto parametry je možné vidět v Tab. 3. 3. V příloze A je kompletní tabulka všech simulovaných vláken. Protože rozteč nebyla nikde u vláken uvedena, byl použit poloměr jádra, jako výchozí hodnota.

Tab. 3. 3: Fyzické vlastnosti simulovaných LMA vláken

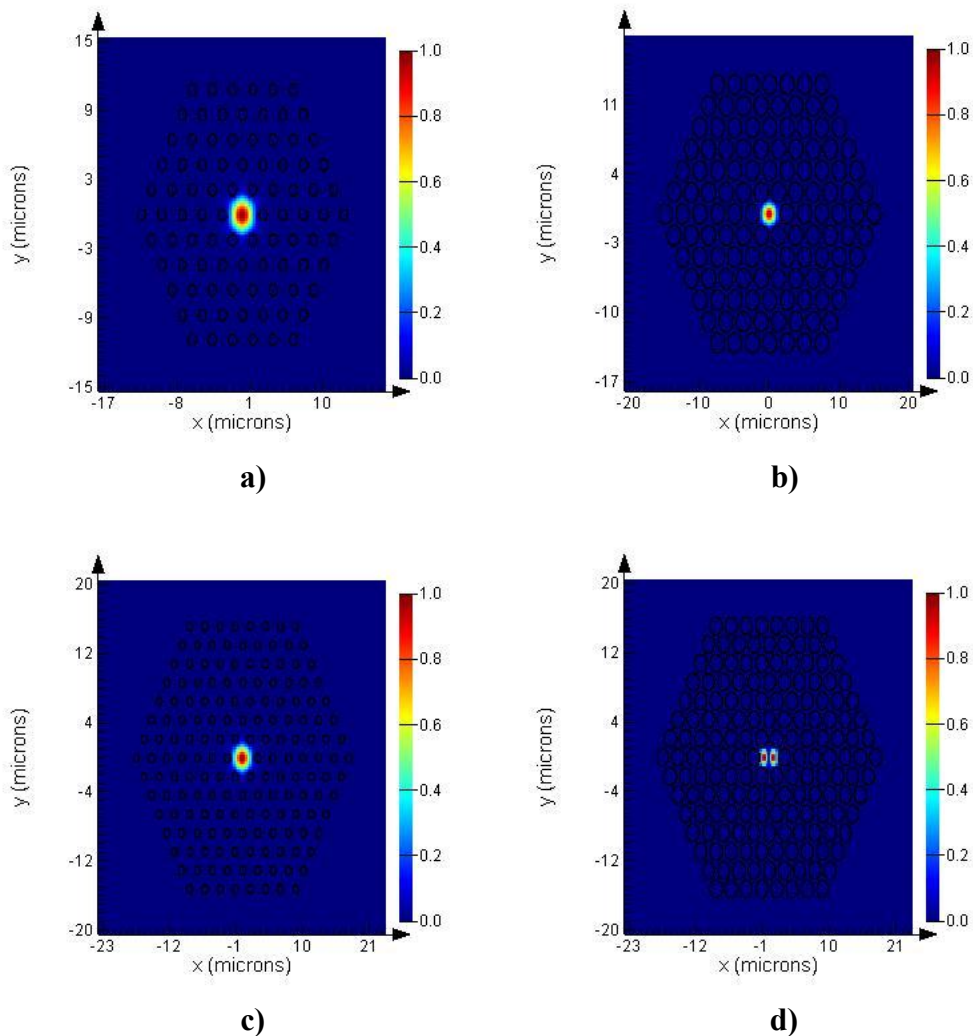
Typ vlákna	Průměr jádra [μm]	Rozteč [μm]	Průměr pláště [μm]	Průměr vlákna [μm]
LMA-5	5	2,5	125	245
LMA-10	10	5	125	240
LMA-15	15	7,5	230	350
LMA-20	20	10	230	350

Jak bylo výše uvedeno, použilo se více variant s různým počtem prstenců. Pro každou variantu prstence byly použity dvě rozdílné hodnoty průměrů mikrostruktur. Jak bude dále uvedeno u simulací jednotlivých typů vláken, ze všech naměřených hodnot bylo vybráno 10 měření s nejlépe vycházejícími hodnotami pro daný typ vlákna.

3.2.1 LMA-5

LMA-5 je první simulované vlákno s nejmenším jádrem. Jak je možné vidět v Tab. 3. 4, průměr mikrostruktur byl volen s ohledem na velikost jádra a rozteče. Také je zde vidět efektivní index lomu světla a vlnová délka, která pro většinu simulací převládá na 1000 nm. Útlum naměřený ve vidové analýze je minimální oproti útlumu stejného návrhu simulovaného frekvenční analýzou viz Tab. 3. 5. To je příčinou rozdílných simulací s vlastními výpočty.

Na Obr. 3. 8 je znázorněno rozložení intenzity energie E složky nejlépe určeného vidu pro danou variantu. Názorně je zde vidět velikost jádra, ve kterém je vyjádřena koncentrace energie TE v procentech viz Tab. 3. 4. V části d) obrázku je možné vidět rozložení intenzity energie E , která se projeví na koncentraci energie TE viz Tab. 3. 4.



Obr. 3. 8: Rozložení intenzity energie E vidu s průměrem jádra 5 μm : a), c) s mikrostrukturami 1 μm , b), d) s mikrostrukturami 2 μm

Tab. 3. 4: Vidová analýza LMA-5

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Vlnová délka [nm]	Útlum vlákna [dB/km]	Podíl TE v jádře [%]
5	1	1,442121	1000	0,8679	100
	2	1,092806	1100	$1,1078 \cdot 10^{-9}$	99
6	1	1,420100	1000	$7,5715 \cdot 10^{-3}$	100
	2	1,433851	1000	$4,3789 \cdot 10^{-8}$	100
		1,424908	1200	$1,2669 \cdot 10^{-7}$	100
7	1	1,442096	1000	$9,4030 \cdot 10^{-5}$	100
	2	1,407890	1000	$8,3123 \cdot 10^{-8}$	99
		1,433490	1000	$1,1025 \cdot 10^{-7}$	100
8	1	1,442008	1000	$2,7607 \cdot 10^{-6}$	100
	2	1,434322	1000	$1,3639 \cdot 10^{-8}$	100

Tab. 3. 5: Frekvenční analýza LMA-5

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Útlum vlákna na šířce pásma		Disperze na šířce pásma	
			[nm]	[dB/km]	[nm]	[ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹]
5	1	1,442121	400 – 1600	< 9	970 – 1600	20
	2	1,092806	400 – 1600	< 8	800 – 1200	0
6	1	1,420100	400 – 1600	< 9	960 – 1600	25
	2	1,433851	400 – 1600	< 9	1000 – 1400	70
		1,424908	400 – 1600	< 9	400 – 1200	0
7	1	1,442096	400 – 1600	< 8,5	1200 – 1600	25
	2	1,407890	400 – 1600	< 8,5	520 – 1600	0
		1,433490	400 – 1600	< 9	400 – 1600	0
8	1	1,442008	400 – 1600	< 8	1200 – 1600	25
	2	1,434322	400 – 1600	< 8	1000 – 1600	30

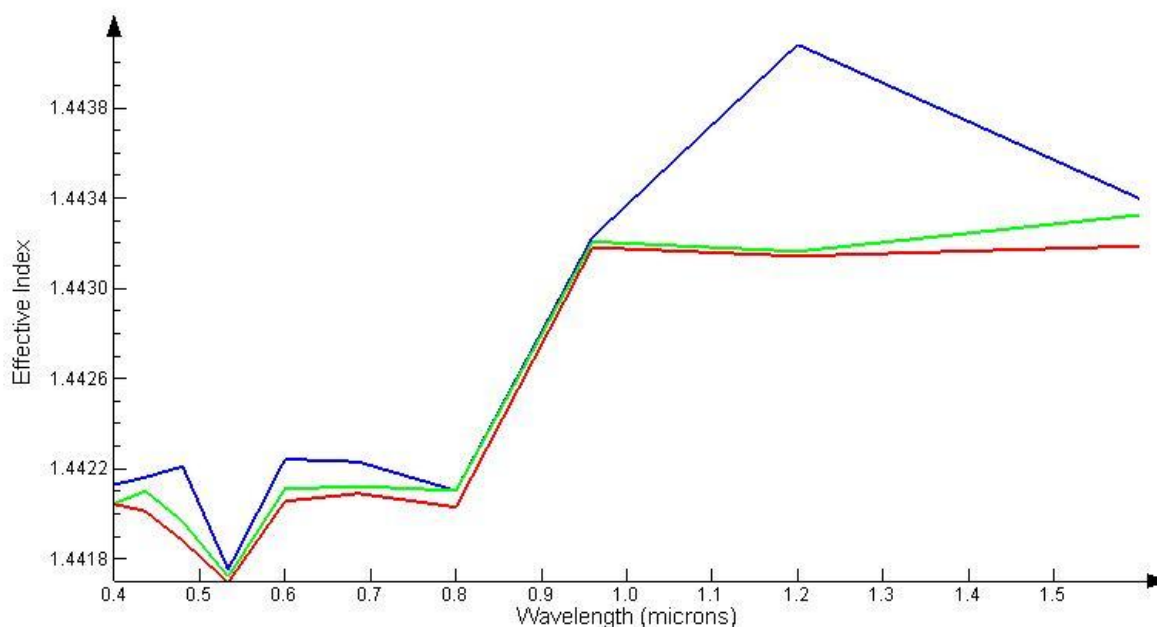
Tab. 3. 6: Analýza překrytí LMA-5

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Plocha základního vidu [μm ²]
5	1	1,442121	10,1684
	2	1,092806	5,99918
6	1	1,420100	9,96394
	2	1,433851	4,70319
		1,424908	4,90894
7	1	1,442096	10,0343
	2	1,407890	4,59355
		1,433490	4,59831
8	1	1,442008	10,0171
	2	1,434322	4,82272

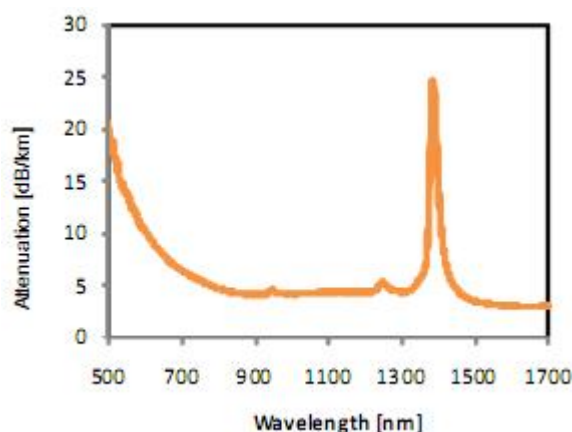
Tab. 3. 7: Porovnání vláken LMA-5

Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Numerická apertura [-]	Útlum vlákna [dB/km]	Průměr plochy základního vidu [μm]
LMA-5 _s	1000	400 – 1600	-	< 8,5	3,5 ± 0,5
LMA-5 _k	532	800 – 1700	0,1 ± 0,02	< 5	4,3 ± 0,5
	1060		0,2 ± 0,02		
	1550		0,06 ± 0,01	< 1,5	

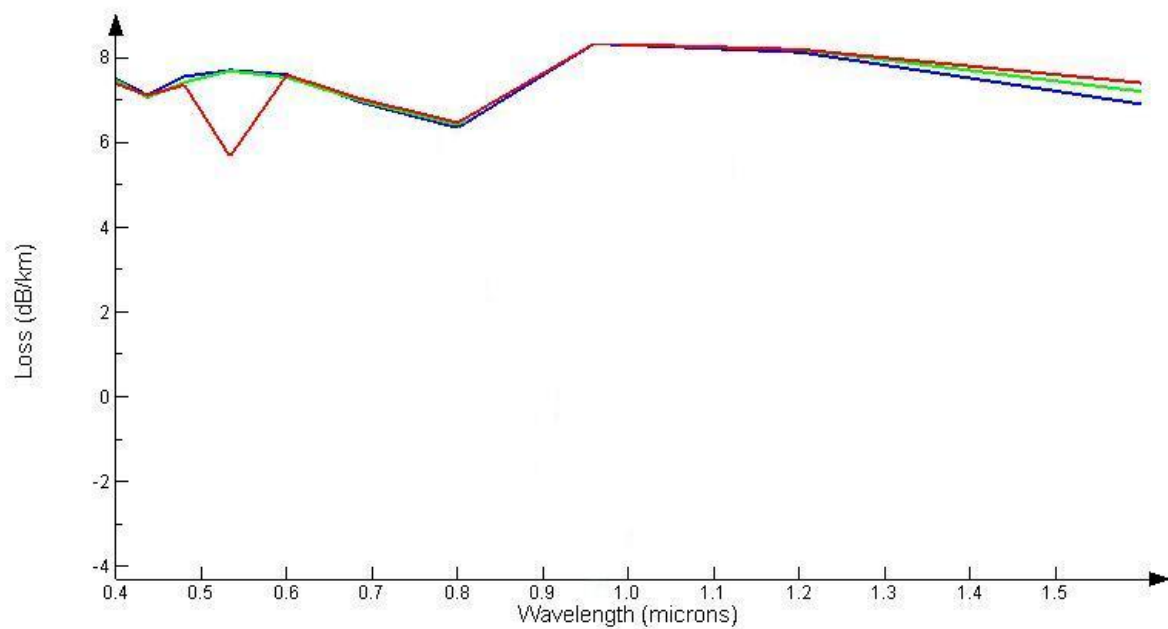
Porovnáním vybraného simulovaného jádra vlákna LMA-5_s s komerčně dostupným vláknem LMA-5_k je možné zjistit, že navrhované rozměry jádra nejsou ideální s pohledu útlumu. Útlum je pro LMA-5_s vyšší, ale je udán pro větší šířku pásma než u komerčně dostupného vlákna, které na nižších vlnových délkách dosahuje velkých hodnot. Závislosti útlumu na vlnové délce obou vláken je vidět na Obr. 3. 10 a Obr. 3. 11. Disperzi zde nebylo možno porovnat, ale simulované jádro má jak zápornou disperzi na nižších vlnových délkách, tak kladnou disperzi na vyšších vlnových délkách jak je zobrazeno na Obr. 3. 12 a v Tab. 3. 5. V Tab. 3. 4, Tab. 3. 6 jsou uvedeny další parametry simulovaných vláken, jako například efektivní index a plocha základního vidu. Na Obr. 3. 9 je znázorněn efektivní index simulovaného vlákna. Průměr plochy základního vidu byl odvozen z hodnoty plochy základního vidu simulovaného vlákna.



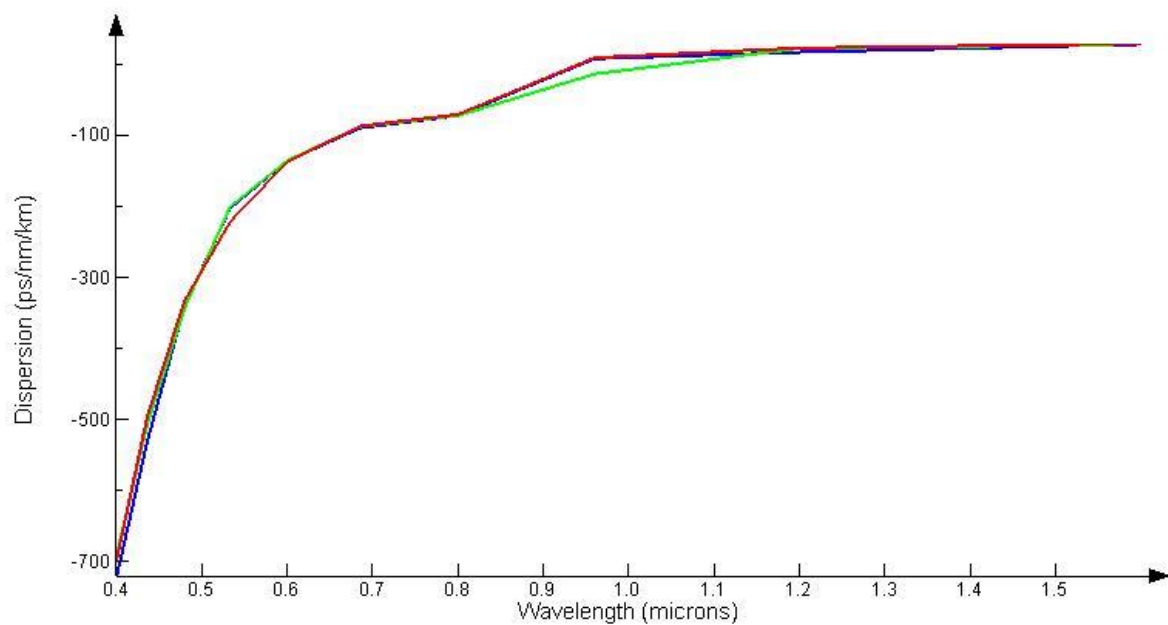
Obr. 3. 9: Efektivní index simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 10: Útlum komerčně dostupného vlákna LMA-5 [11]



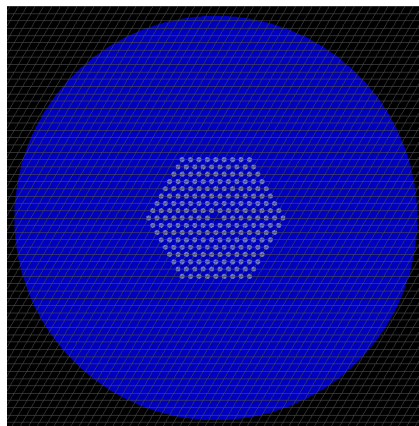
Obr. 3. 11: Útlum simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 12: Disperze simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce

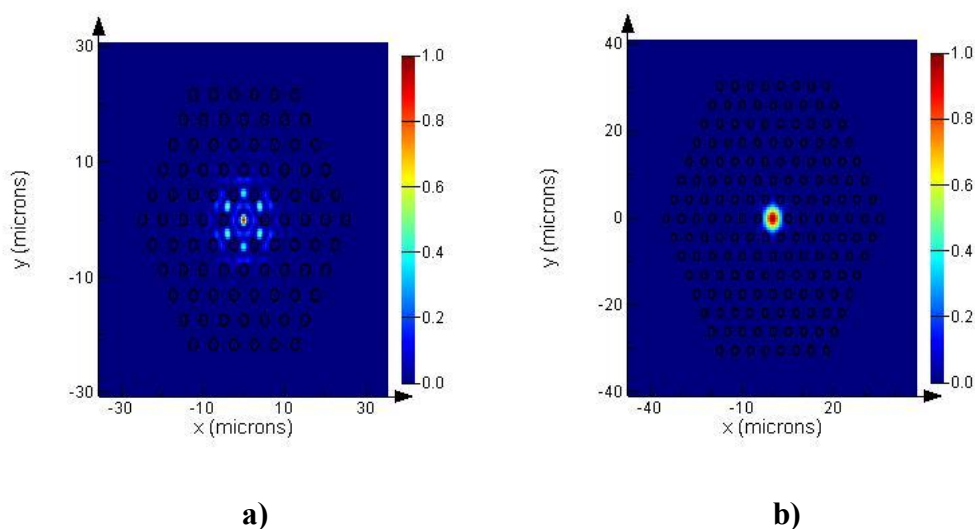
3.2.2 LMA-10

Dalším vláknem je LMA-10. Na Obr. 3. 13 je navrhované simulované vlákno s 8 prstenci o průměru mikrostruktur 3 μm .



Obr. 3. 13: Navrhnuté vlákno LMA-10

Na Obr. 3. 14 a) je zobrazena energie složky E, která není plně soustředěná do jádra, ale vyzařuje mezi mikrostruktury. Tento obrázek ukazuje, že daná varianta není ideální, jak tomu naznačuje hodnota útlumu uvedená na prvním řádku Tab. 3. 9. Část b) obrázku, pak ukazuje vybraný návrh k porovnání s komerčně dostupným vláknem. V tabulkách má hodnoty označené červenou barvou.



Obr. 3. 14: Rozložení intenzity energie E vidu s průměrem jádra 10 μm : a) s 5 prstenci a mikrostrukturami 2 μm , b) se 7 prstenci a mikrostrukturami 2 μm

V Tab. 3. 4 je uveden průměr mikrostruktur 2 a 3 μm . Jsou zde zastoupeny nejvíce dvě vlnové délky a to sice, 1450 nm pro průměr mikrostruktur 3 μm a 1550 nm pro průměr mikrostruktur 2 μm . Na rozdíl od LMA-5 kde byl efektivní index velmi rozdílný, se u většiny simulovaných variant vlákna LMA-10 pohybuje okolo hodnoty 1,438.

Také u ostatních typů vláken je útlum naměřený ve vidové analýze minimální, oproti útlumu stejného návrhu simulovaného frekvenční analýzou viz Tab. 3. 5. To je příčinou rozdílných simulací s vlastními výpočty.

Tab. 3. 8: Vidová analýza LMA-10

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Vlnová délka [nm]	Útlum vlákna [dB/km]	Podíl TE v jádře [%]
5	2	1,450103	610	79764	100
	3	1,439742	1400	$5,8229 \cdot 10^{-9}$	100
		1,439946	1100	$8,2476 \cdot 10^{-5}$	100
6	2	1,438703	1550	$2,4011 \cdot 10^{-4}$	100
	3	1,438760	1450	$5,2053 \cdot 10^{-8}$	100
7	2	1,438763	1550	$1,5340 \cdot 10^{-6}$	100
		1,440570	1450	$6,4918 \cdot 10^{-7}$	100
	3	1,438580	1450	$1,4894 \cdot 10^{-8}$	100
8	2	1,438674	1550	$3,8619 \cdot 10^{-8}$	100
	3	1,438509	1450	$3,9083 \cdot 10^{-9}$	100

Tab. 3. 9: Frekvenční analýza LMA-10

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Útlum vlákna na šířce pásma		Disperze na šířce pásma	
			[nm]	[dB/km]	[nm]	[ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹]
5	2	1,450103	400 – 900	< 7,5	480 – 1600	0
	3	1,439742	400 – 1100	< 8,5	480 – 1600	0
		1,439946	400 – 1600	< 8	480 – 1600	0
6	2	1,438703	400 – 1600	< 8	600 – 1600	0
	3	1,438760	400 – 1600	< 8	480 – 1600	0
7	2	1,438763	400 – 1500	< 7,5	440 – 1600	0
		1,440570	400 – 1500	< 7,5	800 – 1600	0
	3	1,438580	400 – 1600	< 8	600 – 1600	0
8	2	1,438674	400 – 900	< 7	440 – 1600	0
	3	1,438509	400 – 1600	< 8	690 – 1600	0

Tab. 3. 10: Analýza překrytí LMA-10

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Plocha základního vidu [μm ²]
5	2	1,450103	94,0352
	3	1,439742	25,4760
		1,439946	25,347
6	2	1,438703	37,4638
		1,438760	25,5452
7	2	1,438763	37,7556
		1,440570	37,2421
	3	1,438580	24,8390
8	2	1,438674	37,4652
	3	1,438509	24,6670

Tab. 3. 11: Porovnání vláken LMA-10

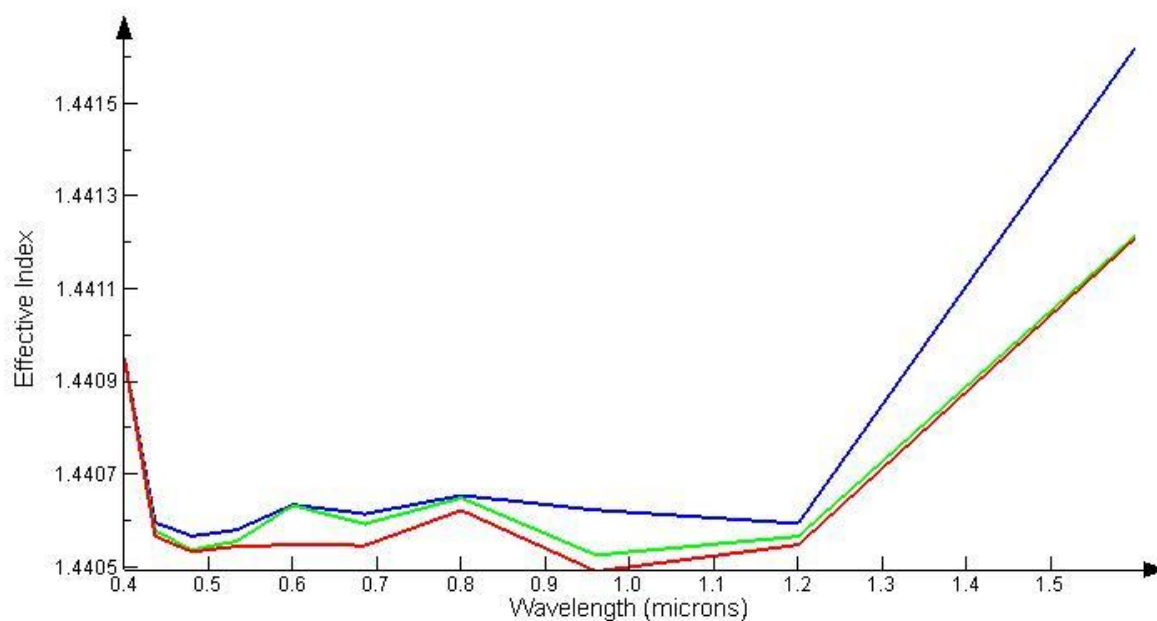
Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Numerická apertura [-]	Útlum vlákna [dB/km]	Průměr plochy základního vidu [μm]
LMA-10 _s	1450	400 – 1500	-	< 7,5	6,9 ± 1
LMA-10 _k	635	400 – 2000	0,08 ± 0,01	-	7,5 ± 1
	700		-	< 7	
	780		0,09 ± 0,01		
	980		0,1 ± 0,01		
	1000		-	< 2	-
	1550				

Tab. 3. 12: Porovnání disperzí vláken LMA-10

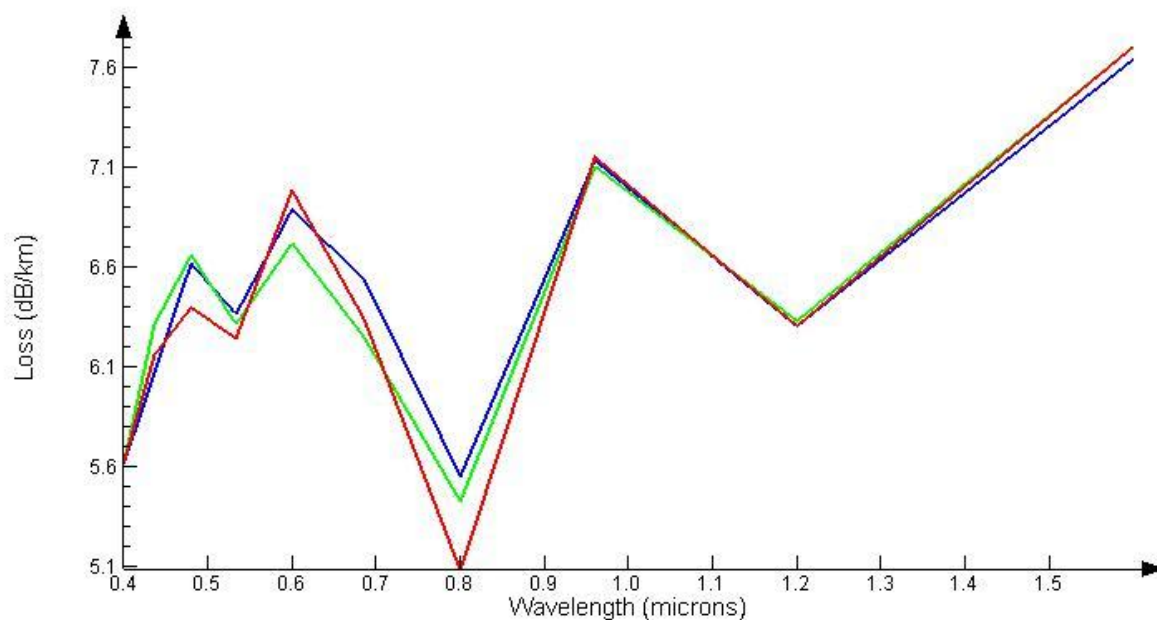
Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Disperze [ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹]
LMA-10 _s	-	800 – 1600	0
LMA-10 _k	1200	-	0

Z Tab. 3. 11 porovnáním vybraného simulovaného jádra vlákna LMA-10_s s komerčně dostupným vláknem LMA-10_k je možné zjistit, že útlum simulovaného vlákna je vyšší a zároveň šířka pásma pro kterou platí je užší. Na vlnových délkách vyšších jak 1500 nm útlum stoupá nad udávanou hodnotu, viz Obr. 3. 16. Disperze je u obou vláken nulová na 1200 nm. U simulovaného vlákna je disperze nulová na určité šířce pásma viz Tab. 3. 12. Na nižších

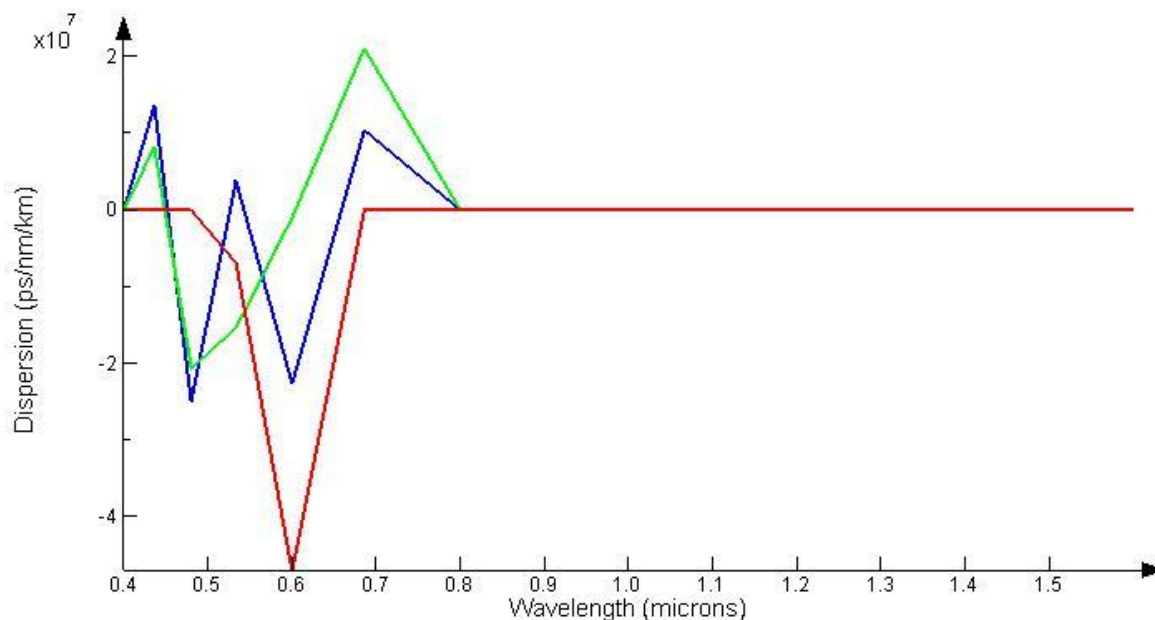
vlnových délkách je dosaženo velkých rozdílných hodnot, jak je vidět na Obr. 3. 17. U komerčně dostupného vlákna jsou hodnoty disperze v závislosti na vlnové délce vidět na Obr. 3. 18 v části b). První část je hodnota útlumu v závislosti na vlnové délce vlákna LMA-10_k. Efektivní index v závislosti na vlnové délce, Obr. 3. 15.



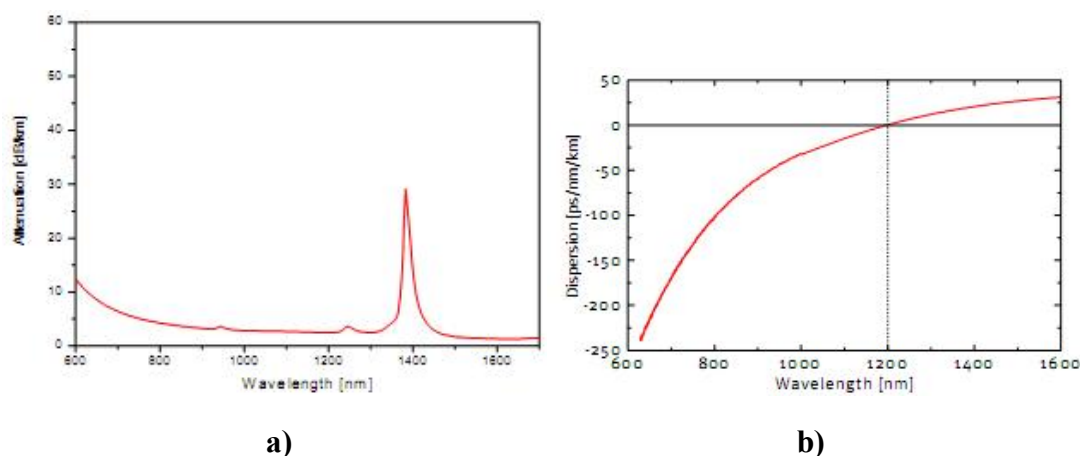
Obr. 3. 15: Efektivní index simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 16: Útlum simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 17: Disperze simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 18: Přenosové parametry vlákna LMA-10_k v závislosti na vlnové délce a) útlum, b) disperze [11]

3.2.3 LMA-15

Další vlákno v řadě je LMA-15. Je první z vláken s větším průměrem pláště a tím i celkovým průměrem vlákna. Je to z důvodů zvětšujících se roztečí, průměrů mikrostruktur a průměru regionu mikrostruktur.

Jak je možné vidět v Tab. 3. 13, průměr mikrostruktur byl volen 3 a 4 μm . Efektivní index vlákna LMA-15 je rozdělen do dvou oblastí, část simulací má 1,440. Zbytek má efektivní index 1,449. U těchto simulací převládá vlnová délka 1000 nm, ale vybrán byl návrh

s vlnovou délkou 1450 nm. Také jsou uvedeny hodnoty návrhu jádra s nulovým podílem TE v jádře.

Zde i u ostatních typů vláken je útlum naměřený ve vidové analýze minimální, oproti útlumu stejného návrhu simulovaného frekvenční analýzou viz Tab. 3. 14. To je příčinou rozdílných simulací s vlastními výpočty.

Frekvenční analýza ukázala šířku pásma 400 – 1600 nm jako dominantní pro tento typ vlákna, na které útlum nepřevyšuje 8 dB/km. Co se týče využití na významných vlnových délkách, je disperze pro všechny simulace nulová.

Tab. 3. 13: Vidová analýza LMA-15

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Vlnová délka [nm]	Útlum vlákna [dB/km]	Podíl TE v jádře [%]
5	3	1,439461	1060	59441	100
	4	1,440882	1550	$2,0525 \cdot 10^{-9}$	100
		1,449083	1000	$7,0151 \cdot 10^{-10}$	100
6	3	1,449375	1000	$5,9608 \cdot 10^{-8}$	100
	4	1,449099	1000	$2,7839 \cdot 10^{-8}$	100
7	3	1,400964	800	$1,0801 \cdot 10^{-9}$	0
		1,449375	1000	$2,0128 \cdot 10^{-9}$	100
	4	1,438323	1450	$4,5074 \cdot 10^{-5}$	100
8	3	1,449333	1000	$3,3949 \cdot 10^{-11}$	100
	4	1,439611	1060	392,07	1

Tab. 3. 14: Frekvenční analýza LMA-15

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Útlum vlákna na šířce pásma		Disperze na šířce pásma	
			[nm]	[dB/km]	[nm]	[ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹]
5	3	1,439461	400 – 1600	< 8	600 – 1600	0
	4	1,440882	400 – 1360	< 7	530 – 690	0
		1,449083	400 – 1600	< 8	680 – 1600	0
6	3	1,449375	400 – 1600	< 8	690 – 960	0
	4	1,449099	400 – 1600	< 8	600 – 1600	0
7	3	1,400964	400 – 1600	< 7	695 – 1600	0
		1,449375	400 – 1300	< 7	690 – 1600	0
	4	1,438323	400 – 1200	< 7	800 – 1600	0
8	3	1,449333	400 – 900	< 7	960 – 1600	0
	4	1,439611	400 – 1400	< 7	400 – 540	0

Tab. 3. 15: Analýza překrytí LMA-15

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Plocha základního vidu [μm ²]
5	3	1,439461	214,252
	4	1,440882	60,6209
		1,449083	57,9461
6	3	1,449375	75,8367
	4	1,449099	58,7346
7	3	1,400964	31,2373
		1,449375	75,8367
	4	1,438323	64,1641
8	3	1,449333	73,8031
	4	1,439611	129,451

Tab. 3. 16: Porovnání vláken LMA-15

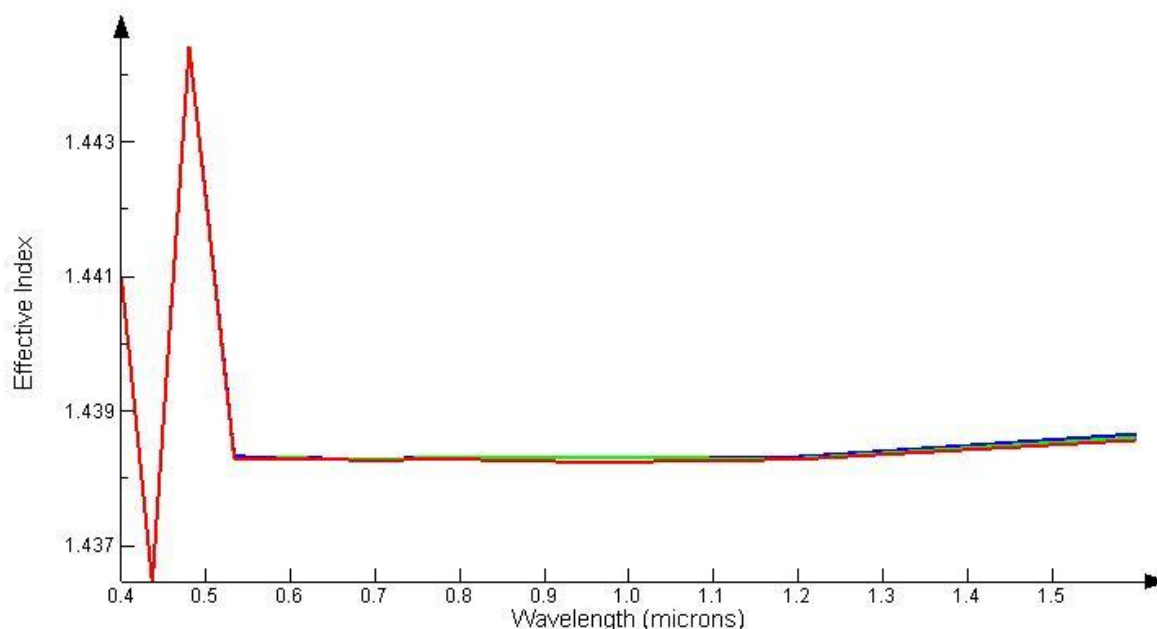
Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Numerická apertura [-]	Útlum vlákna [dB/km]	Průměr plochy základního vidu [μm]
LMA-15 _s	1450	400 – 1200	-	< 7	9 ± 1,5
LMA-15 _k	532	600 – 1700	~ 0,04	< 30	12,5 ± 1,5
	780		~ 0,05	< 10	

Tab. 3. 17: Porovnání disperzí vláken LMA-15

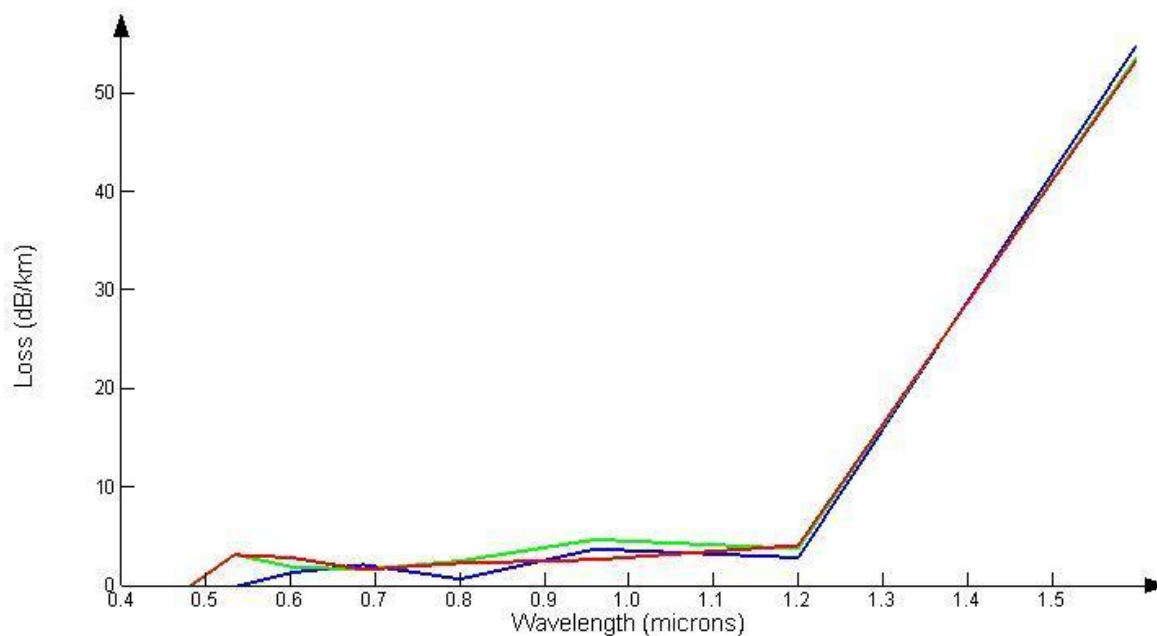
Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Disperze [ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹]
LMA-10 _s	-	800 – 1600	0
LMA-10 _k	1250	-	0

Porovnáme-li Obr. 3. 20, Obr. 3. 21 s Obr. 3. 22 vidíme, že útlum simulovaného vlákna LMA-15_s je pro malé vlnové délky nižší než útlum komerčně dostupného vlákna LMA-15_k. Na Obr. 3. 20 je vidět začátek grafu přibližně na 500 nm pravděpodobně způsobený náběhem simulace. Tab. 3. 16 pak upřesňuje útlum vztažený k šířce pásma. LMA-15_k je šířka pásma sice větší než pro LMA-15_s, zároveň útlum na této šířce pásma je výrazně vyšší než útlum simulovaného vlákna, na kterém útlum stoupá na vlnových délkách nad 1200 nm výrazně nad udávanou hodnotu. Z hlediska útlumu je tedy simulované vlákno na tradičních vlnových délkách lepší než vlákno komerčně dostupné.

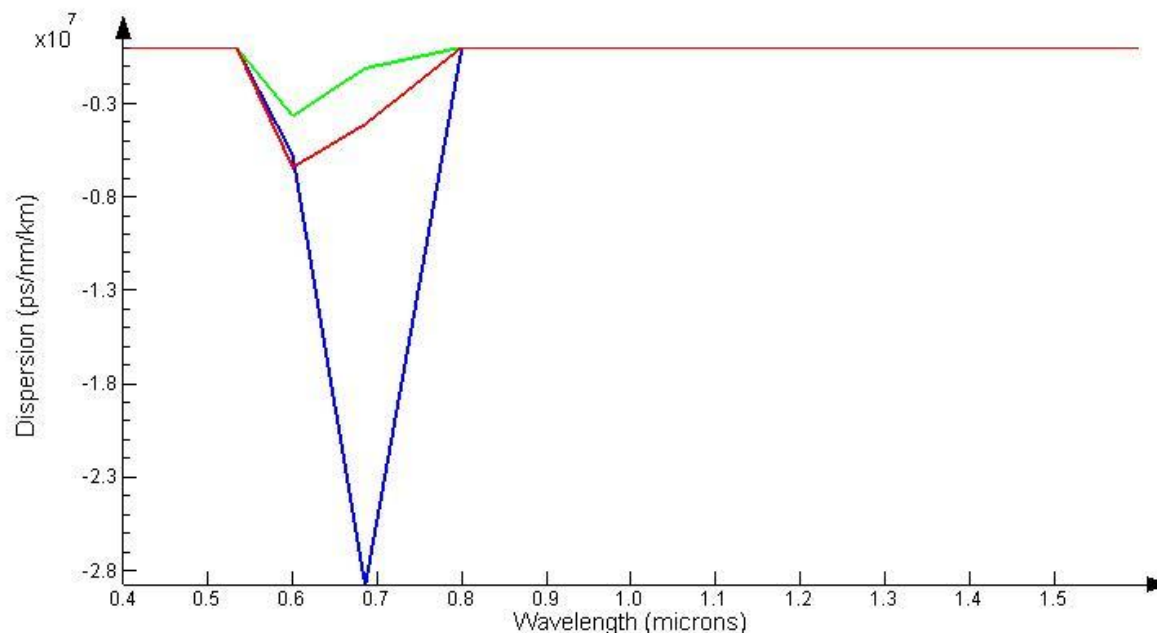
Disperze je u obou vláken nulová na 1250 nm. U simulovaného je pak nulová na určité šířce pásma viz Tab. 3. 17. Na vlnových délkách 500 – 800 nm dosahuje simulované vlákno velkých záporných hodnot, jak je vidět na Obr. 3. 21. U komerčně dostupného vlákna jsou hodnoty disperze v závislosti na vlnové délce vidět na Obr. 3. 22 v části b). První část je pak hodnota útlumu v závislosti na vlnové délce vlákna LMA-10_k. Efektivní index v závislosti na vlnové délce, Obr. 3. 19.



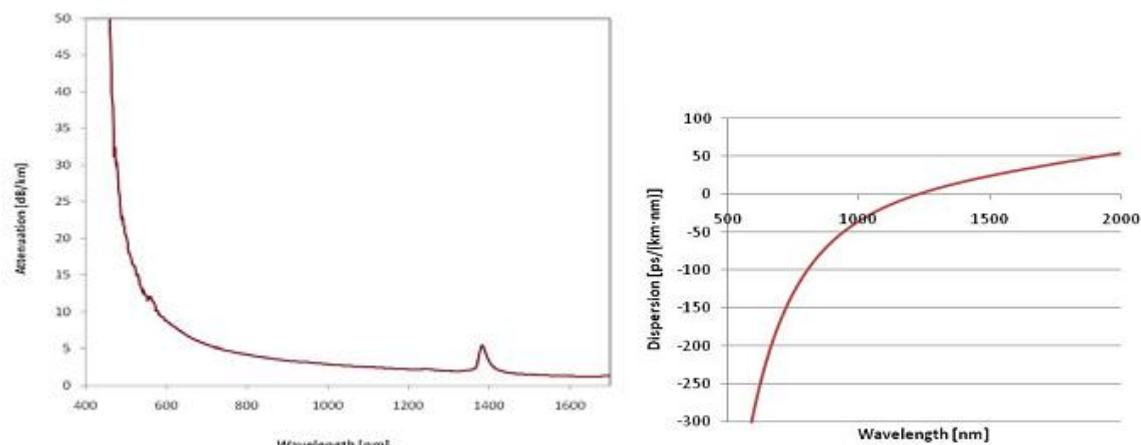
Obr. 3. 19: Efektivní index simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 20: Útlum simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 21: Disperze simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 22: Přenosové parametry vlákna LMA-15_k v závislosti na vlnové délce a) útlum, b) disperze [11]

3.2.4 LMA-20

LMA-20 je posledním simulovaným vláknem. Rozměry vlákna jsou shodné s LMA-15, ale rozteč, průměr mikrostruktur a průměr regionu mikrostruktur se opět liší. Průměr mikrostruktur byl volen 4 a 5 μm viz Tab. 3. 18. Vlnová délka stejně jako u LMA-5 převládá na 1000 nm. Efektivní index vlákna LMA-20 není jednotný pro všechny simulace, nejvíce jsou naměřeny efektivní indexy 1,449 a 1,448.

U tohoto simulování je útlum naměřený ve vidové analýze minimální, oproti útlumu stejného návrhu simulovaného frekvenční analýzou viz Tab. 3. 19. To je příčinou rozdílných simulací s vlastními výpočty.

Oproti předchozímu typu má vlákno LMA-20 nižší útlum, závislý na užší šířce pásma. Útlum těchto simulací se pohybuje kolem 7 dB/km. Disperze je pro všechny simulace nulová na vlnových délkách, které je možné vidět v Tab. 3. 19.

Tab. 3. 18: Vidová analýza LMA-20

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Vlnová délka [nm]	Útlum vlákna [dB/km]	Podíl TE v jádře [%]
5	4	1,449830	1000	9,0687·10⁻⁵	100
	5	1,449692	1000	9,0534·10 ⁻¹²	100
6	4	1,449813	1000	2,6636·10 ⁻⁸	100
		1,449946	800	28182	100
	5	1,448647	1000	1,1832·10 ⁻³	99
7	4	1,449821	1000	3,6802·10 ⁻⁹	100
	5	1,448562	1000	1,6365·10 ⁻⁶	100
8	4	1,449796	1000	3,4099·10 ⁻⁹	100
	5	1,440075	1550	9,8568·10 ⁻⁷	100
		1,448892	1060	3,3084·10 ⁻⁹	100

Tab. 3. 19: Frekvenční analýza LMA-20

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Útlum vlákna na šířce pásma		Disperze na šířce pásma	
			[nm]	[dB/km]	[nm]	[ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹]
5	4	1,449830	400 – 1160	< 7	530 – 1600	0
	5	1,449692	800 – 1160	< 6	600 – 1600	0
6	4	1,449813	400 – 1160	< 7	800 – 1600	0
		1,449946	400 – 1200	< 7	540 – 700	0
	5	1,448647	400 – 1160	< 7	690 – 1600	0
7	4	1,449821	400 – 1180	< 7	600 – 1600	0
	5	1,448562	400 – 1200	< 7	600 – 800	0
8	4	1,449796	400 – 1100	< 7	680 – 1600	0
	5	1,440075	400 – 1250	< 6	1200 – 1600	0
		1,448892	400 – 640	< 6	480 – 1600	0

Tab. 3. 20: Analýza překrytí LMA-20

Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Efektivní index [-]	Plocha základního vidu [μm ²]
5	4	1,449830	135,523
	5	1,449692	106,598
6	4	1,449813	130,608
		1,449946	368,405
	5	1,448647	120,203
7	4	1,449821	131,849
	5	1,448562	108,815
8	4	1,449796	127,987
	5	1,440075	122,555
		1,448892	109,556

Tab. 3. 21: Porovnání vláken LMA-20

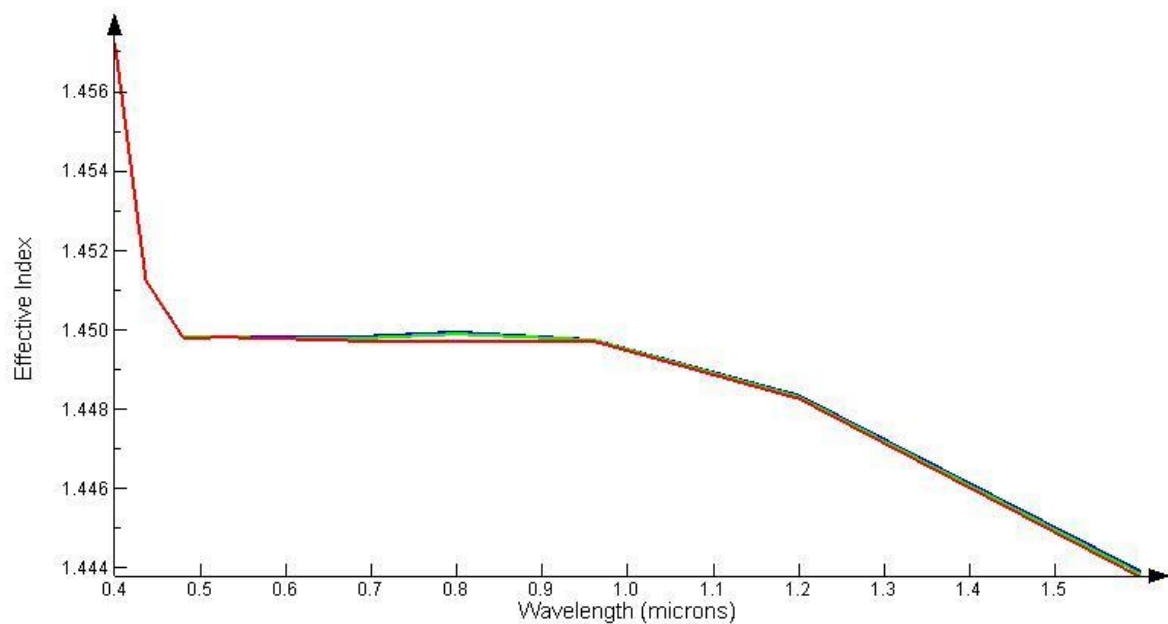
Typ vlákna	Vlnová délka [nm]	Šířka pásma [nm]	Numerická apertura [-]	Útlum vlákna [dB/km]	Průměr plochy základního vidu [μm]
LMA-20 _s	1000	400 – 1160	-	< 7	13,1 ± 1,5
LMA-20 _k	780	780 – 1700	0,04 ± 0,01	< 7	15 ± 1,5
	1060		0,05 ± 0,01	< 2	

Porovnáním vybraného jádra vlákna LMA-20_s s komerčně dostupným vláknem LMA-20_k je možné zjistit z Obr. 3. 24, Obr. 3. 26 a Tab. 3. 21, že na přibližně stejné vlnové délce 1000 nm má vlákno LMA-20_k menší útlum. Na nižších vlnových délkách mají obě vlákna podobné hodnoty útlumu. Šířka pásma z pohledu použitelnosti vlákna pro jeho nízký útlum, je u simulovaného vlákna posunuta k nižším hodnotám vlnové délky oproti komerčně dostupnému vlákně.

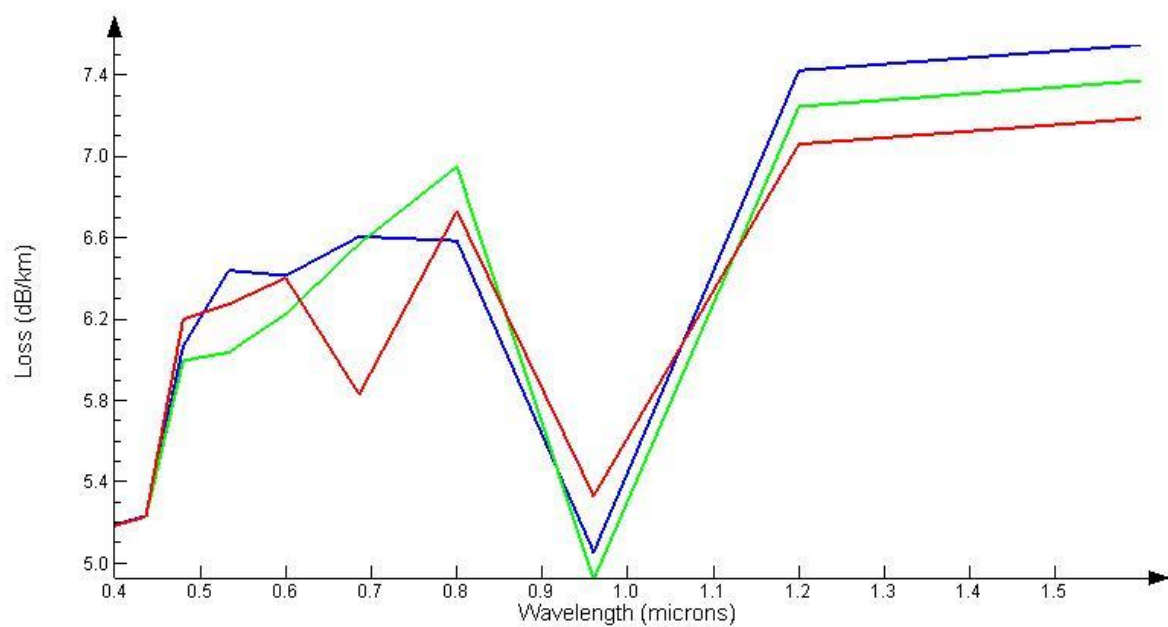
Disperzi zde nebylo možné porovnat, jak lze vidět na Obr. 3. 25 simulované jádro má nulovou disperzi od malých vlnových délek, 550 nm a výše.

V Tab. 3. 19 a Tab. 3. 20 jsou uvedeny další parametry simulovaných vláken, jako například efektivní index a plochu základního vidu. Na Obr. 3. 23 je zobrazen efektivní index simulovaného vlákna.

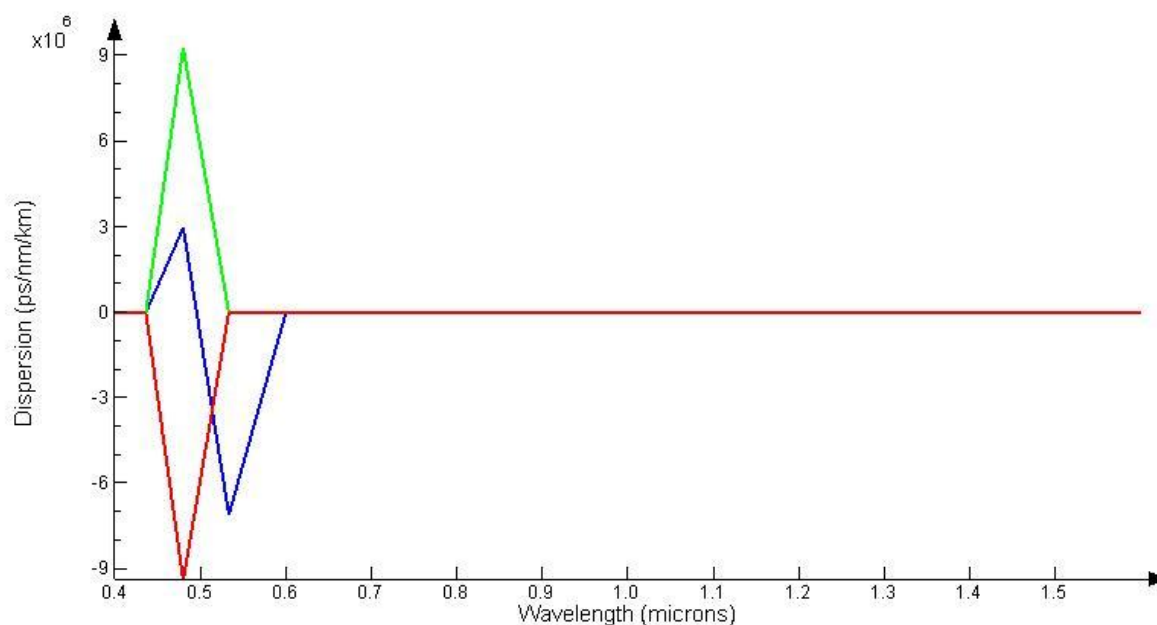
V případě výroby simulovaného vlákna, by toto vlákno mohlo být použito pro přenos na nízkých vlnových délkách, na kterých by bylo požadované vlákno s nulovou chromatickou disperzí.



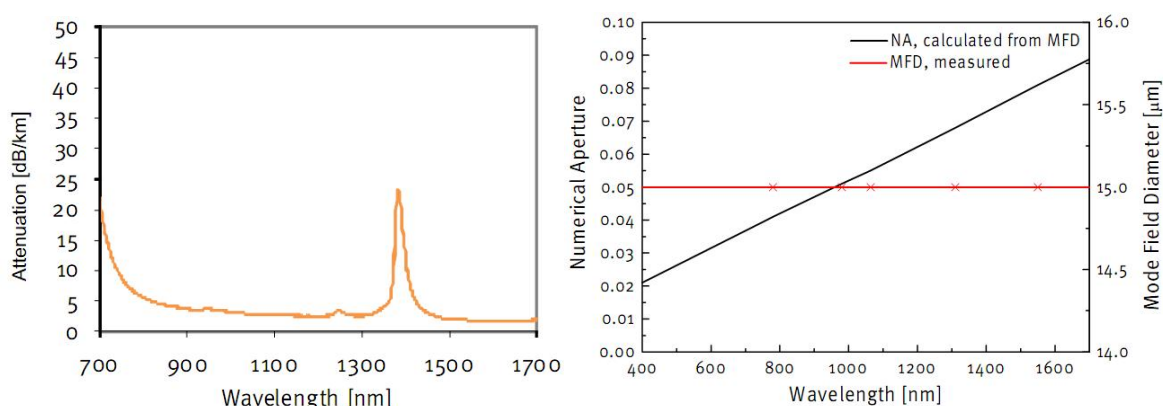
Obr. 3. 23: Efektivní index simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 24: Útlum simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 25: Disperze simulovaného jádra v závislosti na vlnové délce



Obr. 3. 26: Přenosové parametry vlákna LMA-20_k v závislosti na vlnové délce a) útlum, b) numerická apertura a průměr plochy základního vidu [11]

3.2.5 Zhodnocení

V celku tyto simulované vlákna nejsou ideální. Zpravidla když je na nižších vlnových délkách malý útlum, pak na vyšších vlnových délkách jsou hodnoty útlumu vysoké. Tyto vlákna mají na daných vlnových délkách s nízkými hodnotami útlumu často vysoké hodnoty ať už záporné nebo kladné disperze. Každé z těchto vláken mělo z části podobné parametry s komerčně dostupným vláknem stejného typu. Nikdy se nepodařilo při simulaci dosáhnout stejných hodnot všech simulovaných parametrů. Ze čtyř vybraných simulovaných vláken se vlákno LMA-20 přiblížilo nejvíce ke komerčně vyráběnému vláknům stejného typu. Vlákna by se mohla uplatnit pro specifická řešení.

ZÁVĚR

V této diplomové práci bylo úkolem prostudovat nekonvenční vlákna, především pak fotonická krystalická vlákna a jejich využití. Dále popsat a charakterizovat jednotlivé typy vláken a jejich principiální funkčnost. Navrhnout a pomocí programovacího prostředí demonstrovat princip funkce jednorozměrné periodické struktury. Tato jednorozměrná periodická struktura by měla být použitelná jako vlnovod. Nakonec provést simulaci a návrh změny struktury jádra za účelem získání disperzních charakteristik tak, aby se dalo jádro uplatnit v praxi.

V první části byl objasněn princip fotonických krystalů. Rozdělení podle rozměrnosti. Stručně bylo popsáno zakázané pásmo a jeho vliv na světelné paprsky o určitých vlnových délkách.

Další část byla věnována Fotonickým krystalickým vláknům. Jak a z jakého důvodu vznikla. Navazují na klasická nekonvenční optická vlákna a posouvají hranice přenosových vlastností na vyšší úroveň. Byla zde uvedena jejich odlišnost od klasických vláken geometrickou strukturou i výrobou a stavbou vlákna.

Bylo zde popsáno rozdělení Fotonických krystalických vláken na jednotlivé kategorie podle mnoha parametrů a vlastností. Vlákna jsou dělena na vlákna se zakázaným pásmem BGF a vlákna řízená indexem IG. Jednotlivé typy byly stručně charakterizovány. Také byly uvedeny vlastnosti, využití těchto vláken a parametry jednotlivých typů. Pro jednotlivé typy byly uvedeny druhy vyráběných vláken s jejich optickými a fyzickými vlastnostmi.

Poslední část je ryze praktická. Nejdříve byl pomocí simulačního programu vysvětlen princip jednorozměrných struktur na ukázkové simulaci Braggova vlákna za pomoci změn rozměrů jádra. Dále byly simulovány návrhy jader vláken typu LMA vycházejících z komerčně dostupných vláken, za účelem porovnání a nalezení jádra s podobnými, nebo lepšími přenosovými parametry, disperzními charakteristikami a vlastnostmi. Byla nalezena vlákna, která se v určitých ohledech dají považovat za vlákna využitelná v praxi. Nedosahují všeobecně takových vlastností jako doposud vyráběná vlákna.

Jedním z hlavních bodů této části byl návrh změny struktury jádra za účelem změny disperzních charakteristik. Jak bylo možné vidět, některé návrhy vláken LMA měli nulovou disperzní charakteristiku na velké šířce pásma a na vlnových délkách využívaných k přenosu dat. Těchto návrhů by bylo možné využít pro výrobu vlákna s nulovou disperzí pro dané vlnové délky. Dále by se tyto návrhy mohly využít pro vývoj kompenzačních vláken. Jak bylo možné vidět, dosahují vlákna vysokých hodnot disperzí na nižších vlnových délkách. Při vhodně upraveném návrhu by vlákna mohla dosahovat těchto hodnot na vlnových délkách využívaných pro přenos dat pomocí konvenčních vláken. Mohla by být zařazena jako kompenzační vlákna, na začátek nebo konec konvenčních vláken potřebující kompenzaci záporné nebo kladné disperze. Protože je dosaženo velkých disperzních hodnot, byla by jejich délka podstatně menší než u dosavadních kompenzačních vláken. Jedinou nevýhodou je poměrně velký útlum oproti konvenčním vláknům.

Struktury jader navržené v práci mohou být platné pro budoucí výzkum a výrobu PCF vláken.

SEZNAM LITERATURY

- [1] JOANNOPOULOS, J. et al. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. 2nd. Princeton: Princeton University Press, 2008. 304 s.
- [2] LUCKI, M. *Mikrostrukturní vlákna a speciální optická vlákna s kvantovou strukturou*. Praha, 2010. 27 s. Skripta. ČVUT Fakulta elektronického inženýrství. České vysoké učení technické.
- [3] KOVÁCS, P. *Planární rotační symetrické struktury*. Brno, 2007. 42 s. Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vysoké učení technické. Vedoucí diplomové práce Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.
- [4] LÁSKO, J. *Problematika přenosu optického paprsku optickým vláknem*. Brno, 2010. 65 s. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vysoké učení technické. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Šporik.
- [5] BUCHAR, P. *Disperzní charakteristiky kompozitního periodického prostředí*. Praha, 2004. 51 s. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická. České vysoké učení technické. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Jan Macháček, DrSc.
- [6] *NKT Photonics: Crystal Fibre specialty optical fiber solutions*. [online]. c2009, [cit.2010-12-12]. Dostupné z: <<http://www.nktphotonics.com/fiber>>.
- [7] *Photonics crystal Fiber*. [online]. c1999, [cit.2010-12-10]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/Navigation.cfm?Guide_ID=2092>.
- [8] JOANNOPOULOS, J. *Photonic Crystals Tutorial*. [online]. c2003, poslední revize 28. února 2008 [cit.2010-12-9]. Dostupné z: <<http://ab-initio.mit.edu/photons/tutorial/>>.
- [9] *High Power Connectors*. [online]. Poslední revize 6. prosince 2010 [cit.2010-12-13]. Dostupné z: <<http://www.precisionfiberproducts.com/ccp0-catshow/HighPowerConnectors.html>>.
- [10] EFIMOV, V. *Konektory, konnektory, Spojovací konektory, konektor FC FC / APC SC SC / SC APC duplex ST, speciální konektory*. [online]. c2006, poslední revize 3. května 2009 [cit.2010-12-13]. Dostupné z: <<http://www.rus-optic.ru/catalog/connector/connectora.htm>>.
- [11] *Fiber catalog*. Thorlabs. 1029 s.
- [12] *Endlessly Single Mode Fiber*. NKT Photonics. 11 s.
- [13] *Nonlinear Photonic Crystal Fiber*. NKT Photonics. 4 s.
- [14] *Hollow Core Photonic Bandgap Fiber*. NKT Photonics. 10 s.
- [15] *Airguiding photonics Bandgap Fiber*. NKT Photonics. 1 s.
- [16] *Polarization Maintaining Hollow Core Photonics Bandgap Fiber*. NKT Photonics. 1 s.
- [17] *SMA-905 High Power Connector*. NKT Photonics. 1 s.
- [18] *Polarisation Maintaining PCF*. Blazephotonics. 4 s.
- [19] *Highly nonlinear PCF*. Blazephotonics. 8 s.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\mu(r)$	Relativní magnetická permeabilita
μ_0	Permeabilita vakua
a	Perioda
B	Magnetická indukce
c	Rychlost světla ve vakuu
CD	Chromatic Dispersion
d	Průměr mikrostruktury
D	Elektrická indukce
DC	Double Clad
D_j	Průměr jádra
E	Intenzita elektrického pole
ESM	Endlessy Single-Mode
FWM	Four-Wave Mixing
Ge	Germanium
H	Intenzita magnetického pole
HC	Hollow Core
HN	Highly Nonlinear
IG	Index Guiding
J	Hustota elektrického proudu
k	Vlnový vektor
LMA	Large Mode Area
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MOF	Microstructured Optical Fiber
n_{eff}	Efektivní index lomu světla
n_i, n	Index lomu světla
NL	Nonlinearity
OCT	Optical Coherence Tomography
PBF	Photonic Bandgap Fiber
PBG	Photonic Band Gap
PCF	Photonic Crystal Fiber
PER	Polarization Extinction Ratio
PM	Polarisation Maintaining
POF	Plastic Optical Fiber
SC	Supercontinuum
TE	Transverse electric
TM	Transverse magnetic
TO	Telekomunikační okno
v	Normalizovaná frekvence PCF vláken
X, R, M, Γ	Body symetrie Brillouinovy zóny
Yb	Yberium
ZDW	Zero Dispersion Wavelength
ϵ, ϵ_i	Dielektrická konstanta
ϵ_0	Permitivita vakua
Θ_i	Úhel paprsku svíraný s kolmicí na rozhraní dvou materiálů
Λ	Rozteč mikrostruktur
ρ	Hustota volného náboje
ω	Frekvence

SEZNAM PŘÍLOH

A první příloha 1

71

PŘÍLOHY

A první příloha 1

Tabulka rozměrů všech simulovaných vláken.

Typ vlákna	Počet prstenců	Průměr mikrostruktur [μm]	Průměr jádra [μm]	Rozteč [μm]	Průměr pláště [μm]	Průměr vlákna [μm]
LMA-5	5	1	5	2,5	125	245
	6					
	7	2				
	8					
LMA-10	5	2	10	5	125	240
	6					
	7	3				
	8					
LMA-15	5	3	15	7,5	230	350
	6					
	7	4				
	8					
LMA-20	5	4	20	10	230	350
	6					
	7	5				
	8					