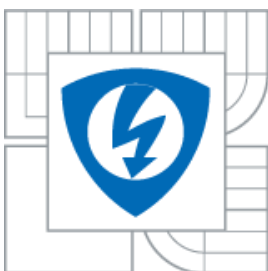




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

PROBLEMATIKA PŘENOSU OPTICKÉHO PAPRSKU OPTICKÝM VLÁKNEM

PRINCIPLES OF TRANSMISSION OF OPTICAL BEAM BY OPTICAL FIBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN LÁSKO

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN ŠPORIK

BRNO 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Jan Lásko

ID: 106590

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Problematika přenosu optického paprsku optickým vláknem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem práce je prostudovat problematiku šíření optického paprsku vhodnými vlnovody. Zaměřit se na princip navázání paprsku do vlákna. Analyzovat vlivy, které ovlivňují šířící se optický paprsek. Blíže popsat parametry současně používaných vláken. Realizovat softwarovou vizualizaci problematiky šíření optického paprsku v optickém vlákně, na jejímž základě budou patrné vlivy útlumu a disperzí ve vlákně.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Brno: Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [2] SALEH, B. E. A. TEICH, M.C. Základy fotoniky, svazek 1. Dušek, R. M.; FIALA, J.; VACEK, J. Praha: MATFYZPRESS, 1994. 226 s. ISBN 80-85863-01-4.
- [3] WILFERT, O. Optoelektronika. Brno: PC-DIR, 1993. 135 s. ISBN 80-214-0551-1.
- [4] WILFERT, O. Fotonika a optické komunikace. Brno: VUT FEKT, 2007. 128 s. ISBN 978-80-214-3537-7.

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 2.6.2010

Vedoucí práce: Ing. Jan Šporík

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Anotace

Práce se zaměřuje na šíření paprsku optickým vláknem, parametry, které mohou ovlivnit průchod paprsku vláknem, disperzi, útlum, numerickou aperturu a mody ve vlákně. V dílčích úsecích jsou řešeny příklady dané problematiky a praktické ukázky vizualizace numerické apertury, chromatické, vidové a polarizační disperze. V práci jsou popsány základní vlastnosti nové technologie výroby vláken nezávané mikrostrukturální a popsána jejich problematika.

Klíčová slova: Útlum, disperze, mikrostrukturální vlákna, vizualizace.

Abstract

The work is focused on spreading beam optical fiber parameters which may affect the passage of the beam fiber dispersion, attenuation, numerical aperture and mods. In sub-sections there are examples which solve the problems and also practical examples of visualization of numerical aperture, the chromatic, and polarization dispersion. The basic features of the new technology of fiber called microstructure and problems connected with it are described on the paper.

Key words: attenuation, dispersion, microstructural fiber, visualization.

LÁSKO, J. Problematika přenosu optického paprsku optickým vláknem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Šporik.

Prohlašuji, že svoji semestrální práci na téma: Problematika přenosu optického paprsku optickým vláknem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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.121/2000Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §152 trestního zákona č.140/1961Sb.

V Brně dne.....

.....

Podpis autora

Děkuji Ing. Janu Šporikovi za cenné rady, přínosné konzultace, poskytnutou literaturu.

V Brně dne.....

.....

Podpis autora

Obsah

Seznam tabulek	9
Seznam obrázků	10
Úvod	11
1. Teorie optických vláken.....	12
1.1 Základní vlastnosti optických prostředí.....	12
1.1.1 Atmosféra.....	12
1.1.2 Optické vlákno	13
1.2 Výroba optických vláken.....	13
1.3 Optický spoj.....	14
2. Druhy optických vláken.....	15
2.1 Vlákná jednomodová – Single mode (SM).....	15
2.1.1 Druhy jednomodových vláken	16
2.2 Vlákná mnohomodová – Multimode (MM)	17
2.2.1 Vláknó gradientní – s proměnným indexem lomu	17
2.2.2 Vláknó s konstantním indexem lomu	18
2.3 Vlákná PCF-Photonic crystal fiber	19
2.3.1 Geometrie vlákna	19
2.3.2 Zakázaná oblast	19
2.3.3 Druhy mikrostrukturálních vláken.....	20
3. Parametry ovlivňující paprsek ve vláknu	24
3.1 Módy ve vlákne	24
3.1.1 Dělení módů.....	24
3.1.2 Počet módů ve vlákne.....	25
3.2 Profily indexu lomu pro jednomodová vlákna.....	27
3.3 Profil indexu lomu	27
3.4 Navázání paprsku do vlákna.....	28
3.4.1 Výpočet mezního úhlu šíření (totální reflexe).....	28
3.4.2 Buzení optického vlákna.....	28
3.4.3 Numerická apertura	29
3.4.4 Navazovaný výkon.....	29
3.5 Účinnost navázání paprsku ze zdroje do vlákna	30
3.5.1 Účinnost navázání paprsku do vlákna	30
3.6 Způsoby navazování paprsku.....	31
3.6.1 Navazování LED.....	31
3.6.2 Navazování Laseru	32
3.6.3 Navazování vlákno-vlákno	32
3.6.4 Konektorové navazování	33

4.	Zdroje optického záření	34
4.1	LED zdroje	34
4.1.1	Povrchově emitující LED (SLED)	34
4.1.2	Hranově emitující LED (ELED)	34
4.2	LASERové zdroje	34
4.2.1	FP- lasery	35
4.2.2	DFB lasery - hranově vyzařující lasery	35
4.2.3	VCSEL lasery - plošně vyzařující lasery	35
5.	Útlum optických vláken	36
5.1	Ztráty absorpcí	37
5.2	Ztráty rozptylem.....	38
5.3	Ohybové ztráty.....	39
6.	Disperzní ztráty	41
6.1	Materiálová disperze	41
6.2	Vidová disperze	42
6.3	Polarizační vidová disperze	44
6.4	Chromatická disperze (CD)	45
7.	Rozložení světla ve vlákne (Gaussův svazek)	47
7.1	MFD (mode field diameter).....	47
8.	Vizualizace	48
8.1	Vizualizační program VLAKNO_NA.....	49
8.2	Vizualizační program DiSiGi	50
8.3	Vizualizační program DIBIT	51
8.4	Vizualizační program DICHRO.....	52
8.5	Vizualizační program PMDDI.....	53
9.	Závěr	54
	Litertura	56
	Seznam zkratk a symbolů.....	57
	Seznam příloh.....	59
	Přílohy	60
	A první příloha.....	60
	B druhá příloha	65

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Doporučení ITU pro jednomodová vlákna [14]	15
Tab. 2.2: Vlastnosti jednomodových vláken	16
Tab. 2.3: Doporučení ITU pro mnohomodová vlákna [15]	17
Tab. 2.4: Vlastnosti mnohomodových vláken	18
Tab. 2.5: Vlastnosti vlákna se skleněným jádrem.....	20
Tab. 2.6: Vlastnosti vlákna s dutým jádrem	21
Tab. 2.7: Vlastnosti polarizovaného vlákna.....	22
Tab. 2.8: Vlastnosti vlákna s velkou vidovou plochou.....	22
Tab. 2.9: Vlastnosti Highly nolinear	23
Tab. 4.1: Základní parametry zdroje optického záření OFLS-B-48-10C	34
Tab. 4.2: Základní parametry zdroje optického záření OFLS-5[18]	35
Tab. 4.3: Základní parametry zdroje optického záření OFLS-5[18]	35
Tab. 5.1: Jednotlivá vlnová okna	36
Tab. 5.2: Ionty působící ztráty ve vláknu na dané vlnové délce	37
Tab. 6.1: Tabulka maximálních délek a mezí Δt (DGD).....	44

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Elektromagnetické vlnění a rozdělení viditelného spektra	13
Obr. 1.2: Optický spoj a princip přenosu informace	14
Obr. 2.1: Druhy optických vláken MM vlevo, SM (uprostřed), mikrostrukturální.....	15
Obr. 2.2: Parametry vlákna základní struktury PCF.....	19
Obr. 2.3: Zakázaná oblast-defekty v periodické struktuře.....	20
Obr. 2.4: Hollow core (zobrazení jádra) [14]	21
Obr. 2.5: Šíření paprsku vláknem pro krátké a dlouhé vlnové délky[13].....	22
Obr. 2.6: Highly nonlinear.....	23
Obr. 3.1: Rozdělení energie ve vlákně pro jednotlivé módy LP	26
Obr. 3.2: Rozložení intenzit v modu [13].....	26
Obr. 3.3: Různé druhy profilů indexu	27
Obr. 3.4: Šíření paprsku vláknem	28
Obr. 3.5: Účinnost navázání optického paprsku a) $\eta < 1$ b) $\eta = 1$	31
Obr. 3.6: Navazování paprsku z LED zdroje do vlákna	31
Obr. 3.7: Navazování Laserového paprsku do vlákna.....	32
Obr. 3.8: Navazování vlákno-vlákno	32
Obr. 3.9: Různé typy ferulí a značení nejčastěji používaných konektorů.....	33
Obr. 4.1: Princip vyzařování a) FB-laser, b) DFB laser, c) VCSEL laser	35
Obr. 5.1: Útlum na optických vláknech [13]	36
Obr. 5.2: Ztráty ve vlákně ohyb-(makroohyb, mikroohyb), rozptyl, absorpce	39
Obr. 6.1: Vidová disperze (MM-gradientní MM-stepindex, SM jednomodové).....	42
Obr. 6.2: Polarizační disperze, Δt (DGD)- rozdíl mezi pomalou a rychlou osou	44
Obr. 6.3: Zobrazení sklonu disperzní charakteristiky v místě nulové disperze S_0	45
Obr. 7.1: Rozložení intenzity energie -Gausova křivka	47
Obr. 8.1: Průběh paprsku vláknem a vizualizace dat v jednotlivých bodech vlákna	48
Obr. 8.2: Program VLAKNO_NA simulace průběhu paprsku vláknem.....	49
Obr. 8.3: Program DiSiGi pro simulaci vidové disperze SI a GI vláken.....	50
Obr. 8.4: Program DIBIT sloužící k výpočtu maximální šířky pásma	51
Obr. 8.5: Program DICHRO vizualizace chromatické disperze	52
Obr. 8.6: Program PMDDI vizualizace polarizační disperze.....	53

Úvod

Bakalářská práce je zaměřena na základní problematiku přenosu optického paprsku vláknem. Zabývá se vlivy, které působí na paprsek při průchodu optickým vláknem a jak toto působení ovlivnit nebo jak zamezit ztrátám při přenosu. Jedná se především o zajištění bezchybných přenosů s vysokou rychlostí.

První kapitola popisuje teorii šíření světla v různých prostředích, výrobu optických vláken a optickými spoji.

Druhá kapitola je zaměřena na jednotlivé druhy optických vláken, způsoby použití a na jejich výhody a nevýhody. Dále je úvodem do nové technologie výroby vláken zvané mikrostrukturální vlákna nebo Photonic Crystal Fiber (PCF). Popisuje druhy vláken vyrobených touto technologií, jejich vlastnosti a struktury.

Třetí kapitola se zabývá problematikou přenosu paprsku ve vlákne. Je zaměřena na módy, profily indexu lomu a navazování paprsku do vlákna.

Čtvrtá kapitola pojednává o zdrojích optického záření. Popisuje základní druhy zdrojů LED (luminiscenčních diod) a laserových zdrojů.

Pátá kapitola popisuje útlumové vlastnosti vlákna, ztráty rozptylem, absorpcí a v ohybech. Ztráty rozptylem popisují Rayleigho, Mieův rozptyl. V podkapitole je řešen problém kritického ohybu pro vlákna jednomodová a mnohomodová .

V kapitole šest jsou popsány čtyři druhy disperzních ztrát, disperze materiálová, vidová, polarizační a chromatická. A je naznačen vliv disperzí na jednotlivé vlastnosti vláken.

V kapitole sedm je pojednáno o Gaussovu svazku a parametru MFD (mode field diameter), které ovlivňují jednomodové vlákno.

V poslední kapitole je popsána praktická část bakalářské práce. Popisuje vizualizaci numerické apertury, chromatické, vidové a polarizační disperze.

1. Teorie optických vláken

1.1 Základní vlastnosti optických prostředí

Přenos informace pomocí světelného signálu je odlišný od šíření elektrického signálu. Hlavním rozdílem je přenosové medium, kde nositelem elektrického signálu jsou galvanické vazby a elektricky nabitě elektrony. Naproti tomu u optického signálu jsou vazby neutrální, tvořené fotony, které na sebe vzájemně nepůsobí. V optickém spoji nevznikají elektrická a magnetická pole, která by byla příčinou rušivých signálů. Rovněž nedochází k zpětnému ovlivňování mezi výstupem a vstupem.

Optickým prostředím může být nejen optické vlákno, ale také vakuum, atmosféra a kosmický prostor. Více v literatuře [2][6].

Index lomu

Index lomu je základní optickou veličinou, charakterizující libovolné optické prostředí. Index lomu je vždy větší než 1

$$n = \frac{c_0}{v}, \quad (-) \quad (1.1.)$$

v -rychlost světla v daném materiálu
 c_0 -rychlost světla.

Časová perioda

Je čas, za který vlna „uběhne“ jednu vlnou délku

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (s) \quad (1.2.)$$

ω -je úhlová rychlost.

Vlnová délka

Je to délka, kterou vlna uběhne za dobu jednoho kmitu.

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}, \quad (m) \quad (1.3.)$$

1.1.1 Atmosféra

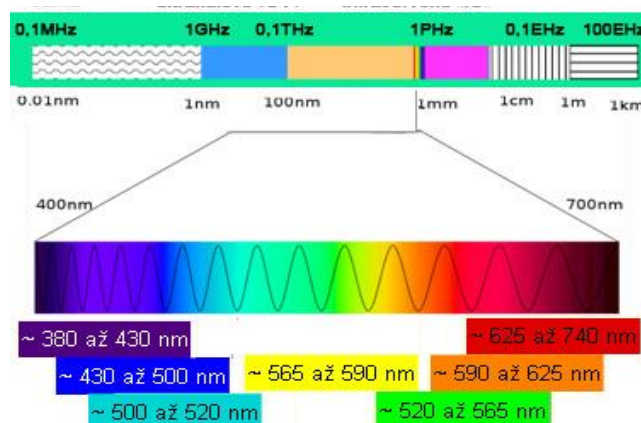
Atmosféra patří také do prostředí, kde je možné uskutečňovat datové přenosy prostřednictvím světelných paprsků. Šíření světla v atmosféře se potýká s mnoha nežádoucími vlivy, jako je přídavný šum vyvolaný jasem pozadí nebo při detekci samotné nosné vlny v důsledku velké spektrální šířky zdrojů.

Atmosféra je brána jako prostředí nehomogenní s nahodilým charakterem, kam můžeme zařadit jevy, jako je rozdílná teplota vzduchu, kde se paprsek může odchýlit od své původní osy šíření. Také musíme uvažovat o proměnlivosti prostředí (mlhy, déšť, ptactvo aj.), na těchto jevech je závislý útlum absorpce. Proto atmosférické prostředí není

vhodné pro přenosy na velké vzdálenosti. Také musíme zachovat přímou viditelnost vysílače a přijímače.

1.1.2 Optické vlákno

Optické vlákno je prostředí, kterým se šíří elektromagnetické vlnění (Obr. 1.1). Nejčastěji to bývá světlo z viditelné oblasti (400-800 nm) nebo světlo infračervené (760 nm-1 mm) a ultrafialové (100 nm-40 nm). Šíření elektromagnetického vlnění probíhá vláknem na principu totálního odrazu na rozhraní dvou materiálů s rozdílným indexem lomu (index lomu vyjadřuje změnu rychlosti šíření světla při přechodu mezi různými prostředími). Zavedením optického paprsku do vlákna dochází k šíření světla pomocí modů (specifické rozložení elektromagnetické energie ve vláknu), čím méně modů tím jsou lepší přenosové vlastnosti jako útlum a přenosová rychlost. Menšího počtu vidů docílíme zmenšením průměru jádra a zvětšení vlnové délky. Změnou těchto vlastností dochází i k nežádoucím vlastnostem, například u jednomodového vlákna, které je náchylnější k vyvazování paprsku způsobeného velkým ohybem světlovodu viz kapitola 3.1. Jednotlivé vlastnosti vláken jsou specifikovány v doporučeních ITU-T např. pro vlákna gradientní (kapitola 2.1) a vlákna jednomodová.(kapitola 2.2).



Obr. 1.1: Elektromagnetické vlnění a rozdělení viditelného spektra

1.2 Výroba optických vláken

V této části jsou vyznačeny jen základní druhy způsobů výroby optických vláken a vysvětlení základních pojmů.

Optická vlákna můžeme zařadit do několika skupin a to do vláken plastových POF (plastic optical fiber) 980,1000μm, která se používají na osvětlení nebo na krátké přenosové trasy (vlákno do domu) jejich $NA = 0,47$, do vláken dopovaných, kde se využívá mnohabodového čerpání do pláště vlákna (více v literatuře [2]), a vláken

mikrostrukturálních (více v kapitole 8.5). Nejčastěji vyráběná vlákna jsou z SiO_2 a jsou legována příměsmi P_2O_5 , B_2O_3 , GeO_2 , množstvím příměsí nastavujeme vlastnosti daného vlákna (indexu lomu, útlum, disperze). Výhodou tohoto materiálu je velmi nízký útlum v infračervené oblasti. Pozor se musí dát na rezonační oblasti s OH ionty.

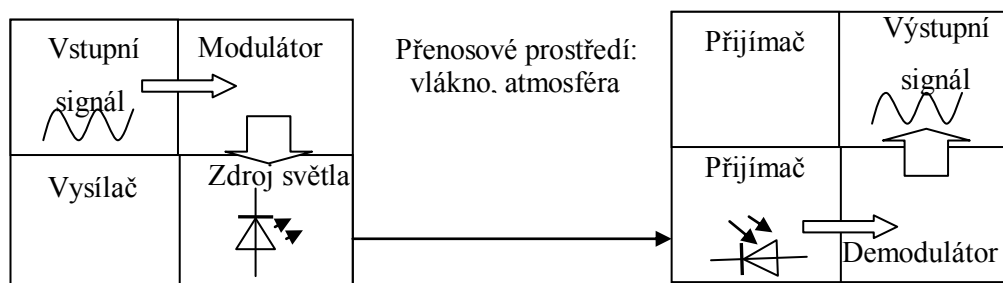
Vlastní výroba vlákna probíhá tažením preformy-skleněné tyčky, jejíž profil představuje výsledné vlákno. Z preformy se při intenzivním lokálním ohřevu táhne vlákno, na které se nanáší primární ochrana a v další fázi se vlákno ještě vytvrzuje. K výrobě preformy se využívají různorodé technologie:

- OVD (Outside Vapour Deposition)-boční depozice (nanášení) na jádro rotující konstantní rychlostí.
- MCVD (Modified Chemical Vapour Deposition)-chemická depozice z plynné fáze. Oxidy jsou nanášeny na vnitřní stěnu rotujícího křemenného válce.
- PCVD (Plasma Chemical Vapour Deposition)-podobná jako technologie MCVD, ale nanášení probíhá mikrovlnnou plasmou.
- VAD (Vapour Phase Axial Deposition)-nanášení oxidů z plynné fáze na rotující kotouček v axiálním směru.
- Metoda kapalně fáze- nejjednodušší výroba vlákna
- Tyčka v trubce – do skleněné trubky s malým indexem lomu se vloží trubka z čistého křemene.
- Metoda dvojitého kelímku – tavení pláště a jádra probíhá odděleně ve dvojitěm kelímku. Tato metoda se vyznačuje tím, že můžeme vytvořit vlákna velmi dlouhých délek až 100 km (prakticky hůře realizovatelné)

U metod vytvořených kapalnou fází musíme nanést primární ochranu, jako jsou různé pryskyřice, silikonové obaly a jiné, které chrání vlastní vlákno před poškozením a zlepšují mechanické vlastnosti. Podrobněji popisuje literatura [2].

1.3 Optický spoj

Optický spoj (Obr. 1.2) je tvořen modulovaným zdrojem signálu (LED, Laser), optickým prostředím (vlákno, atmosféra) a přijímačem signálu (fototranzistor). Vstupní a výstupní signál je tvořen elektrickým signálem. Podrobněji popisuje literatura[5].

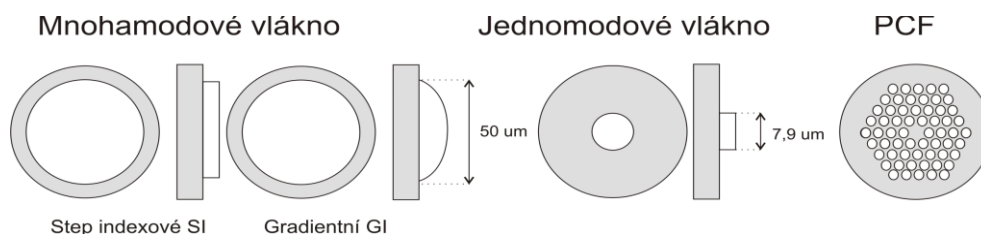


Obr. 1.2: Optický spoj a princip přenosu informace

2. Druhy optických vláken

U optických vláken se rozlišuje několik druhů vláken a to podle jejich konstrukce.

- Jednomodová Viz (Obr. 2.1).
- Mnohomodová Viz (Obr. 2.1).
 - SI - se skokovou změnou indexu (step index)
 - GI- gradientní vlákna (gradient index)
- Mikrostrukturální Viz (Obr. 2.1).



Obr. 2.1: Druhy optických vláken MM vlevo, SM (uprostřed), mikrostrukturální

2.1 Vlákná jednomodová – Single mode (SM)

Jsou vlákna s konstantním indexem lomu, malou disperzí, malým útlumem a velice dobrou přenosovou kapacitou. Tato vlákna přenášejí jeden vid (3.1). Toho docílíme zmenšením průměru jádra, to má za následek zvětšení úhlu odrazu ve vlákně a zmenšení dráhy paprsku. V jednomodových vláknech se projevuje jak polarizační tak chromatická disperze. U některých vláken se pro lepší průchod světelného paprsku vytvářejí různé složité profily indexu a tím paprsek vláknem prochází s lepšími vlastnostmi. Přehled parametrů je uveden v Tab. 2.2 [6]. Jednotlivé vlastnosti jsou specifikovány v doporučeních ITU (International Telecommunication Union) (Tab. 2.1).

Tab. 2.1: Doporučení ITU pro jednomodová vlákna [14]

ITU	Specifikace
G.650	Definice zkušebních metod pro jednomodová vlákna.
G.650.1	Definice zkušebních metod pro lineární a deterministické atributy jednomodových vláken a kabelů.
G.650.3	Zkušební metody pro instalaci jednomodových vláken a kabelů
G.652	Charakteristiky single-mód optických vláken a kabelů
G.652.A	Pro standardní optické vlákno 9/125 µm
G.652.C	Pro vlákna schopná provozu ve vlnových délkách 1260-1460 nm
G.653	Charakteristiky vláken s posunutou disperzí DSF (Dispersion Shifted Fiber) pro potlačení chromatické disperze na vlnové délce 1550nm
G.654	Charakteristiky jednomodových optických vláken a kabelů pro velmi nízký útlum na vlnové délce 1550 nm
G.655	Charakteristiky vláken používaných pro DWDM(hustý vlnový multiplex) a pro vysoké přenosové rychlosti
G.657	Vlastnosti ohybových ztrát v jednomodových optických vláknech a kabelech v přístupových sítích
G.657.A	Pro vnitřní kabeláže a pro optické přístupové sítě [2]

2.1.1 Druhy jednomodových vláken

- Klasická vlákna

NDSF (Non Dispersion Shifted Fiber) – (konveční vlákna) vlákno bez kmitočtové posunuté disperze určené převážně pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm.

DSF (Dispersion Shifted Fiber) – vlákna s posunutou kmitočtovou disperzí, která posunula nulovou disperzi k délkám 1550 nm.

NZ-DSF (nonzero-dispersion fiber) technologie výroby zmenšující nelinearity vláken DSF, což umožňuje výrobu s kladnou a zápornou disperzí.

- Polarizovaná vlákna – PM (Polarization Maintaining)

Polarizovaná vlákna jsou schopná udržet lineární polarizaci po celé délce průchodu paprsku vláknem. Přitom se musí dosáhnout splnění podmínky navázání paprsku. Paprsek musí být přesně vyrovnan vzhledem k pomalé ose, ale také musí být lineárně polarizován. Jsou-li dodrženy stanovené podmínky, je na výstupu vlákna paprsek rovněž lineárně polarizován. (Více v kapitole 6.3) ..

Parametry vlákna

- Nevyskytuje se u nich vidová disperze, pouze chromatická a polarizační vidová disperze
- Pro své buzení vyžadují laserové diody
- Vyrábí se z homogenní skloviny
- Použití v telekomunikacích pro větší vzdálenosti
- Ztráty ve vlákně bending loss (ztráty v ohybu)
- Velká šířka pásma
- Vyznačují se malou numerickou aperturou NA

Tab. 2.2: Vlastnosti jednomodových vláken

Průměr jádra D_i	7-9 μm
Průměr pláště D_p	125 μm
Vlnová délka	$\geq 1250\text{nm}$
Šířka pásma	10 GHz
Součinitel šířky pásma	100GHz.km
Disperze	cca 0,3 ns.km ⁻¹
Útlum (při vlnové délce 1550 nm)	pod 0,2 dB.km ⁻¹
Útlum (při vlnové délce 1300 nm)	pod 0,35 dB.km ⁻¹
Index lomu (spektrální oblasti 1300 nm – 1600 nm)	1,46-1,49
Numerická apertura	$\approx 0,1$

2.2 Vlákná mnohomodová – Multimode (MM)

U vláken mnohomodových rozlišujeme dva druhy. Vlákná s konstantním indexem (step index SI) lomu a s proměnným indexem (gradientní GI) lomu. Jsou to vlákna s velkým průměrem jádra nad 10 μm a do nich vstupují vidy (paprsky) pod mnoha úhly. Tato vlákna mají obecně větší útlum, disperzi a menší přenosovou kapacitu a používají se na kratší vzdálenosti. Jsou méně citlivá na změnu vlnové délky. Díky vysoké numerické apertuře NA je snadnější navázání paprsku do vlákna. Lze použít i LED diody.

Jednotlivé vlastnosti jsou specifikovány v doporučeních ITU (Tab. 2.3).

Tab. 2.3: Doporučení ITU pro mnohomodová vlákna [15]

ITU	Specifikace
G.651	Specifikace mnohomodových vláken (zastaralé nahrazeno G. 651.1)
G.651.1	Specifikace geometrických vlastností, zkušebních metod pro vlákna MM 50/125 μm pro optické přístupové sítě

Parametry vlákna

- Ztráty ve vlákně bending loss (ztráty v ohybu)
- Použití v telekomunikacích pro kratší vzdálenosti
- Větší útlum
- Snadnější spojování vláken

2.2.1 Vlákní gradientní – s proměnným indexem lomu

Vlákní se skládá z mnoha vrstev s rozdílným indexem lomu. Paprsek prochází vláknem a kopíruje tvar kvadratické paraboly. Vrstva s největším indexem lomu je nanášena nejbližší k plášti. Tento druh výroby vlákna umožnil zvětšit šířku pásma až 25x oproti SI. Vlákní je používáno pro datové komunikace a to do vzdálenosti stovek metrů až kilometrů. Jedná se o kompromis mezi vláknem jednomodovým a mnohomodovým SI vláknem [2].

Konstrukce vláken GI

- Sklo-sklo - základem je SiO₂ (plášť i jádro) s příměsemi jako je germanium, bor, fosfor dokonce i flór a těmito příměsemi nastavujeme index lomu jádra.

2.2.2 Vlákno s konstantním indexem lomu

Toto vlákno patří k technologicky jednodušším, jeho výroba je levná a snadná, ale také trpí větším útlumem a disperzí a nízkou přenosovou kapacitou viz porovnání parametrů v Tab. 2.4. Používá se na krátké vzdálenosti (vlákno do domu, v lékařství, jako vláknové senzory).

Konstrukce vláken SI

- Sklo-sklo plášť i jádro jsou vyrobeny z SiO_2 .
- HCS (Hard Clad Silica) - skleněné jádro a plastový plášť, jejich vlastnosti jsou daleko horší, jejich předností je cena.
- POF (Plastic Optic Fiber) - plastová vlákna velký útlum, nízká cena.
- Kapalinové světlovody - světelný paprsek se šíří v kapalině, která slouží také jako jádro vlákna.
- Dutá vlákna - jádro je tvořeno dutinou v trubičce. Použití těchto vláken je hlavně v oblasti infračerveného záření.

Tab. 2.4: Vlastnosti mnohomodových vláken

Druh vlákna	S konstantním indexem lomu	S proměnným indexem lomu
Průměr jádra D_j	50-200 μm	50-100 μm
Průměr pláště D_p	120-300 μm	125-140 μm
Vlnová délka	850-1300nm	850 nm
Šířka pásma	60 MHz	600 MHz
Součinitel šířky pásma	20-100 MHz.km	0,3-1,5 GHz.km
Disperze (850 nm)	cca 50 ns.km-1	cca 1 ns.km-1
Útlum (při vlnové délce 850 nm)	5-20 dB.km-1	2,5-5 dB.km-1
Útlum (při vlnové délce 1300 nm)	5-20 dB.km-1	5-20 dB.km-1
Numerická apertura	$\cong 0,2-0,5$	$\cong 0,2-0,5$

2.3 Vlákná PCF-Photonic crystal fiber

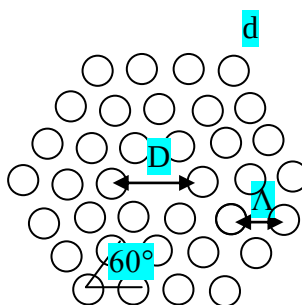
Tato vlákna se vyrábějí podobnou technologií jako vlákna klasická. Základním prvkem je preforma, z které se vlákno táhne, ale s rozdílem, že po celé délce vlákna jsou vytvořeny kapilární duté nebo plné otvory (podle druhu vlákna). Touto úpravou dosahujeme daleko lepších parametrů, jako je mnohem větší kontrast indexu lomů. [2] [13] [14]

Parametry vlákna

- Umožňují poloměr ohybu pod $<1\text{ cm}$ bez změny optického přenosu
- Vysoký práh pro nelineární efekty
- Čistý oxid křemičitý

2.3.1 Geometrie vlákna

Popis základních parametrů mikrostrukturálního vlákna a rozmístění jednotlivých prvků ve vlákne. Jádru D může být tvořeno i vzduchovým tunelem vlákna HOLLOW-core.(Obr. 2.2)



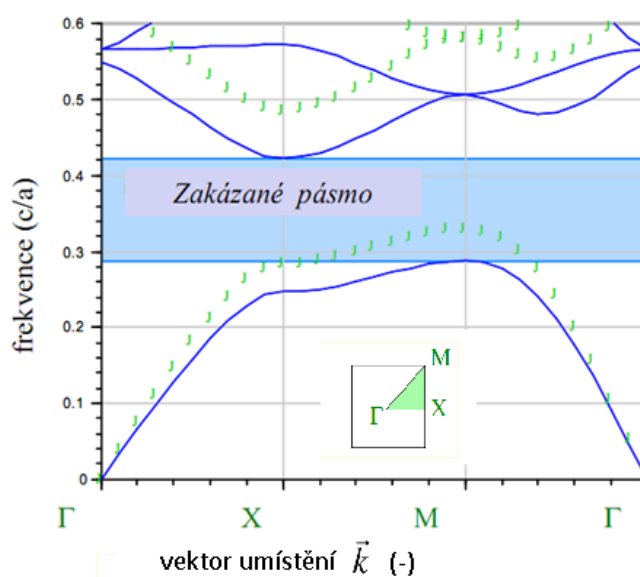
Obr. 2.2: Parametry vlákna základní struktury PCF

- d - průměr mikrostruktury;
- D - průměr jádra
- A - rozteč mikrostruktur
- d/A – (normalized hole diameter) normalizovaná velikost mikrostruktury a udává procentuální poměr vzduchu a skla
- Mikrostruktury snižují efektivní index lomu
- Dále se uvádí počet mikrostruktur kolem jádra
- Čím více prstenců tím nižší ztráty
- Mikrostruktury mohou být kulaté, válcové, čtvercové nebo jinak prostorově tvarované

2.3.2 Zakázaná oblast

Jako u polovodičů rozeznáváme zakázané oblasti Obr. 1.2, tak podobné vlastnosti rozeznáváme i u fotonických krystalů tvz. (Photonic band gap PDG). Vlny se mohou šířit uvnitř vlákna pouze v určitých frekvenčních pásmech a ta jsou od sebe oddělena. Jedná se o typickou vlastnost periodických prostředí způsobenou silnou disperzí a propustným

a zádržným pásmem ve spektru. Pokud se dostaneme do zakázaných pásem, vlákno se začne chovat jako dokonalé zrcadlo a veškerý výkon je ztracen [13].



Obr. 2.3: Zakázaná oblast-defekty v periodické struktuře

2.3.3 Druhy mikrostrukturálních vláken

Mikrostrukturální vlákna lze rozdělit do několika skupin podle způsobu chování paprsku a vnitřní konstrukce vlákna.

Vlákno se skleněným jádrem - Index guiding PCF

Je tvořeno pevným skleněným jádrem, kde je efektivní index pláště menší než index jádra a kontrasty indexu lomů jsou daleko větší. Mikrostruktury ve vlákně snižují efektivní index lomu a snižují i dráhu paprsku ve vlákně. U vlákna se uvádí počet prstenců kolem jádra. Prstenec je tvořen mikrostrukturami stejně vzdálenými od jádra. Při průchodu světelného paprsku vláknem dochází k vyzařování energie do prostoru mezi mikrostrukturami, proto se neuplatní mechanismus zakázaného pásma. Parametry vlákna jsou uvedeny v Tab. 2.5 [13] [14]

Tab. 2.5: Vlastnosti vlákna se skleněným jádrem

Druh vlákna	Index guiding
Průměr jádra D	16-51 μm
d/Λ normalized hole diameter	0,3; 0,49; 0,68
Vlnová délka	1550nm
Šířka pásma	60 MHz
Disperze (850 nm)	cca 50 ns.km-1
Útlum (při vlnové délce 850 nm)	5-20 dB.km-1
Útlum (při vlnové délce 1300 nm)	5-20 dB.km-1

Nekonečně jednomodové vlákno- Endlessly single mode PCF

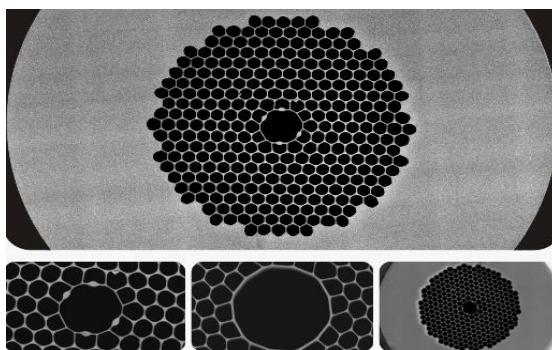
Jedná se o vlákna s nekonečně jednomodovým režimem, kdy pro přenosy využíváme celý rozsah vlnových délek od 800 do 1700 nm. Vlákno je sice jednomodové na všech vlnových délkách, ale mimo výše uvedený rozsah dochází k velkému nárůstu měrného útlumu a to je pro telekomunikační přenosy nevhodné. Jako u vláken klasických může dojít i k tvorbě více vidů, a proto také musí být dodržena normalizovaná frekvence $V < 2,405$.

Normalizovaná frekvence pro PCF vlákna

$$V = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_{eff}^2} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \cdot NA, \quad (-) \quad (2.1.)$$

n_{eff} -efektivní index lomu jádra

Vlákno s dutým jádrem- Hollow-core PCF



Obr. 2.4: Hollow core (zobrazení jádra) [14]

Vlákno s dutým vzduchovým jádrem je tvořeno 7-20 buňkami, kolem jádra jsou umístěny vlastní mikrostruktury, které jsou tvořeny přibližně 19 prstenci. Útlum vláken je poměrně vysoký kvůli špatně zvládnuté technologii výroby. Parametry vlákna jsou uvedeny v Tab. 2.6 [13] [14]

Vlastnosti vlákna

- Odolné proti ohybům
- Cylindrický tvar základního vidu
- Nízká míra odrazů na konci vlákna
- Nulová disperze při vlnových délkách 400-1550 nm (dle požadavků)

Tab. 2.6: Vlastnosti vlákna s dutým jádrem

Druh vlákna	Hollow-core
Průměr jádra D	4,9-20 μm
Λ - rozteč mikrostruktur	1,6-34,9 μm
Vlnová délka	440,555,1550nm
Útlum	5-1000 dB.km ⁻¹
Numerická apertura	0,12-0,20

Polarizované vlákno PCF - Polarization Maintaining PCF

Toto vlákno je zajímavé tím, že polarizační disperze je v celém rozsahu vlnových délek nulová. Tato vlastnost je závislá na rozměru jádra (ty jsou ve vláknech dvě) a mikrostruktur, které vlákno obklopují. Parametry vlákna jsou uvedeny v Tab. 2.7

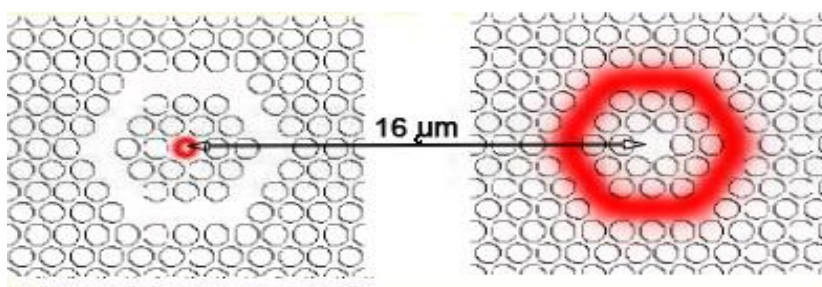
Při výrobě vlákna se používá čistě nedotované křemenné sklo. [13] [14]

Tab. 2.7: Vlastnosti polarizovaného vlákna

Druh vlákna	Polarization Maintaining
Průměr jádra D	4,5 μm
Průměr mikrostruktur d	2,2 μm
Λ - rozteč mikrostruktur	4,4 μm
Útlum	<1 dB.km ⁻¹
Numerická apertura	0,12-0,20

Vlákno s velkou vidovou plochou - Large mode area PCF

Vlákno je tvořeno velmi malými mikrostrukturami Obr. 1.2, které mají velkou rozteč mezi sebou Λ . Jádro vlákna je poměrně velké až 16 μm . Tato vlákna pracují často



Obr. 2.5: Šíření paprsku vláknem pro krátké a dlouhé vlnové délky[13]

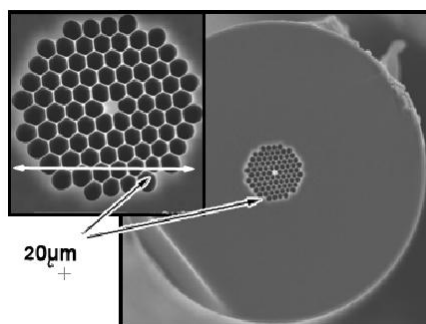
v jednomodovém režimu v rozsahu vlnových délek 750-1700 nm. Mají velmi malé nelineární zkreslení, ale díky malým a vzdáleným mikrostrukturám je vlákno náchylné na ohyby a vyvazování paprsku ven z jádra. Na obrázku je patrné šíření krátkých vlnových délek v jádře dotovaném Ge a na druhé straně je vidět šíření delších vlnových délek v plášťovém defektu. Parametry vlákna jsou uvedeny v Tab. 2.8 [13] [14]

Tab. 2.8: Vlastnosti vlákna s velkou vidovou plochou

Druh vlákna	Large mode area
Rozměry jádra D	16,3 μm
Rozměry pláště	330 μm
Materiál	Oxid křemičitý
Útlum při 780 nm	20 dB.km ⁻¹
Numerická apertura při 780 nm	0,047
Průměr vidu	13 μm

Vysoce nelineární vlákno -Highly nonlinear PCF

Ve vysoce nelineárním vlákně (viz Obr. 2.6) jde pouze o nelineární průběh spektrálních charakteristik. Vlákno se vyznačuje velmi malým průměrem jádra 1,5-5 μm velkými mikrostrukturami $d/\Lambda > 90\%$ a nulovou chromatickou disperzí. Tu lze kontrolovat v rozmezí vlnových délek 670-1700 nm, ale primární pracovní vlnová délka je 850 nm. Protože průběh vidové disperze má parabolický charakter a dostává se do záporných hodnot až $-1800 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Parametry vlákna jsou uvedeny v Tab. 2.9 [13] [14]



Obr. 2.6: Highly nonlinear

Tab. 2.9: Vlastnosti Highly nolinear

Druh vlákna	Highly nonlinear
Rozměry jádra D	1,5-5 μm
Rozměry pláště	220-244 μm
Materiál	Oxid křemičitý
Útlum při 1380 nm	300 $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$
Numerická apertura při 1380 nm	0.3-0,55
d/Λ normalized hole diameter	0,88-0,90

3. Parametry ovlivňující paprsek ve vláknu

3.1 Módy ve vlákne

Mód je specifické rozložení elektromagnetického pole ve vlnovodu viz (Obr. 3.2), které vznikne řešením vlnové rovnice při stanovení určitých matematických předpokladů v řešení. Libovolné pole ve vlnovodu (za předpokladu linearity) lze potom vyjádřit jako lineární kombinaci několik vidů. Tak jako lze součtem harmonických signálů (Fourierova řada) vystihnout libovolný průběh funkce, signálu, tak lze podobně pomocí lineární kombinace módů popsat libovolné pole uvnitř vlnovodu [13]. Více v literatuře [1].

3.1.1 Dělení módů

- Tunelující módy

Jsou módy nesplňující podmínku totálního odrazu na rozhraní n_1 a n_2 . Jedná se o módy nestabilní, které se „přemisťují“ mezi módy vedenými a módy vyzařujícími. U těchto módů dochází k malé ztrátě energie.

- Vyzařující módy

Nesplňují numerickou aperturu a na rozhraní n_1 a n_2 se paprsek láme a „vyzařuje se“ ven z jádra. Dochází ke ztrátě energie.

- Vedené módy

Módy splňující podmínku totálního odrazu, proto je veškerá energie vedená jádrem a nedochází ke ztrátám. Abychom tyto módy vyvázali z jádra, muselo by dojít k velkému ohybu vlákna, ale i tak by došlo jen k vyvázání nejvyšších módů [11].

Vlnové číslo

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi v}{c}, \quad (\text{m}^{-1}) \quad (3.1.)$$

Udává o kolik radiánu se změní fáze šířící se vlny

Konstanta šíření pro vedené módy (osový mód)

$$\beta_{\min} = \frac{2\pi \cdot n_2}{c}, \quad (\text{rad/m}) \quad (3.2.)$$

Konstanta šíření pro vedené módy (mezní mód)

$$\beta_{\max} = \frac{2\pi \cdot n_1}{c}, \quad (\text{rad/m}) \quad (3.3.)$$

Konstanta šíření pro vedené módy

$$\frac{2\pi \cdot n_2}{\lambda} \leq \beta \leq \frac{2\pi \cdot n_1}{\lambda}, \quad (\text{rad/m}) \quad (3.4.)$$

Parametr k_T

$$k_T = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}, \quad (\text{m}^{-1}) \quad (3.5.)$$

Určuje rychlost změn v jádře jako příčná složka vlnového vektoru [1].

Parametr γ

$$\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}, \quad (\text{m}^{-1}) \quad (3.6.)$$

Určuje rychlost změn v plášti jako příčná složka vlnového vektoru.

$$k_T^2 + \gamma^2 = (n_1^2 - n_2^2) k_0^2 = NA^2 \cdot k_0^2, \quad (\text{m}^{-1}) \quad (3.7.)$$

Určuje rychlost změn v jádře jako příčná složka vlnového vektor.

k_0 - vlnové číslo ve vakuu. [1]

3.1.2 Počet módů ve vlákne

Pro zjištění módů ve vlákne vycházíme z normalizované frekvence, která je definována:

Normalizovaná frekvence

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA, \quad (-) \quad (3.8.)$$

a- poloměr jádra

Normalizovaná frekvence zohledňuje vlastnosti vlákna a určuje, zda je vlákno jednomodové nebo vícemodové. Pro jednomodová vlákna je $V \leq 2,405$ a pro vícemodová vlákna $V \geq 2,405$ (Obr. 3.1)

Pro počet vidů ve vlákne SI a GI

$$M_{si} = \frac{4V^2}{\pi^2}, \quad (-) \quad (3.9.)$$

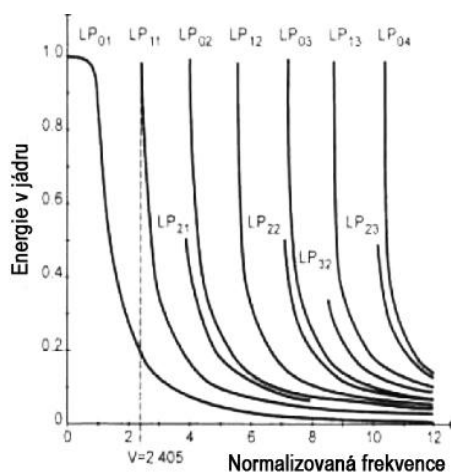
$$M_{Gi} = \frac{V^2}{2}, \quad (-) \quad (3.10.)$$

Mezní vlnová délka λ_c

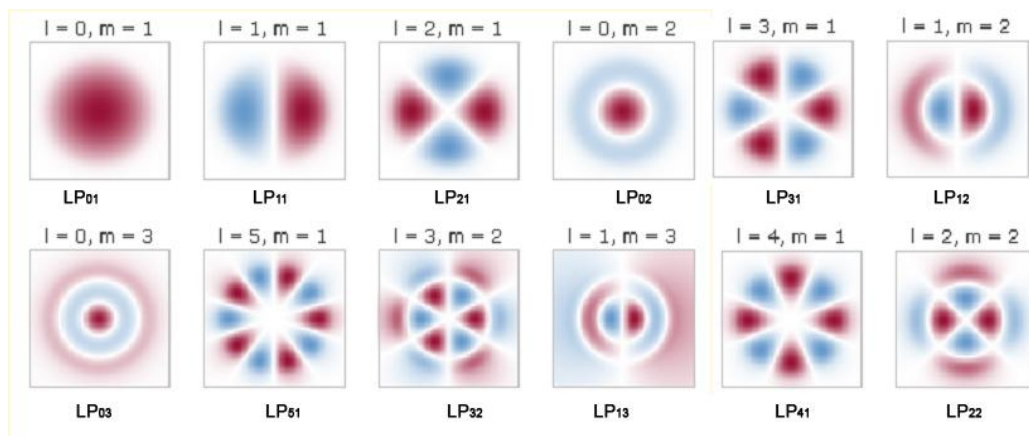
$$\lambda_c = \frac{2\pi}{V} \cdot a \cdot NA, \quad (\text{nm}) \quad (3.11.)$$

Je-li potřeba ovládat počet módů ve vlákne, je při výrobě možné zmenšit jádro nebo změnit index lomu na rozhraní n_1 a n_2 . Máme-li vlákno dodané výrobcem, lze měnit pouze vlnovou délku λ . Podmínkou je, že vlnová délka musí být menší než průměr vlákna. Podle vztahu (4.1) můžeme mezní vlnovou délku λ_c vyjádřit. Mezní vlnová délka udává, kdy je vlákno jednomodové a kdy je vícemodové. Výrobce udává λ_c s jistou rezervou, protože pokud λ_c je velké (pro V malé), tak ve vláknu nastává dvoumodový stav. Narůstá modový šum, který je způsobován přeléváním energie mezi jednomodovým

a dvoumodovým stavem. Pokud je λ_c malé (pro V velké), tak dochází k snadnému vyvázání paprsku z vlákna. Hodnota λ_c bývá 1,8-2,2. Na obrázku (Obr. 3.1) je zobrazeno příčné modové rozložení intenzit modu LP_{01} .



Obr. 3.1: Rozdělení energie ve vláknu pro jednotlivé mody LP



Obr. 3.2: Rozložení intenzit v modu [13]

3.2 Profily indexu lomu pro jednomodová vlákna

Profily indexu lomu nemusí být pouze SI charakteru, ale můžou nabývat různých charakterů (Obr. 3.3). To má za následek změnu vlastností, protože část paprsku prochází pláštěm (tuto vlastnost určuje parametr MFD viz kapitola 7.1) a může dojít k vyvázání paprsku snadněji než u jiných typů vláken, aby k tomu nedocházelo, vyrábí se vlákna s jinými profily.

[2][12]

Nejlepší profil byl odvozen od Gaussova rozložení svazku a to:

Jádro

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{R}{a}\right)^\alpha}, \quad (-) \quad (3.12.)$$

R - celková šířka vlákna

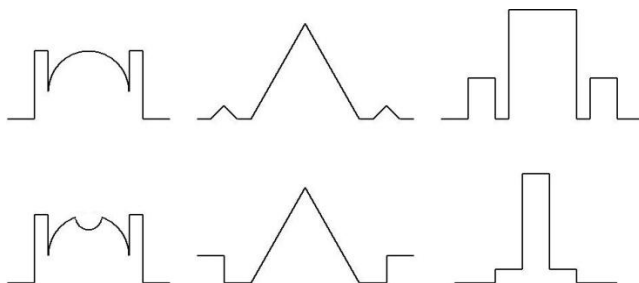
Plášť

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2, \quad (-) \quad (3.13.)$$

3.3 Profil indexu lomu

- DC vlákno s poklesem indexu lomu (depress fading fiber)

Jedná se o vlákno, kdy je index lomu jádra menší než index lomu klasického vlákna. Kolem jádra je vytvořen pokles indexu lomu někdy také označován jako index n_3 (dotace F, B_2O_3). Je riziko, že dojde k zvýšení útlumu vlivem zasahování světla do pláště, ale tento problém vyřeší zvětšení jádra vlákna. Některá konstrukční řešení dovedou kompenzovat chromatickou disperzi svou vidovou disperzí nebo potlačit ohybové ztráty. Jsou i vlákna, která mají komplikovaný profilový index (Obr. 3.3) a mají plochou disperzní charakteristiku.



Obr. 3.3: Různé druhy profilů indexu

3.4 Navázání paprsku do vlákna

Při navazování paprsku do vlákna ze světelného zdroje je požadavkem dopravit paprsek vláknem od vysílače k přijímači s minimálními ztrátami. Při navazování je potřeba zvolit takový úhel, aby došlo na rozhraní dvou prostředí k totálnímu odrazu s minimálním vyzařením do pláště jádra. Tento mezní úhel dopadu paprsku na rozhraní vlákna nazýváme numerická apertura (NA).

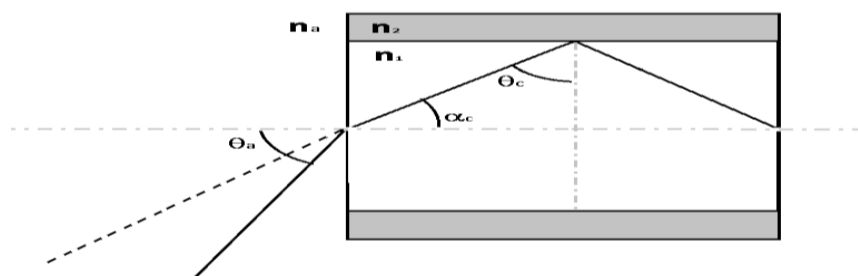
3.4.1 Výpočet mezního úhlu šíření (totální reflexe)

Zvětšujeme-li úhel dopadu, roste i úhel lomu. Při určitém úhlu dojde k šíření těsně podél povrchu rovnoběžně s osou vlákna. Překročením úhlu θ_a nedojde k navázání paprsku do vlákna a veškerý světelný paprsek je ztracen nebo velmi rychle dojde k jeho utlumení. Pokud tento úhel zmenšujeme, nedojde k lomu na rozhraní jádra a pláště (vyzaření), ale veškerý paprsek je odražen zpět do vlákna viz (Obr. 3.4). Pro výpočet mezního úhlu šíření α_c dosadíme hodnoty indexů lomů (n) do vzorce.

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \cos \alpha_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \sin \alpha_c = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}, \quad (3.14.)$$

Výpočet mezního úhlu šíření

$$\alpha_c = \arcsin \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}, \quad (^\circ) \quad (3.15.)$$



Obr. 3.4: Šíření paprsku vláknem

3.4.2 Buzení optického vlákna

Mezní úhel paprsku vstupujícího do vlákna je vyjádřen pomocí Snellova zákona.

$$n_a \sin \theta_a = n_1 \sin \alpha_c, \quad (3.16.)$$

Pokud prostředí, ve kterém se pohybuje paprsek, je vzduch potom $n_a=1$. Po té můžeme vzorec zjednodušit

$$\sin \theta_a = n_1 \sin \alpha_c, \quad (3.17.)$$

3.4.3 Numerická apertura

Výslednou numerickou aperturu je vyjádřena dosazením vzorců (3.14.) a (3.17.).

$$NA = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (-) \quad (3.18.)$$

Relativní změna indexu lomu pro průměr jádra do 8μm

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (-) \quad (3.19.)$$

Relativní změna indexu lomu pro průměr jádra nad 8μm

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}, \quad (-) \quad (3.20.)$$

Počet odrazů ve vláknu

$$K = \left(\frac{L}{d}\right) \operatorname{tg} \alpha_c = \left(\frac{l}{d}\right) \cdot \sqrt{\frac{n_2^2}{n_1^2} - 1} \quad (-) \quad (3.21.)$$

L -délka vlákna

d -průměr vlákna

α_c –vnitřní uhel viz Obr. 3.4

Délka paprsku ve vláknu

$$s = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cdot L \quad (m) \quad (3.22.)$$

3.4.4 Navazovaný výkon

Vlnovod ozářený světelným zdrojem s větším průměrem paprsku než je vlastní velikost jádra, tak část výkonu přicházejícího od zdroje z prostorového úhlu $d\Omega$ bude dopadat na plochu dS , která je dána plochou vlnovodu.[10]

Navázaný výkon

$$dP = N(S, \Omega) dS d\Omega, \quad (-) \quad (3.23.)$$

$N(S, \Omega)$ -směrová distribuce zářivého toku[4]

Zářivý tok

$$dN = \int I dS, \quad (W) \quad (3.24.)$$

I -Intenzita pole

Izotropní navázaný výkon do dS

$$P_s = \int_0^{\theta(r)} N dS d\Omega = N \cdot dS \cdot \pi \sin^2 \theta(r), \quad (W) \quad (3.25.)$$

Výkon navázaný do plochy $S=\pi r^2$

$$P_s = \int_0^a \int_0^{\theta(r)} N d\Omega \pi r dr = \frac{1}{2} \pi^2 N \int_0^{a^2} \sin^2(\theta(r^2)) d(r^2), \quad (W) \quad (3.26.)$$

Pokud integrujeme běžní profily indexu lomu pro vlákna SI a GI dostaneme

Navazující výkon pro SI a GI

$$P_{SI} = N\pi a^2 \pi NA^2, \quad (W) \quad (3.27.)$$

$$P_{GI} = N\pi a^2 \frac{\pi NA^2}{2}, \quad (W) \quad (3.28.)$$

Z vyjádření k příslušným vláknům plyne, že za dodržení vazebních podmínek je navazující výkon do GI poloviční. Pokud je použit pro navázání paprsku zdroj s úzce směřovaným paprskem například LD (Laser Diode) na místo diody LED (Light Emitting Diode), která má velkou plochu vyzařování, nastane u GI znatelných zlepšení.

Pro vysoké přenosové rychlosti jsou vhodná vlákna s relativním indexem lomu $\Delta < 0,01$ a malou vidovou disperzí. Nejvíce je tato situace viditelná u vláken jednomodových, kde se vlnová délka blíží k průměru vlákna a jednou z podmínek dosažení širokého přenosového pásma je i malý relativní index Δ , ale na druhou stranu se vlákno stává náchylnější na vyvazování paprsku. To lze odstranit použitím DC depress fading fiber viz kapitola (3.2). Více v literatuře[10].

3.5 Účinnost navázání paprsku ze zdroje do vlákna

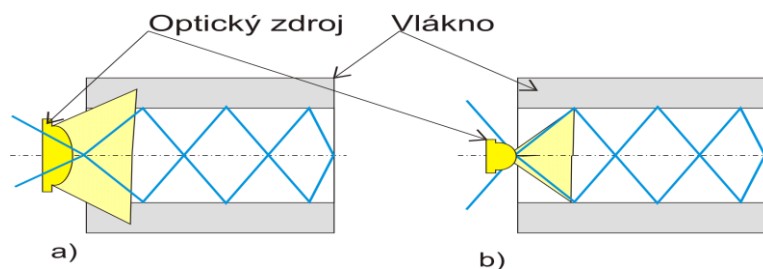
Osvětlováním čela vlákna světelným paprskem o poloměru r_s , numerické apertury NA_s dochází k vstupování paprsku do vlákna. Paprsek lze rozdělit na dvě části. Na paprsek vstupující do vlákna a na paprsek „oříznutý“ nepodílející se na šíření ve vlákně. Tedy dochází ke ztrátě světelného výkonu. Proto je zavedena účinnost navázání paprsku.

3.5.1 Účinnost navázání paprsku do vlákna

$$\eta = \left(\frac{NA_f}{NA_s}\right)^2 \cdot \left(\frac{a'}{r_s}\right)^2 \cdot t \cdot \begin{cases} \text{pro } r_s > a \text{ je } \left(\frac{a'}{r_s}\right)^2 < 1 \\ \text{pro } r_s < a \text{ je } \left(\frac{a'}{r_s}\right)^2 = 1 \end{cases}, \quad (-) \quad (3.29.)$$

NA_f – Numerická apertura vlákna, NA_s – Numerická apertura zdroje, a' – Poloměr jádra vlákna, r_s – Poloměr emisní plochy zdroje, t – koeficient ztrát $t=0.95$

Funkce $\left(\frac{a'}{r_s}\right)^2 = 1$ pokud emisní plocha zdroje je menší než plocha vlákna – teoreticky do vlákna vstupuje 100% vyzařovaného paprsku. Viz (Obr. 3.5)



Obr. 3.5: Účinnost navázání optického paprsku a) $\eta < 1$ b) $\eta = 1$

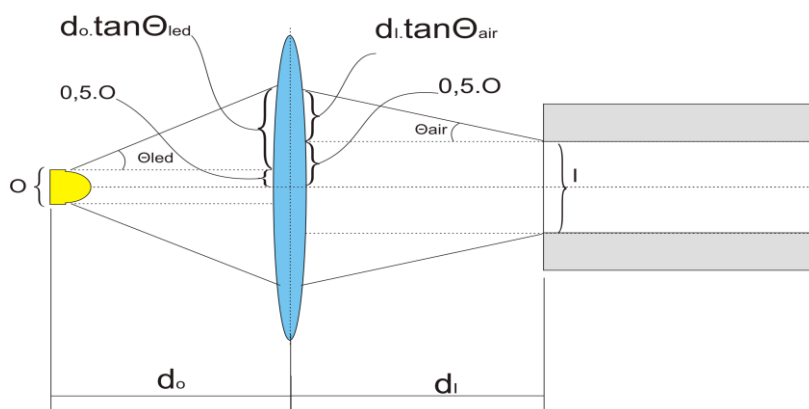
3.6 Způsoby navazování paprsku

Při navazování paprsku je snahou celý vyzářený výkon přenést do vlákna. Pro jednotlivé zdroje se využívá různých způsobů, proto lze navazování rozdělit do několika skupin:

- Navazování LED
- Navazování Laseru
- Navazování vlákno – vlákno
- Konektorové navazování

3.6.1 Navazování LED

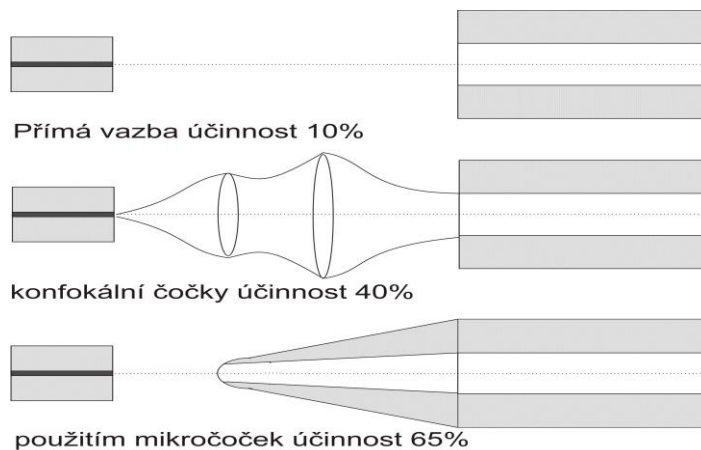
Navazování paprsku do vlákna nejčastěji probíhá přes čočku (Obr. 3.6), která usměrní paprsek tak, aby byla dodržena numerická apertura a energie vstupující do vlákna byla co největší. Existují i varianty, kdy je čočka přímo součástí LED-diody a vlákno se spojuje přímo s ní.



Obr. 3.6: Navazování paprsku z LED zdroje do vlákna

3.6.2 Navazování Laseru

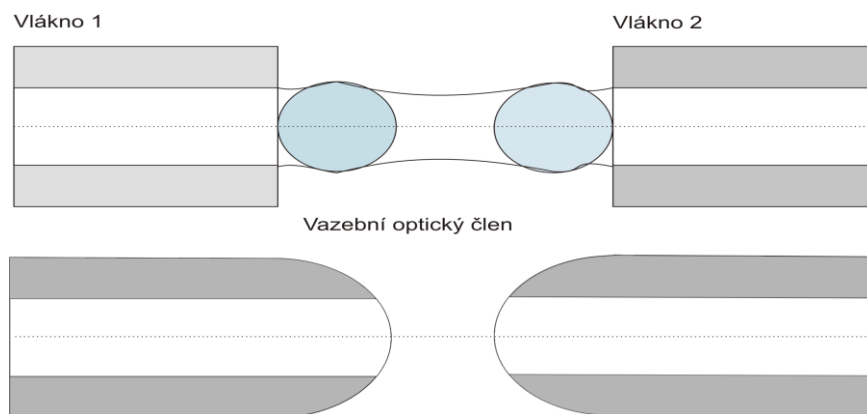
U navazování laseru může být paprsek navázán přímo (toto řešení má nejmenší účinnost cca 10%) nebo pomocí mikročoček (podobné jako u navazování LED dosahujeme účinnosti cca 40%) nebo konfokálního systému čoček (speciálně upravené vlákno účinnost je cca 65%). Viz (Obr. 3.7)



Obr. 3.7: Navazování Laserového paprsku do vlákna

3.6.3 Navazování vlákno-vlákno

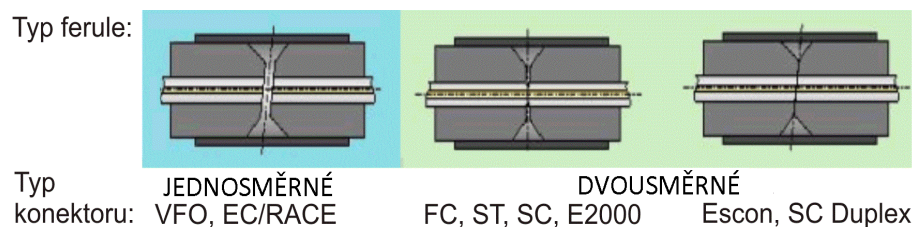
Některé optické zdroje jsou realizovány tak, že již od výrobce disponují vlastním zdrojem s připojeným vláknem a není nutností řešit problematiku navazování, ale spíše problematiku mechanického spojování vláken viz (Obr. 3.8). Více v literatuře [2] [6].



Obr. 3.8: Navazování vlákno-vlákno

3.6.4 Konektorové navazování

Existují konektory přímého navázání paprsku z jednoho vlákna (zdroje) do druhého. Konektory podléhají různým tvarům ferule. Ferule je nejpřesnější část konektoru, může být keramická, plastová nebo metalická. Různými druhy zabroušení konce ferule můžeme ovlivnit účinnost přenosu paprsku z jednoho konektoru do druhého. viz (Obr. 3.9)



Obr. 3.9: Různé typy ferulí a značení nejpoužívanějších konektorů

4. Zdroje optického záření

Optické zdroje jsou nedílnou součástí optického přenosu a existuje několik druhů zdrojů optického záření. Tyto zdroje se odlišují rozdílnými vlastnostmi jako např. spektrální šířka, prostorová vyzařovací charakteristika nebo druh vyzařovaného světla. Více optických zdrojů v literatuře [17].

4.1 LED zdroje

LED zdroje byly první používané zdroje pro přenos informace po optickém vlákně, ale protože se vyznačují velkou šířkou spektrálního pásma, nehodí se na rychle datové přenosy. LED zdroje je možné rozdělit do dvou skupin podle tvaru vyzařovací charakteristiky. Spektrální šířka na vlnové délce $\lambda = 850$ nm je 50-60 nm a na vlnové délce $\lambda = 1300$ nm je 120-180 nm. Jsou použitelné pro šířku pásma okolo 100-200 MHz.

4.1.1 Povrchově emitující LED (SLED)

SLED – mají symetrickou stopu a polovina výkonu se nachází ve vrcholovém úhlu 120° . Používají se pro vlákna MM a vlnové délky 850 nm a 1300 nm. V Tab. 4.1 jsou vypsané základní parametry zdroje od firmy Safibra s.r.o. [18].

Tab. 4.1: Základní parametry zdroje optického záření OFLS-B-48-10C

SLED zdroj	
Vlnová délka λ	1460-1550nm $\pm 0,5$ nm
Spektrální pološířka $\Delta\lambda$	< 0,5 nm
Výstupní úroveň	0 dBm (1 mW)
Zvlnění spektra	0.2 dB
Šířka pásma	60 nm

4.1.2 Hranově emitující LED (ELED)

ELED – mají asymetrickou stopu a používají se k buzení SM vláken a pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm.

4.2 LASERové zdroje

Laserové zdroje se vyznačují velmi úzkou vyzařovací charakteristikou, velkou intenzitou paprsku. Laserové záření je koherentní světlo, to znamená, že se nešíří chaoticky, ale má přesně definovaný směr šíření. Tyto přednosti jim umožňují použití ve vysokorychlostních systémech. Také jsou vhodné pro navazování do SM vláken, které vyžadují malou NA. Viz (Obr. 4.1)

4.2.1 FP- lasery

Pracuje na principu Fabry-Perot rezonátoru. V rezonátoru vznikají mezi odraznými plochami stojaté vlny, které jsou vyzařovány z aktivní oblasti ven. FP-lasery mohou pracovat v jednomodovém i vícemodovém režimu.

Tab. 4.2: Základní parametry zdroje optického záření OFLS-5[18]

LP-LD	
Vlnová délka λ	1310/1550nm $\pm 0,5$ nm
Spektrální šířka	≤ 10 nm
Výstupní úroveň	-7 dBm (300 μ W)
Teplotní závislost	0.1 nm/°C

4.2.2 DFB lasery - hranově vyzařující lasery

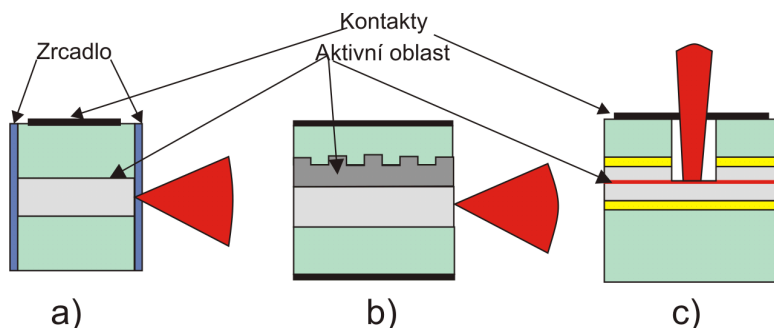
U DFB laserů (Distributed FeedBack) je těsně u aktivní vrstvy naleptána difrakční mřížka. Tato mřížka slouží, jako optický rezonátor, to znamená, že není potřeba použití odrazných plošek. Difrakční mřížka plní funkci optického filtru. Vlnová délka je určena mřížkovou konstantou. Jejich paprsková rozbíhavost je cca 30°.

Tab. 4.3: Základní parametry zdroje optického záření OFLS-5[18]

DFB laser	
Vlnová délka λ	1550nm $\pm 0,5$ nm
Spektrální pološířka $\Delta\lambda$	< 0,5 nm
Výstupní úroveň	-3 dBm (501 μ W)
Teplotní závislost	0.1 nm/°C

4.2.3 VCSEL lasery - plošně vyzařující lasery

Odlišnost těchto LD zdrojů od ostatních je ve způsobu vyzařování paprsku rovnoběžně s aktivní vrstvou. Ta to speciální konstrukce má za následek snížení rozbíhavosti paprsku a to cca na 10°. Celková účinnost se pohybuje okolo 80%.



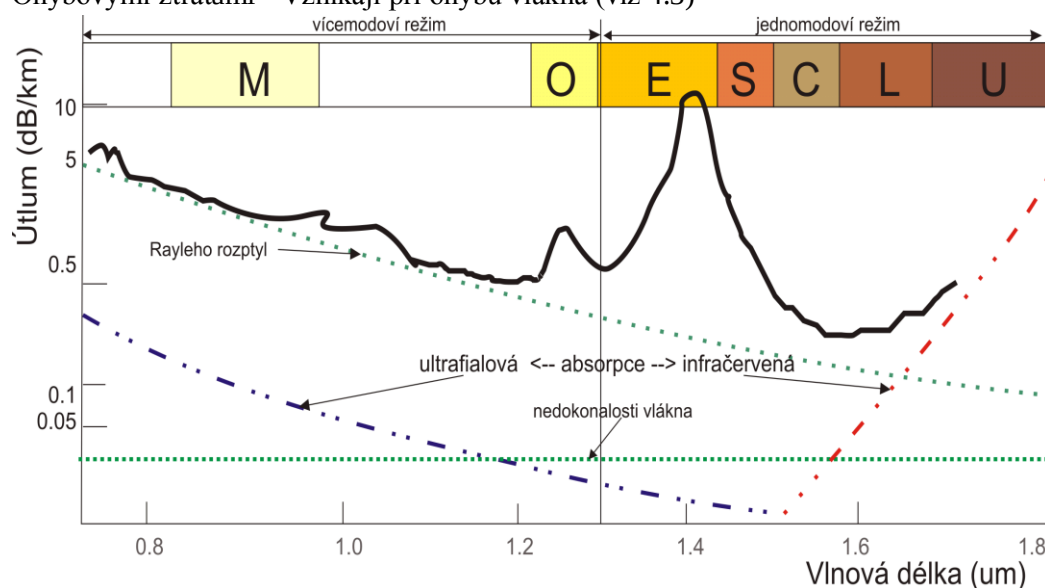
Obr. 4.1: Princip vyzařování a)FB-laser, b) DFB laser, c) VCSEL laser

5. Útlum optických vláken

Útlum optických vláken je jeden z hlavních vlivů, které ovlivňují procházející paprsek. Největší podíl na celkový útlum má Rayleighův rozptyl. Viz (Obr. 5.1). Tabulka (Tab. 5.1) popisuje nejpoužívanější vlnové délky.

Útlum optických vláken je způsoben nejčastěji:

- Absorpcí prostředí - Jedná se o absorpci vlastním materiálem SiO_2 . Dělíme je na vlastní a příměsovou. (viz 5.1)
- Vyzařováním vlákna - Vznikají při špatném navázání paprsku do vlákna (viz 3.4)
- Nehomogenitou a rozptylem - Jsou způsobovány nedokonalou výrobou vlákna (viz 5.2)
- Ohybovými ztrátami - Vznikají při ohybu vlákna (viz 4.3)



Obr. 5.1: Útlum na optických vláknech [13]

Tab. 5.1: Jednotlivá vlnová okna

Nové značení			použití	Staré značení	
Pásmo	Název	Rozsah [nm]		Okno	Rozsah [nm]
M		850-950	MM-F krátké vzdálenosti	1	850-950
O	Original	1260 – 1360	u SM větší vzdálenosti, větší útlum, menší cit. Na ohyb, 5-okno eliminace OH	2	1280-1335
E	Extended	1360 – 1460		5	1335-1530
S	Short	1460 – 1530	SM dlouhé vzdálenosti, minimum útlumu		
C	Conventional	1530 – 1565		3	1530-1565
L	Long	1565 – 1625	absolutní minimum útlumu, velká přenosová rychlost	4	1565-1625
U	Ultra	>1625			

Ztráty optického vlákna

$$A = \frac{P_{out} (W)}{P_{in} (W)}, \quad (-) \quad (5.1.)$$

Útlum optického vlákna

$$A = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}}, \quad (dB) \quad (5.2.)$$

Měrný útlum

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_{in}}{P_{out}}, \quad (dB.km^{-1}) \quad (5.3.)$$

Určení výkonu na konci vlákna

$$P_{out} = P_{in} 10^{\frac{-\alpha \cdot L}{10}} = P_{in} 10^{\frac{-A (dB)}{10}}, \quad (W) \quad (5.4.)$$

Maximální vzdálenost bez použití opakovačů

$$L = \frac{10}{\alpha} \cdot 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}}, \quad (m) \quad (5.5.)$$

P_{out} – výstupní výkon

P_{in} – vstupní výkon

α – útlum vztažený k jednotce délky

L – délka vlákna [11]

5.1 Ztráty absorpcí

- Vlastní absorpce

Absorpce vlastní řadíme do skupiny v ultrafialové a infračervené oblasti a absorpce vlastním materiálem SiO_2 . Ve skleněném prostředí jsou ztráty malé. Tyto ztráty v oblastech ultrafialových a infračervených je způsobena absorpcí valečných elektronů. Tyto ztráty jsou neodstranitelné. Ale lze jimi manipulovat.

- Příměsová absorpce

Základní materiál obsahuje nečistoty, jako jsou ionty kovů Fe, Cu, Cr. Tyto ionty kmitají při určitých kmitočtech svojí vlastní rezonancí a způsobují tepelné ztráty ve vlákne. Rezonanční kmitočet iontů OH (největší podíl ztrát) odpovídá vlnové délce $2,8\mu m$ a $4,2\mu m$, toto pásmo nevyužíváme při přenosech optickým vláknem. Další harmonické (první $1,38\mu m$, druhá $0,94\mu m$ a třetí $0,72\mu m$) patří do využívaného pásma. Ionty OH vytvářejí mikrotrhliny, díky kterým jsou vlákna křehká. Zajištěním nízké koncentrace OH a iontů kovů dosáhneme i nízkého měrného útlumu. V tabulce (Tab. 5.2) je přehled nejčastěji vyskytujících se Iontů [3].

Tab. 5.2: Ionty působící ztráty ve vlákně na dané vlnové délce

Ionty	Cu ²⁺	Fe ²⁺	Fe ³⁺	C ²⁺	Ni ³⁺
Vlnová délka (nm)	850	1100	400	685	460
Útlum (dB.Km-1)	1.1	0.68	0.15	1.1	0.2

5.2 Ztráty rozptylem

Při výrobě vlákna dochází díky technologicky nedokonalým postupům k tvorbě mikronehomogenit uvnitř vlákna, které mění index lomu materiálu v daném místě. Dochází k Rayleighovu, Mieůvu rozptylu a rozptylu na nečistotách.

Rayleigho rozptyl

Vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky. Nelze je odstranit, protože světlo prochází kolem jednotlivých atomů a ohýbá se a dochází k rozptylu. Omezení Rayleigho rozptylu docílíme posunutím pracovní frekvence k oblasti infračerveného světla.[11]

Rayleigho rozptyl

$$\gamma_R = \frac{8\pi^2}{(3\lambda^4)} n^8 p^2 \beta_c T_F K, \quad (\text{m}^{-1}) \quad (5.6.)$$

p - fotoelastický koeficient (0,286)
 β_c - isothermální stlačitelnost ($7 \times 10^{-11} \text{m}^2 \text{N}^{-1}$)
 K - Boltzmannova konstanta
 T_F - fiktivní teplota 1400K u SiO_2

Přídavný Rayleigho rozptyl

$$A_R = e^{-\gamma_R \cdot L}, \quad (-) \quad (5.7.)$$

L - délka vlákna

Celkový vložný útlum

$$\alpha_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{A_R} \right), \quad (\text{dB/km}) \quad (5.8.)$$

Rozptyl na nečistotách

Vzniká na nehomogenitách s většími, než je vlnová délka procházejícího paprsku, kdy dochází k srážkám paprsku s nečistotami, které se v jádru vyskytují. Technologickými postupy jsme ji schopni odstranit.

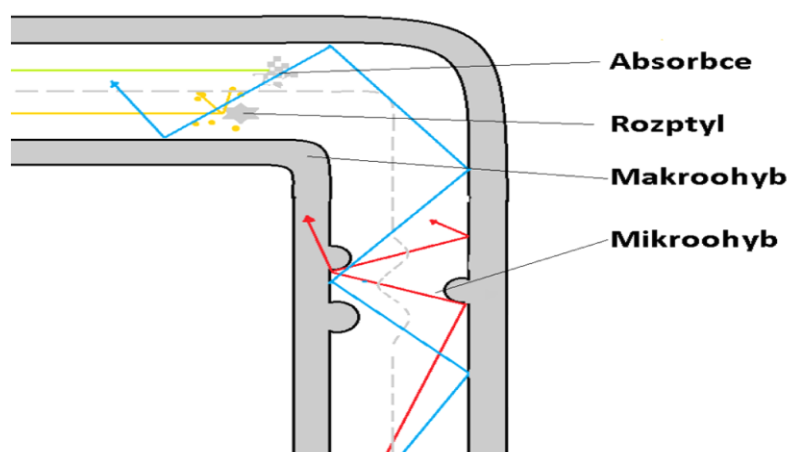
Mieův rozptyl

Vzniká na nehomogenitách se stejnou vlnou délkou. Příčiny tohoto rozptylu jsou způsobeny:

- Mikroskopickými bublinkami např. OH
- Nedokonalou geometrií
- Změnou rozměrů a tvarů vlákna, nedokonalou cylindrickou strukturou
- Mikroohyby
- Poruchami přímocárosti
- Trhlinkami v jádře

5.3 Ohybové ztráty

Ohybové ztráty (Obr. 5.2) jsou způsobené porušením podmínky totálního odrazu, kdy dojde ke změně úhlu šíření paprsku ve vlákně a ten se lomí do pláště. Také při ohybu dojde ke změně indexu lomu a to změnou tlakových poměrů na vnitřní a vnější straně ohybu.[11] Pro 100% ztrátu paprsku v ohybu se definuje kritický poloměr (5.11.), tento poloměr je u vláken mnohomodových $R_c \approx 10^9 \mu\text{m}$. Tohoto zakřivení nelze v praxi dosáhnout, dříve dojde k přelomu vlákna, u vláken jednomodových bývá $R_{cs} \approx 10 \text{ mm}$ tento ohyb je reálný a při návrhu optické trasy ho musíme zohlednit [11] .



Obr. 5.2: Ztráty ve vlákně ohyb-(makroohyb, mikroohyb), rozptyl, absorpce

Odstranění ohybových ztrát

- Velké poloměry zakřivení
- Zkrácení vlnové délky λ -problém s Rayleighovým rozptylem

Výhody ohybových ztrát

- Využití v modových filtrech (odstranění tunelujících modů)

Rozlišujeme dva druhy ohybů

- Mikroohyb - Ohyb je menší než poloměr vlákna
Při vyšší vlnové délce rostou ztráty způsobené mikroohyby. Tyto ztráty se velice těžko určují a je jednodušší jejich experimentální určení.
- Makroohyb – Ohyb je větší než poloměr vlákna

MAC (míra citlivosti na ohyb) pro jednomodová vlákna

$$MAC = \frac{MFD}{\lambda_c}, \quad (-) \quad (5.9.)$$

λ_c - mezní vlnová délka

více v kapitole (7.1)

koeficient ohybových ztrát [11]

$$\alpha_r = C_1(R) \cdot e^{-C_2 R} \quad (-) \quad (5.10.)$$

$C_{1,2}$ - délka ohybu vlákna

R - poloměr zakřivení

Kritický poloměr (MM vlákna)

$$R_c \cong \frac{3 \cdot n_1^2 \cdot \lambda}{4\pi((n_1^2 - n_2^2)^{\frac{3}{2}})^{\frac{1}{2}}}, \quad (m) \quad (5.11.)$$

Kritický poloměr (SM vlákna)

$$R_{cs} \cong \frac{20 \cdot \lambda}{(n_1 - n_2)^{\frac{3}{2}}} \cdot (2,748 - 0,996 \frac{\lambda}{\lambda_c})^{-3}, \quad (m) \quad (5.12.)$$

6. Disperzní ztráty

Disperzní jevy nezpůsobují ztráty energie, ale pouze energii rozprostírají v čase a mění její geometrii. Disperze je také závislá na druhu vlákna, protože například u jednomodového vlákna rozeznáváme pouze chromatickou disperzi.

Disperzní jevy dělíme do několika skupin [6][13].

6.1 Materiálová disperze

Materiálová disperze je tvořena vlastnostmi použitého materiálu. Je jednoznačně dána už při výrobě vlákna a lze jen těžko ovlivnit, ale vhodně zvoleným materiálem jsme schopni tyto vlastnosti přizpůsobit našim potřebám [1][5].

Fázová rychlost

$$v_f = \frac{c_0}{n}, \quad (\text{km/s}) \quad (6.1.)$$

Světelný paprsek se šíří ve vlákne vždy nižší rychlostí, než je rychlost světla.

Skupinový index lomu

$$n_s = \frac{dk}{dk_0} = \frac{d(nk_0)}{dk_0} = n + k_0 \frac{dn}{dk_0} = n + f \frac{dn}{f} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}, \quad (-) \quad (6.2.)$$

Skupinové zpoždění

$$t_s = \frac{L}{v_s} = \frac{n_s}{c_0} = \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \frac{L}{c_0}, \quad (\text{s}) \quad (6.3.)$$

Skupinový index lomu

$$n_s = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}, \quad (-) \quad (6.4.)$$

Skupinová rychlost

$$v_{G(s)} = \frac{c}{n_s}, \quad (\text{km/s}) \quad (6.5.)$$

Koeficient materiálové disperze[4]

$$D_m = \frac{\lambda}{c} \left| \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right|, \quad (\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (6.6.)$$

RMS rozšíření pulsu

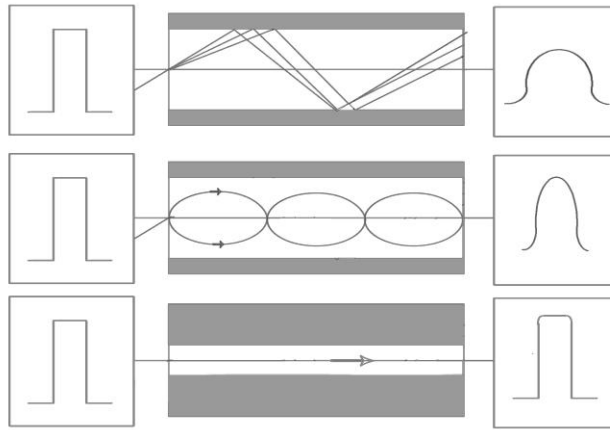
$$\Delta\sigma_m = \sigma_\lambda L D_m, \quad (\text{ps}) \quad (6.7.)$$

σ_λ - střední kvadratická odchylka šířky spektra zdroje rms

6.2 Vidová disperze

K vidové disperzi dochází při průběhu paprsku vícemodovým vláknem, kdy na jeho konci dojde zmenšení amplitudy a rozšíření v čase, ale nedojde ke ztrátě energii.

Vstoupí-li do vlákna série pravoúhlých impulzů, tak vlivem vidové disperze je výstupem série rozšířených impulzů (Obr. 6.1)[6]. Každý vid se šíří jinou rychlostí, tak uvažujeme dva mezní stavy a to osový paprsek a nejzkosenější paprsek. Pokud je vidová disperze nežádoucí, tak vícemodové (MM) vlákno je nahrazeno vláknem gradientním (GI) nebo vláknem jednodovým [11].



Obr. 6.1: Vidová disperze (MM-gradientní MM-stepindex, SM jednodové)

Paprsek osový-

$$t_{min} = \frac{L}{v} = \frac{n_1 L}{c}, \quad (s) \quad (6.8.)$$

Vycházíme z $v = \frac{c}{n_1}$ (fázová rychlost)

Paprsek nejzkosenější

$$t_{max} = \frac{n_1 L}{c \cdot \cos \alpha} = \frac{n_1 L}{c \cdot \sin \theta_c} = \frac{n_1^2 L}{c \cdot n_2}, \quad (s) \quad (6.9.)$$

Dosadíme $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$ viz (3.14.)

Rozdíl časů příchodu

$$\Delta t_{roz} = t_{max} - t_{min} = \frac{n_1^2 L}{c \cdot n_2} - \frac{n_1 L}{c} = \frac{n_1 L}{c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) = \frac{n_1 L}{c} \Delta, \quad (s) \quad (6.10.)$$

Δ - relativní změna indexu (3.19.)

L - délka vlákna

Jednodušší výpočet pro GI (gradientní) a SI (se skokovou změnou) vlákna

$$\Delta t_{SI} = \frac{L \cdot NA^2}{2 \cdot n_1 \cdot c} , \quad (s) \quad (6.11.)$$

$$\Delta t_{GI} = \frac{L \cdot NA^4}{32 \cdot n_1^3 \cdot c} , \quad (s) \quad (6.12.)$$

Protože GI vlákna mají lepší vlastnosti, tak existuje vztah mezi SI a GI vláknem

$$\Delta t_{GI} = \Delta t_{SI} \frac{\Delta}{8} , \quad (s) \quad (6.13.)$$

RMS rozšíření pulsu SI a GI

$$\sigma_{SI} \cong \frac{Ln_1 \Delta}{4\sqrt{3}c} \cong \frac{L \cdot NA^2}{4\sqrt{3}n_1 c} , \quad (s) \quad (6.14.)$$

$$\sigma_{GI} \cong \frac{L \cdot n_1 \cdot \Delta^2}{20\sqrt{3} \cdot c} \cong \frac{L \cdot NA^4}{5120\sqrt{3}n_1^3 c} , \quad (s) \quad (6.15.)$$

Maximální šířka pásma z literatury [12]

$$B_t (\text{max}) \cong \frac{0.2}{\sigma} \cong \frac{1}{2\tau} , \quad (\text{Hz}) \quad (6.16.)$$

σ - rozšíření impulsu $\sigma = 0,425\tau$

L – délka vlákna

Maximální přenosová rychlost t z literatury [11]

$$B_t (\text{max}) \cong \frac{1}{4\Delta t} , \quad (\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (6.17.)$$

Maximální šířka pásma pro vlákno SI

$$B_{si} \leq \frac{c \cdot n_1}{2 \cdot L \cdot NA^2} , \quad (\text{Hz}) \quad (6.18.)$$

Maximální šířka pásma pro vlákno GI

$$B_{si} \leq \frac{8 \cdot c \cdot n_1^3}{L \cdot NA^4} , \quad (\text{Hz}) \quad (6.19.)$$

Součinitel šířky pásma

$$B \times L = B \cdot L . \quad (\text{Hz} \cdot \text{Km}) \quad (6.20.)$$

Součinitel šířky pásma udává šířku pásma vztaženou na 1 km délky kabelu - vlákna v MHz.km. Z toho vyplývá, že se zvětšující se délkou kabelu se šířka pásma zmenšuje. Údaj $B \times L = 100 \text{ MHz.km}$ znamená, že při délce optické trasy 10 km je možno uvažovat s šířkou pásma jen 1 MHz.

6.3 Polarizační vidová disperze

Optické vlákno obsahuje dvě polarizované roviny viz (Obr. 6.2), hlavní a vedlejší. Vlákna mají deterministický charakter a polarizační vlastnosti jsou náhodné. Polarizační disperze je závislá na čase, vlnové délce, ohybech a deformaci vlákna. Tato disperze je malá a v porovnání k jiným disperzím zanedbatelná. Vidová polarizační disperze se projevuje až u vysokých přenosových rychlostí, kdy se musí pracovat s délkou λ blízké pracovní frekvenci vlákna λ_0 (nm). [11]Koeficient vidové polarizované disperze PMD je definován pro krátké vzdálenosti (do 10 km) a pro dlouhé vzdálenosti (nad 10 km). Mezní hodnoty podle ITU pro Δt (neboli DGD - Differential Group Delay) jsou pro STM-4 (622 Mbps) 480 ps, STM-16 (2,5 Gbps) 120 ps, STM-64 (10 Gbps) 30 ps a STM-256 (40 Gbps) 7,5 ps.

Dlouhé vzdálenosti

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}}, \quad (\text{ps}/\sqrt{\text{km}}) \quad (6.21.)$$

Krátké vzdálenosti

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{L}, \quad (\text{ps}/\text{km}) \quad (6.22.)$$

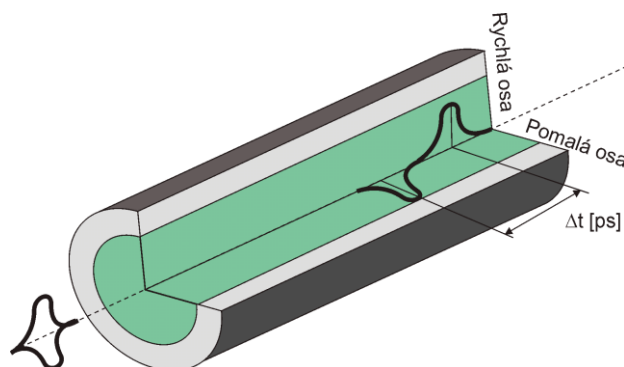
Maximální vzdálenost

$$L_{max} = \frac{10^4}{(B \cdot PMD)^2}, \quad (\text{km, Gb/s, ps}/\sqrt{\text{km}})) \quad (6.23.)$$

V Tab. 6.1 jsou uvedeny mezní délky pro různé přenosové rychlosti a různé velikosti PMD (jedná se o ideální vlákno, na které působí pouze PMD.)

Tab. 6.1: Tabulka maximálních délek a mezí Δt (DGD)

Přenosová rychlost		PMD 0.5 (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	PMD 0.125 (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)	Meze hod.
622Mb/s	Délka L	2875915 km	1695400 km	480 ps
2.5 Gb/s		6400 km	102400 km	120 ps
10 Gb/s		400 km	6400 km	30 ps
40 Gb/s		100 km	1600 km	7,5 ps

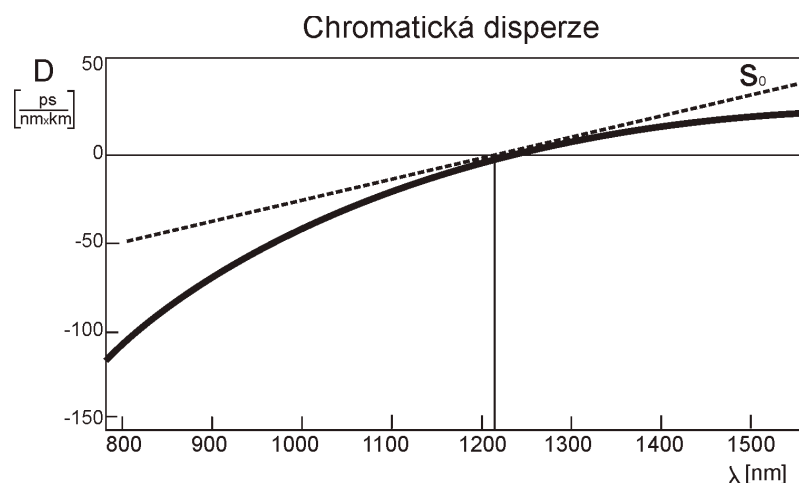


Obr. 6.2: Polarizační disperze, Δt (DGD)- rozdíl mezi pomalou a rychlou osou

6.4 Chromatická disperze (CD)

Chromatická disperze je převážně problémem jednomodových vláken, protože u vláken vícemodových se dříve projeví vidová disperze. Disperze je způsobena kmitočtovou závislostí indexu lomu. Každá spektrální složka se v optickém vlákne lomí jinak, a tudíž mají rozdílnou trajektorii. Pokud si uvědomíme, že zvětšením úhlu α_c dojde k prodloužení trajektorie vlákna a tento úhel je pro každou vlnovou délku λ rozdílný [11].

Chromatická disperze omezuje šířku kmitočtového pásma, může být kladná i záporná, této vlastnosti se využívá při její kompenzaci, kdy se původní vlákno připojí na vlákno se zápornou disperzí (asi 1/6 skutečné délky). Metod kompenzace je více, třeba HOM vlákna (HIGHT Order Mode fiber) nebo využití Braggovského mřížky.(více v literatuře [2]).



Obr. 6.3: Zobrazení sklonu disperzní charakteristiky v místě nulové disperze S_0

Koeficient chromatické disperze

$$D(\lambda) = \frac{d t_g(\lambda)}{d}, \quad (\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (6.24.)$$

Udává změnu skupinového zpoždění signálu t_g a hodnota $D(\lambda)$ udává rozšíření Gaussova impulsu.

Koeficient chromatické disperze pro konvenční vlákna ITU-T G.625

$$D(\lambda) = \left(\frac{S_0}{4}\right) \cdot \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3}\right), \quad (\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (6.25.)$$

Koeficient chromatické disperze pro disperzně posunuté vlákno ITU-T G.653

$$D(\lambda) = S_0 \cdot (\lambda - \lambda_0), \quad (\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}) \quad (6.26.)$$

S_0 -sklon disperzní charakteristiky v bodě nulové chromatické disperze viz (Obr. 6.3)
 $\lambda_0(\text{nm})$ -vlnová délka při nulové Chromatické disperzi (pracovní vlnová délka vlákna)
Hodnoty S_0, λ_0 jsou udávány výrobcí.

Koeficient chromatické disperze pro vlákno s nenulovou chrom. disperzí ITU-T G.655

- Pro vlnové délky λ 1460-1550

$$D_{max}(\lambda) = \left(\frac{2,91}{90}\right) \cdot (\lambda - 1460) + 3,29, \quad (\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}) \quad (6.27.)$$

$$D_{min}(\lambda) = \left(\frac{7,00}{90}\right) \cdot (\lambda - 1460) - 4,20, \quad (\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}) \quad (6.28.)$$

- Pro vlnové délky λ 1460-1550

$$D_{max}(\lambda) = \left(\frac{5,06}{75}\right) \cdot (\lambda - 1550) + 6,20, \quad (\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}) \quad (6.29.)$$

$$D_{min}(\lambda) = \left(\frac{2,97}{75}\right) \cdot (\lambda - 1550) + 2,80. \quad (\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}) \quad (6.30.)$$

Rozšíření Gaussova impulsu při průchodu vláknem

$$\Delta t_{Chrom} = \Delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L, \quad (\text{ps}) \quad (6.31.)$$

$\Delta\lambda$ (nm)-spektrální pološířka L (km)-délka vlákna

Maximální délka $\Delta\lambda$ zdroje $\gg B$

$$L \approx \frac{1000k}{B \cdot D \cdot \Delta\lambda}, \quad (\text{km}) \quad (6.32.)$$

k - konstanta vyjadřující odolnost na rozšíření impulsu (např. $k=0.5$ znamená odolnost na roztažení o 0,5 bitového intervalu)

B - přenosová rychlost systému (Gbit/s), $\Delta\lambda$ je u LED-diody (x10nm) a Fabry-Perotova laseru (x nm).

Maximální délka $\Delta\lambda \approx B$

$$L \approx \frac{X}{B^2 \cdot D}, \quad (\text{km}) \quad (6.33.)$$

X - konstanta vyjadřující odolnost rozšíření impulsu.

(obsahuje přepočet Gbit/s na nm)

Maximální šířka pásma pro vlákno SM vlákna

$$B_{sm} = \frac{1}{4 \cdot \Delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L}, \quad (\text{Hz}) \quad (6.34.)$$

7. Rozložení světla ve vlákne (Gaussův svazek)

Rozložení světla ve vlákne od zdrojů LED nebo LD lze popsat vztahem pro aproximaci Gaussova svazku [6].

Gaussova křivka

$$I(r) = I(0)e^{-\frac{2r^2}{w_0^2}}, \quad (7.1.)$$

r - udává poloměr jádra

w_0 - vzdálenost od osy vlákna a pomocí ní definujeme MFD, které je rovno $2 w_0$

a je to vzdálenost, kdy intenzita pole klesne na $I(r=w_0) = e^{-2} \cdot I(0) = 0.135 \cdot I(0)$,

$I(r)$ - intenzita paprsku vzdálena od osy,

$I(0)$ - maximální intenzita.

7.1 MFD (mode field diameter)

Pro jednomodová vlákna se místo průměru jádra udává parametr MFD, protože se ve vláknu nešíří paprsek nejen uvnitř jádra, ale i v jeho plášti. Z toho také plyne, že MFD je vždy větší než průměr vlákna a je to vzdálenost mezi dvěma body v Gaussově křivce (Obr. 7.1), kdy intenzita klesne na $I(r=w_0) = e^{-2} \cdot I(0) = 0.135 \cdot I(0)$. Dále si u MFD musíme uvědomit, že vidový průměr je závislý na vlnové délce a čím je tato délka kratší, tím i MFD klesá. MFD parametr je důležitý pro výpočet útlumu (7.2.). Pokud spojujeme vlákna jednomodová vlákna se stejnými geometrickými rozměry, ale s rozdílným MFD dochází k útlumu na vláknu (dle vzorce (7.2.)) [6].

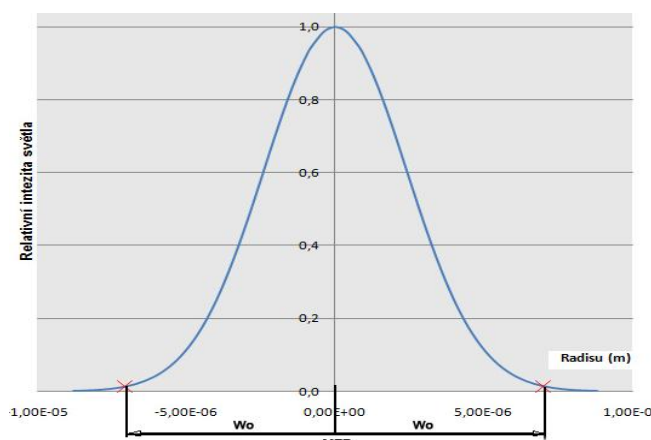
Útlum na rozhraní dvou vláken

$$A = -10 \log \frac{4}{\left(\frac{MFD_1}{MFD_2} + \frac{MFD_2}{MFD_1} \right)^2} = -20 \log \frac{2MFD_1 \cdot MFD_2}{MFD_1^2 + MFD_2^2}, \quad (\text{db/km}) \quad (7.2.)$$

w_0 - určíme z normalizované frekvence podle vztahu (7.3.)

Průměr modového pole

$$\frac{w_0}{a} = \frac{1}{\sqrt{\ln(V)}}, \quad (\text{m}) \quad (7.3.)$$

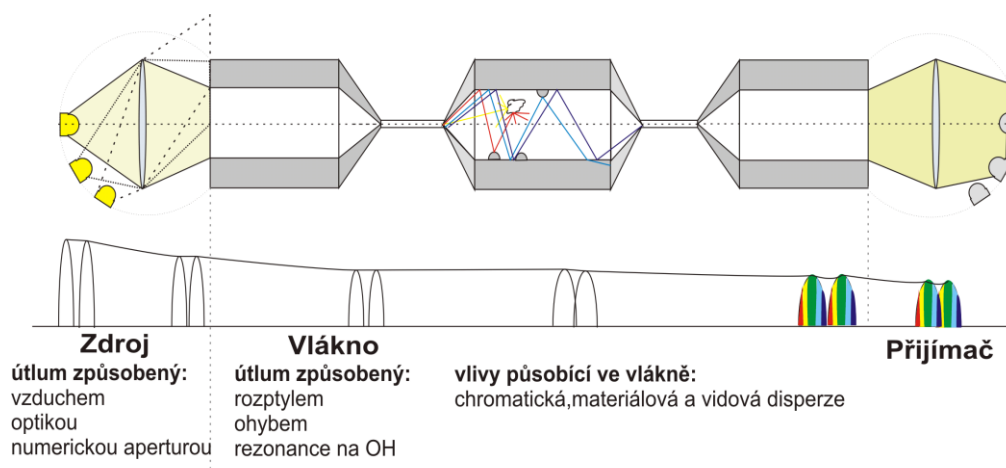


Obr. 7.1: Rozložení intenzity energie -Gausova křivka

8. Vizualizace

Vlastnosti procházejícího paprsku lze graficky vynést a zobrazit pro jednotlivá vlákna, zdroje signálů a jejich parametry. Pro zpracování dat a jejich následnou vizualizaci lze použít několik druhů programů např. (Excel, MATLAB, aj.)

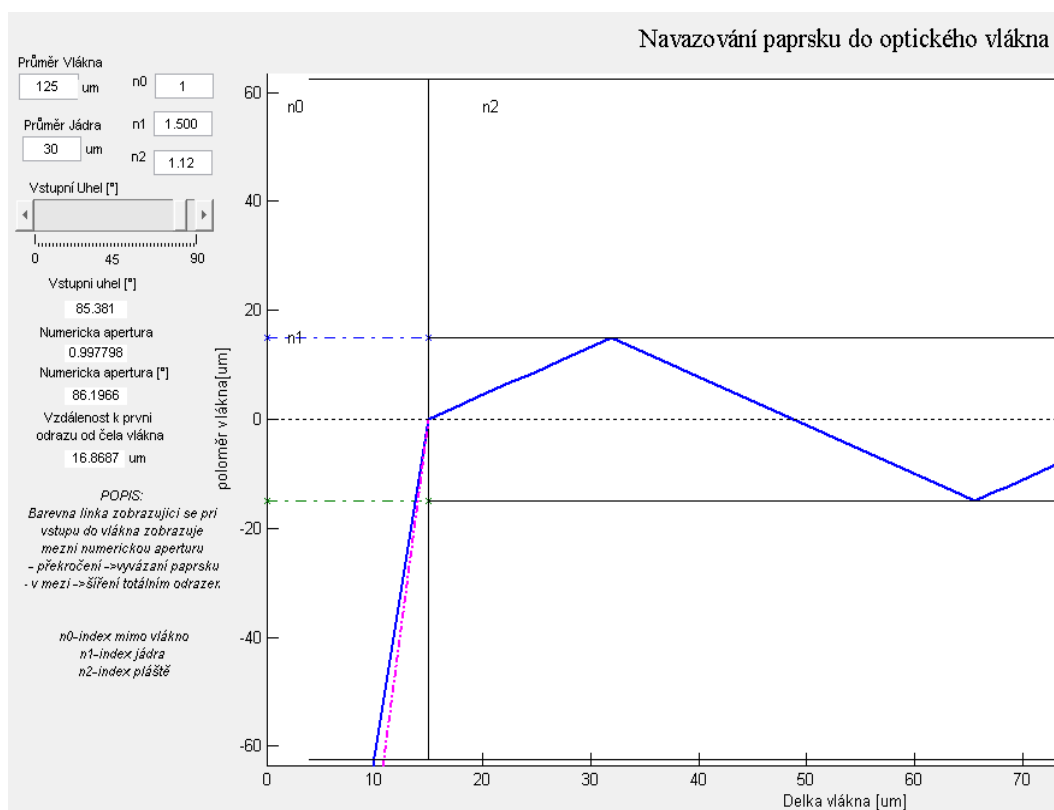
Před vizualizací je potřeba analyzovat jednotlivé dílčí kroky viz (Obr. 8.1). Například si optický spoj rozdělíme na část zdroje, u kterého zjistíme parametry, jako je vysílací vlnová délka, intenzita vysílaného signálu. Dále na prostor mezi zdrojem a vláknem, kde se zaměříme na navázání optického paprsku (kapitola 3.4), na numerickou aperturu (kapitola 3.4.3) a také na druh spojení (kapitola 3.6). Další částí jsou vlivy, které ovlivňují paprsek. Zde nás zajímají průběhy útlumů, disperzí, rozptylů a to pro jednotlivé vlnové délky. V posledním úseku je výstupní a snímací část. Tato část je stejná jako část vysílací, ale s rozdílem, že zdroj je nahrazen přijímačem.



Obr. 8.1: Průběh paprsku vláknem a vizualizace dat v jednotlivých bodech vlákna

8.1 Vizualizační program VLAKNO_NA

Tento program slouží k simulaci navazování optického paprsku do vlákna o libovolném průměru jádra, indexu lomu vstupního prostředí n_0 , indexu lomu jádra a pláště. Při spuštění programu jsou nastaveny hodnoty pro jednomodové vlákno s okolním prostředím o indexu $n_0=1$ (vzduch). Posuvníkem „Vstupní úhel“ nastavujeme úhel, pod kterým bude paprsek do vlákna navázán. Výstupem programu není pouze grafický výstup ale i textový. Textový výstup zobrazuje vstupní NA v závislosti na indexu lomu n_1 a n_2 . Další hodnota zobrazuje délku, kterou paprsek musí urazit od čela vlákna k prvnímu odrazu. Poslední zobrazovanou hodnotou je délka paprsku ve vláknu (podle vzorce (3.22.)). Program je naprogramován v prostředí MATLAB s využitím GUI (Graphical Unit Interface). V příloze 4 je ukázka použití programu.



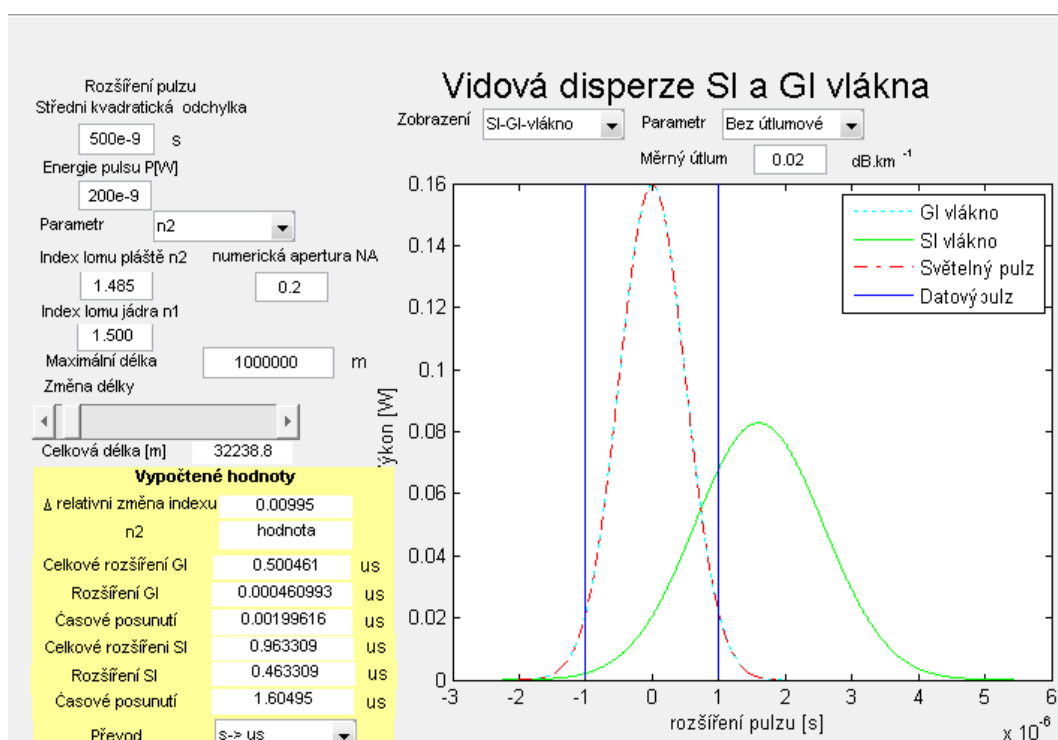
Obr. 8.2: Program VLAKNO_NA simulace průběhu paprsku vláknem

8.2 Vizualizační program DiSiGi

Program slouží k vizualizaci vidové disperze u vláken SI (Step Indexových) a GI (Gradientních). Je naprogramován v programu MATLAB s využitím GUI. V programu lze nastavit šířku vstupního impulzu, energii pulzu a parametry vlákna (jako jsou index lomu jádra a pláště).

Změnou délky vlákna je z grafů patrné rozšiřování impulzu a nepatrný posun v čase. Vypočtené hodnoty, jako je posun v čase nebo rozšíření impulzu pro vlákna SI a GI, lze odečíst z levého panelu. Na grafickém rozhraní je zobrazen vstupní datový (elektrický) impulz, impulz převedený z elektrického na světelný (aproximace rozložením Gaussovy křivky) a výstupní impulzy pro SI a GI vlákna. Pro výpočet rozšíření je užito vzorců (6.14.) a (6.15.), pro časový posun vzniklý ve vlákně je užito rovnic (6.11.) a (6.12.). Textový výstup (žluté pole) zobrazuje celkové rozšíření vlivem disperze a jeho rozdíl k původnímu impulzu. Dále se zobrazuje časové posunutí způsobené dobou šíření ve vlákně. Zobrazují se hodnoty pro vlákna SI a GI. Posledním textovým výstupem je přepočet NA na relativní změnu indexu a dopočet indexu pláště n_2 (tento režim zapneme zadáním parametru na hodnotu NA), to je užitečné při zadávání parametrů katalogových hodnot.

Výpočty s programem viz příloha (A) příklad (5).

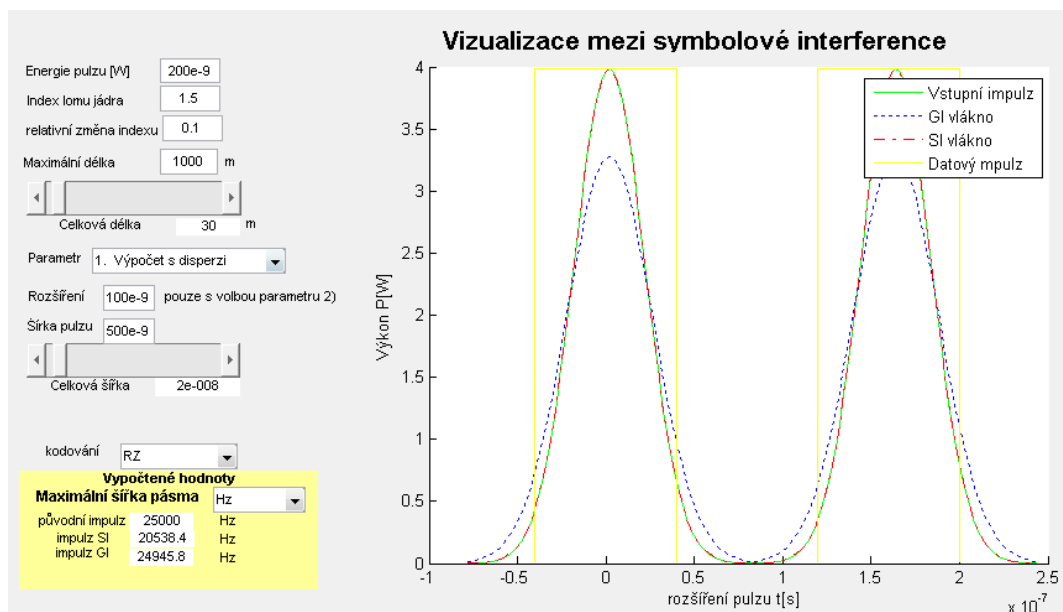


Obr. 8.3: Program DiSiGi pro simulaci vidové disperze SI a GI vláken

8.3 Vizualizační program DIBIT

Program je obdobou DiSiGi. Slouží k vizualizaci výstupních impulzů a k výpočtu maximální přenosové rychlosti pro linkové kódy NRZ a RZ. Vstupní impulzy jsou pouze pro názornější zobrazení. Nastavením energie pulzu, indexu jádra, maximální délky světlovodu a šířky impulzu spustíme vlastní vizualizaci. Dále je možné vybrat možnost volby vlastního rozšíření pulzu tedy zadáme hodnotu rozšíření na konci vlákna a k tomu to rozšíření budeme hodnoty dopočítávat. Vlivem disperze dochází na konci vlákna k rozšíření impulzu, pokud toto rozšíření překročí jistou mez, dojde k znehodnocení přenášené informace. Lze si povšimnout, že při rozšiřování impulzu dochází k rychlému poklesu šířky pásma a tedy klesá množství přenesené informace. Z grafického rozhraní je patrné ovlivnění jednoho impulzu druhým. Z textového výstupu lze určit maximální šířku přenosového pásma.

Pro výpočet hodnot je užito vzorců (6.14.) a (6.15.). Pro výpočet šířky pásma při kódování NRZ a RZ je užito vzorců pro SI (6.18.) a pro GI (6.19.). Výpočty s programem viz příloha (A) příklad (5)



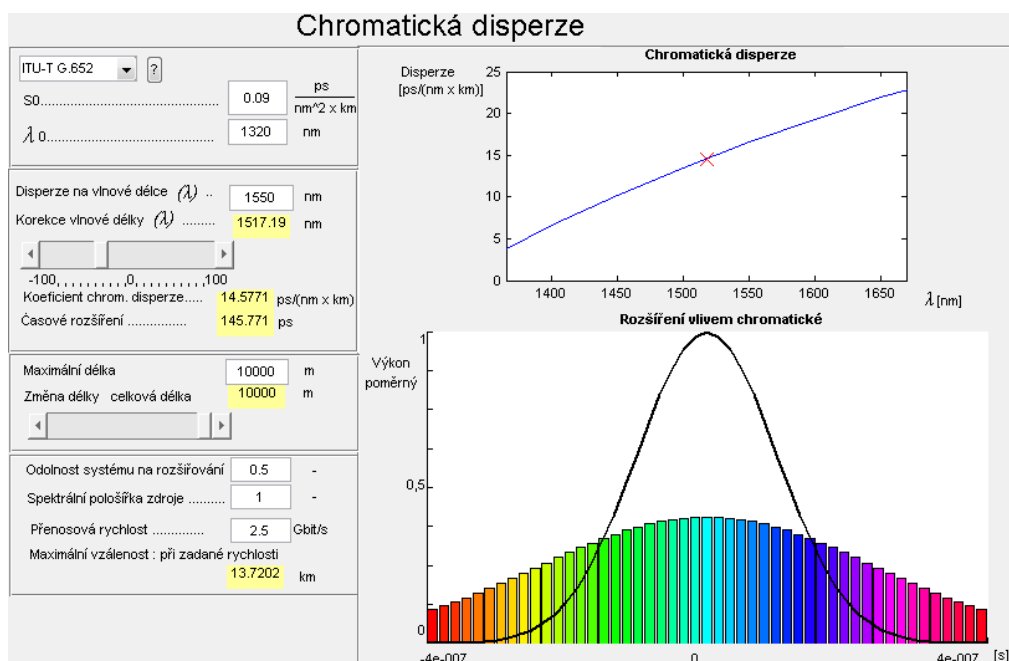
Obr. 8.4: Program DIBIT sloužící k výpočtu maximální šířky pásma

8.4 Vizualizační program DICHRO

Programem DICHRO viz (Obr. 8.5) je možné vizualizovat chromatickou disperzi, přenosovou rychlost a rozšíření v čase v jednomodových vláknech. Program je určen pro 3 typy vláken a to:

1. Konvenční optická vlákna (ITU-T G.652) vzorec (6.25.).
2. Vlákna s nenulovou chromatickou disperzí ITU-T G.655 viz vzorec (6.27.).
3. Disperzně posunutá vlákna ITU-T G.653 viz vzorec (6.26.).

Mezi těmito vlákny lze libovolně přepínat nebo si o nich zobrazit nápovědu (ikonka otazník). Do prvního okna zadáváme strmou křivku S_0 (jedná se o sklon disperzní charakteristiky při nulové chromatické disperzi). Do druhého okna zadáváme vlnovou délku λ_0 (vlnová délka pro nulovou chromatickou disperzi - výjimkou je vlákno podle standardu G. 655, toto vlákno má nenulovou chromatickou disperzi a je možné ho měřit v hodnotách větších než 1460 nm). V další části nastavíme zkoumanou vlnovou délku λ , korekčním posuvníkem lze provést její korekci ± 100 nm, která se po té zobrazuje nad posuvníkem. Pro výpočet rozšíření impulzu nastavujeme délku trasy zadáním maximální délky a nastavením posuvníku. Vypočtené hodnoty se po té zobrazí v kolonce „Časové rozšíření“ a „Koeficient chrom. disperze“ viz vzorec (6.31.). V poslední části je řešena maximální délka trasy při užití zadané přenosové rychlosti viz vzorec (6.32.), dále je podmínkou zadat spektrální pološířku zdroje $\Delta\lambda$ a konstantu odolnosti systému na rozšíření impulzu. Výpočty viz příloha (A) příklad (6).

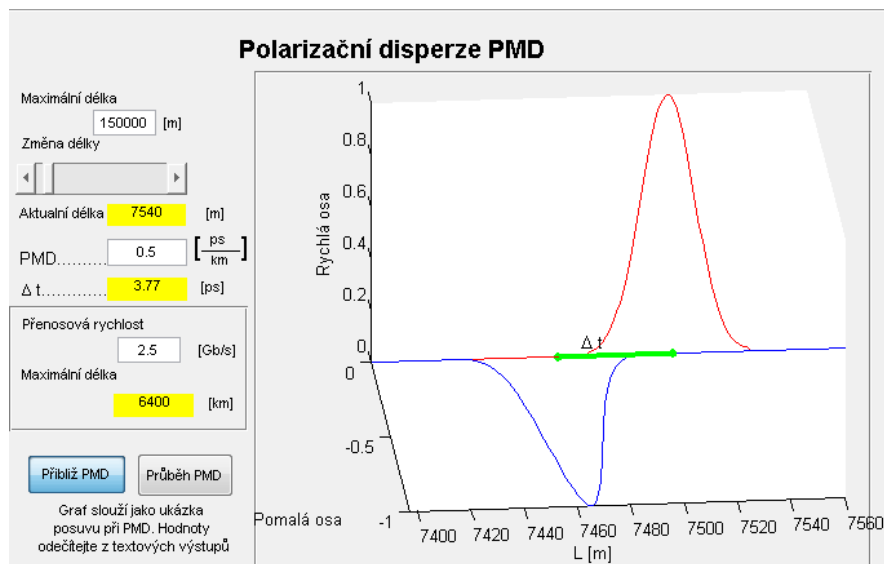


Obr. 8.5: Program DICHRO vizualizace chromatické disperze

8.5 Vizualizační program PMDDI

Program PMDDI slouží k vizualizaci průběhů polarizační disperze (PMD). Skládá se ze dvou grafických výstupů. První grafický výstup zobrazuje průběh posunu přibližnou vzdálenost a slouží pouze pro ilustraci. Pro přesnější zobrazení přiblížíme impulzy na dané vzdálenosti a to tlačítkem „Přiblíž PMD“. Druhý grafický výstup zobrazuje průběh PMD. Do tohoto režimu se přepneme tlačítkem „Průběh PMD“. Zadáním hodnoty PMD se v závislosti na délce zobrazuje časový posun rychlé a pomalé osy Δt . Zadáním hodnoty přenosové rychlosti s kombinací s hodnotou PMD program vypočítá pomocí vzorce (6.23.) hodnotu maximální vzdálenosti.

Program umí zpracovat jak hodnoty PMD pro krátké (viz vzorec (6.22.)) tak i pro dlouhé vzdálenosti (viz vzorec (6.21.)). Při přechodu z krátké vzdálenosti na dlouhou dochází k automatickému přepnutí.



Obr. 8.6: Program PMDDI vizualizace polarizační disperze

9. Závěr

Při tvorbě bakalářské práce bylo snahou přiblížit problematiku přenosu optického paprsku vláknem. Objasnit děje v optickém vlákně prostřednictvím výpočtů.

První kapitola byla zaměřena na základní vlastnosti optických vláken, na druhy existujících optických prostředí a popis vlastní výroby optických vláken.

Další kapitola byla věnována jednomodovým a mnohomodovým vláknům, jejich druhům, specifikacím ITU a aplikacím jejich použití. U mnohomodových vláken jsem se zaměřil na šíření paprsku ve vlákně, pomocí modů a na jejich dělení a počet. U jednomodových vláken jsem se zabýval změnou vlastností pomocí změny numerické apertury. V kapitole 2.3 jsem popsal nové technologie výroby optických vláken a to mikrostrukturálních vlákna. Dále byly popsány struktury se skleněným jádrem se vzduchovým jádrem nebo vláknem s velkou vidovou plochou byly zde popsány způsoby šíření paprsku a základní parametry vláken.

V kapitole 3 je pojednáno o modech ve vlákně a jejich počtu. V podkapitolách jsem se zaměřil na problém navazování paprsku do vlákna pomocí světelných zdrojů LED, LD, konektorového navazování a navazování vlákno-vlákno porovnání jednotlivých zdrojů a jejich využití. U útlumových ztrát v kapitole 4 jsem se zaměřil na ztráty absorpcí, rozptylem a na ohybové ztráty, které ovlivňují vlastním vložným útlumem celkový útlum vlákna. Byly zde popsány způsoby odstranění nebo minimalizace jejich působení. Kapitola 6 disperzní ztráty byla věnována druhům disperzních ztrát, jak se projevují u vláken jednomodových a jak u mnohomodových a způsoby jejich odstranění nebo jejich omezení.

V poslední kapitole je zpracováno téma vizualizace jednotlivých dějů probíhajících uvnitř vlákna. K vizualizaci jsem zvolil programovací prostředí MATLAB pro jednoduché rozšíření naprogramovaných funkcí, integrované sady funkce a efektivní grafické rozhraní. Prvním programem je možné simulovat navazování paprsku do vlákna, Výpočet mezní numerické apertury v závislosti na zadaných hodnotách indexů lomů jednotlivých prostředí.

Z výstupů druhého programu DiSiGi, určeného k simulaci vidové disperze je patrné, že se zvyšující se délkou dochází k rozšiřování vstupního impulzu a čas příchodu impulzu se zvětšuje. Také bylo vidět rozdílné chování vláken step indexových (SI) a gradientních (GI). Vlákna GI byla méně ovlivňována vidovou disperzí než vlákna SI. V dalším programu byla řešena mezisymbolová interference v návaznosti na vidovou disperzi. Při změně parametru je možné si povšimnout větší šířky pásma pro vlákna GI a menší pro SI. To potvrzuje teoretické poznatky, kde se uvádí, že přenosová rychlost GI je až 25x větší než u SI, s rozdílem, že program neuvažuje další vlivy ovlivňující vlákno a uvažuje pouze

kódování RZ a NRZ. Z vypočtených hodnot byl rozdíl mezi gradientním a step-indexovým vláknem při kódování RZ asi 20x a u kódování NRZ asi 14x. Vypočteno při stanovených hodnotách, vzdálenosti 520 m a šířce vstupního pulzu 500 nm při šířce pásma 100MHz pro RZ a 200 MHz pro NRZ. Pro další vizualizaci disperzních ztrát jsem vytvořil program DICHRO simulující vliv chromatické disperze pro různé světlovody podle specifikaci ITU-T G652, G653, G655. Jednotlivé specifikace popisují průběh chromatické disperze pro dané vlákno. Z výstupu programu lze odečíst hodnotu koeficientu chromatické disperze na zkoumané vlnové délce. Další funkcí programu je určení maximální délky, po kterou nedochází k znehodnocení informace. Například pro systém s odolností 1, se spektrální pološířkou zdroje 1 nm a požadovanou přenosovou rychlostí 2,5 Gbit/s byla maximální přenosová vzdálenost rovna cca 24 km. Pro stejné nastavení, ale odolnost systému 0,5 byla vzdálenost poloviční. Z toho lze odvodit, že systém s větší odolností bude vykazovat lepší přenosové vlastnosti, ale také bude finančně náročnější. V posledním programu PMDDI byla řešena polarizační vidová disperze a její průběh v závislosti na délce při přiblížení výstupního pulzu. Zde byl patrný rozdíl Δt mezi rychlou a pomalou osou. Z této hodnoty je spočtena maximální délka, pro kterou bude zabezpečen bezchybný přenos informace.

Litertura

- [1] Bahaa E.A. Saleh, Malwin Carl Teich. *Základy fotoniky 2*. [překl.] R. M. Dušek, J. FIALA a J. VACEK. místo neznámé : MATFYZPRESS. str. 435. Sv. 2. 80-85863-02-2.
- [2] Doc. Ing. Filka, Milosav, CSc. 2009. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno : Centa, 2009. 978-80-86785-14-1.
- [3] Doc. Ing. Filka, Milosav, CSc. 1989. *Optoelektronika v komunikacích*. místo neznámé : Vysoké učení technické v Brně, 1989. str. 133. 80-214-0011-0.
- [4] Doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc. 2002. *Vláknová optika v řídicí a měřicí technice*. [PDF] Brno : Vysoké učení technické , 2002.
- [5] Doc. Ing. Otakar Wilfert, CSc. 1993. *Optoelektronika I*. BRNO : Vysoké učení technické v Brně, 1993. 80-214-0551-1.
- [6] Doleček, Jaroslav. 2007. *Optoelektronika a optoelektronické prvky*. Praha : Nakladatelství BEN, 2007. str. 160. 978-80-7300-184-1.
- [7] NKT Photonics [Online]. 2007 [cit. 2009-11-1]. Dostupný z WWW: <<http://www.nktphotonics.com/>>.
- [8] RLC [Online]. [cit. 2009-11-1]. Dostupný z WWW: <<http://www.rlc.cz.>>.
- [9] SPIE [Online]. [cit. 2009-11-1]. Dostupný z WWW:<<http://www.spie.org.>>.
- [10] Laboratoř optoelektroniky a laserové techniky [Online].[cit. 2009-11-2] Dostupný z WWW: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/OKS//>>.
- [11] Mářšálek, Ing. Leoš. 2006. *Optická vlákna*. [PDF] Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006.
- [12] Mikrokom. [Online] Měřicí technika optických sítí. [cit. 2009-11-1]. Dostupný z WWW:<<http://www.mikrokom.eu/>>.
- [13] Ph.D., Ing. Leoš Boháč. <http://www.comtel.cz>. *Katedra telekomunikační techniky ČVUT*. [Online] <http://www.comtel.cz/cz/>
- [14] RP-Photonics [Online]. 2007-01-20 [cit. 2009-11-03]. Dostupný z WWW: <www.rp-photonics.com>.
- [15] ITU [online]. 2001-01-20 , 2009-12-11 [cit. 2009-11-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G/en>>.
- [16] JOHN , D. Joannopoulos, et al. *Ab-Initio Physics Research Group* [online]. [cit. 2009-11-03]. Dostupný z WWW: <<http://ab-initio.mit.edu> >.
- [17] Laserové diody – Část 4. Aplikace LD. Světlo [online]. 2005, 06, [cit. 2010-04-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz>>.
- [18] Safibra, s.r.o. [online]. 1999 [cit. 2010-04-08]. Safibra. Dostupné z WWW: <<http://www.safibra.cz>>.
- [19] Citace.com [online]. Verze 2.0. 2004 [cit. 2010-05-26]. Citace. Dostupné z WWW: <<http://www.citace.com>>.

Seznam zkratk a symbolů

β_c	Isotermální stlačitelnost [m^2N^{-1}]
σ_{gi}	RMS rozšíření pro SI [s]
β_{max}	Konstanta šíření pro mezní mod [rad.m^{-1}]
β_{min}	Konstanta šíření pro osový mod [rad.m^{-1}]
σ_{si}	RMS rozšíření pro SI [s]
σ_λ	Střední kvadratická odchylka [nm]
A	Ztráty optického vlákna [dB]
a'	Poloměr vlákna [m]
A_R	Přídavný Rayleiho rozptyl [-]
B_{sm}	Maximální šířka pásma [Hz]
B_t	Přenosová rychlost [Hz]
BxL	Součinitel šířky pásma [Hz.Km]
c_0	Rychlost světla [km.s^{-1}]
$C_{1,2}$	Délka ohybu vlákna
CD	Chromatická disperze [$\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$]
d	Průměr mikrostruktury [m]
$D(\lambda)$	Chromatická disperze [$\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$]
d/Λ	Normalized hole diameter [-]
DC	Vlákno s posunutým indexem lomu
D_m	Koeficient materiálové disperze [$\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$]
DSF	Vlákno s posunutou disperzí
GI	Gradientní vlákno
k	Vlnové číslo [-]
K	Boltzmanova konstanta $K=1,381 \times 10^{-23}$ [JK^{-1}]
k_0	Vlnové číslo ve vakuu
k_r	Konstanta vyjadřující odolnost na rozšíření impulsu
k_T	Příčná složka vlnového vektoru (v jádru) [m^{-1}]
L	Délka optické trasy [m]
MAC	Míra citlivosti na ohyb [-]
MFD	Mode field diameter [m]
M_{Gi}	Počet modů ve vlákně GI [-]
MM	Mnohovidová vlákna
M_{Si}	Počet modů ve vlákně SI [-]
n	Index lomu [-]
n_1	Index jádra [-]
n_2	Index pláště [-]
NA	Numerická apertura [-]
NA_f	Numerická apertura vlákna [-]
NA_s	Numerická apertura zdroje [-]
$NDSF$	Konvenční vlákno
n_s	Skupinový index [-]
$NZ-DSF$	Vlákno se zápornou disperzí
p	Fotoelastický koeficient [-]

P_{in}	Vstupní výkon [W]
PM	Polarizované vlákno
PMD	Polarizační disperze [ps.km ^{-0.5}]
POF	Plastové vlákno
P_{out}	Výstupní výkon [W]
P_s	Navazovaný výkon [W]
r	Poloměr jádra [m]
R	Celková šířka vlákna
r_s	Poloměr emisní plochy [m]
S_0	Sklon disperzní charakteristiky [-]
SI	Step indexové vlákno
T	Perioda [s]
t	Koeficient ztrát [-]
T_f	Fiktivní teplota [K]
t_{max}	Čas průchodu vláknem [s]
t_{min}	Čas průchodu vláknem (osový paprsek) [s]
t_s	Skupinové zpoždění [s]
v	Rychlost v materiálu [km.s ⁻¹]
V	Normalizovaná frekvence [-]
v_f	Fázová rychlost [km.s ⁻¹]
v_g	Grupová rychlost [km.s ⁻¹]
w_0	Poloměr gaussouva paprsku [m]
α	Měrný útlum [dB.km ⁻¹]
α_c	Mezní úhel šíření [°]
α_{dB}	Celkový vložný útlum [dB/km]
α_r	koeficient ohybových ztrát [-]
γ	Příčná složka vlnového vektoru (v plášti) [m ⁻¹]
γ_r	Rayleiho rozptyl [m ⁻¹]
Δ	Relativní index lomu [-]
$\Delta_{\sigma m}$	RMS rozšíření impulsu [ps]
Δt	DGD (Differential Group Delay) zpoždění impulzů [s]
Δt_{GI}	Rozdíl časů příchodů GI [s]
Δt_{chrom}	Rozšíření vlivem chromatické disperze [ps]
Δt_{roz}	Rozdíl časů průchodů [s]
Δt_{SI}	Rozdíl časů příchodů SI [s]
λ	Vlnová délka [m]
Λ	Rozteč mikrostruktur [m]
λ_0	Vlnová délka při nulové CD [m]
λ_c	Mezní vlnová délka [m]
ω	Úhlová rychlost [rad.s ⁻¹]

Seznam příloh

A první příloha.....	60
1 příklad	60
2 příklad	60
3 příklad	61
4 příklad	62
5 příklad	63
6 příklad	64
B druhá příloha	65
7 Seznam přiloženého CD	65

Přílohy

A první příloha

1. Příklad

Máme vlákno (Laserwave OM4/OM3) o průměru jádra $d=50\text{ }\mu\text{m}$, numerické apertuře 0,20, nulové chromatické disperzi při vlnové délce 1295-1340 nm. Vypočítejte normovanou frekvenci V a počet vidů ve vláknech při vlnových délkách $\lambda=850\text{ nm}$ a $\lambda=1300\text{ nm}$.

Při výpočtu budeme vycházet z rovnice (3.8.) a (3.9.), do rovnice pro normalizovanou frekvenci dosadíme poloměr vlákna $a=25\text{ }\mu\text{m}$ a numerickou aperturu a vlnovou délku $\lambda=1300\text{ nm}$.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA = \frac{2\pi}{1300 \times 10^{-9}} \cdot 25 \times 10^{-6} \cdot 0,20 = 24,166$$

Dosadíme normovanou frekvenci do rovnice (3.9.).

$$M_{si} = \frac{4V^2}{\pi^2} = \frac{4 \cdot (24,166)^2}{\pi^2} \approx 236$$

Dosazením vlnové délky $\lambda=850\text{ nm}$ dostaneme normovanou frekvenci $V=36,95$ a počet módů $M \approx 553$. Je patrné, že při vyšší vlnové délce počet módů ve vláknech klesá.

2. Příklad

Na počátku vlákna dlouhého 10 km navazujeme optický výkon 200 μW a na výstupu odebíráme výkon 10 μW . Jaký je celkový útlum vlákna? Jaký je měrný útlum?

$$A = 10 \log \frac{P_{in}}{P_{out}} = 10 \log \frac{200 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-6}} = 13,01\text{ dB}$$

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{10}{10\text{ km}} \log \frac{200 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-6}} = 1,3\text{ dB.km}^{-1}$$

Po dosazení dostáváme celkový útlum 13,01 dB a měrný útlum 1,3 dB.km⁻¹.

Vlákno bylo nutné prodloužit o 5 km a tedy ho spojit třemi spojkami s vložným útlumem 3dB, vstupní optický výkon zůstal stejný. Jaký je celkový útlum vlákna? Jaká je výstupní hodnota výkonu? Vlákno po úpravě má 15km s měrným útlumem 1,3 dB.km⁻¹, tedy celkový útlum je 19,5 dB, k tomuto útlumu přičteme vložný útlum 9 dB. Celkový útlum je 28,5 dB.

$$P_{out} = P_{in} 10^{\frac{-A}{10}} = 200 \times 10^{-6} \cdot 10^{\frac{-28,5}{10}} = 0,282\text{ }\mu\text{W}$$

Jaká by byla hodnota výstupního výkonu, pokud by bylo vlákno v celku bez spojek?
Zde můžeme dosadit přímo hodnotu vloženého útlumu a délku trasy.

$$P_{out} = P_{in} 10^{\frac{-\alpha \cdot L}{10}} = 200 \times 10^{-6} \cdot 10^{\frac{-19,5}{10}} = 2,24 \mu W$$

Výstupní výkon se spojkami je 0,282 μW a bez spojek 2,24 μW

3. Příklad

Máme vlákno z křemenného skla s jádrem o indexu lomu $n=1,46$ a potřebujeme zjistit Rayleighovo rozptýlení a přídavné Rayleighovo rozptýlení na vlnových délkách $\lambda=630$ nm, $\lambda=780$ nm, $\lambda=1000$ nm, $\lambda=1300$ nm a $\lambda=1550$ nm. Kde $p=0,286$ $\beta_c=7 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$ $K=1,381 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ $T_f=1400 \text{ K}$.

$$\gamma_R = \frac{8\pi^2}{(3\lambda^4)} n^8 p^2 \beta_c T_F K = \frac{8\pi^2}{(3\lambda^4)} = 1,46^8 \cdot 0,286^2 \cdot 7 \times 10^{-11} \cdot 1,381 \times 10^{-23} \cdot 140 =$$

$$\frac{1,895 \times 10^{-28}}{\lambda^4} = \frac{1,895 \times 10^{-28}}{630 \times 10^{-9}} = 1,202 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

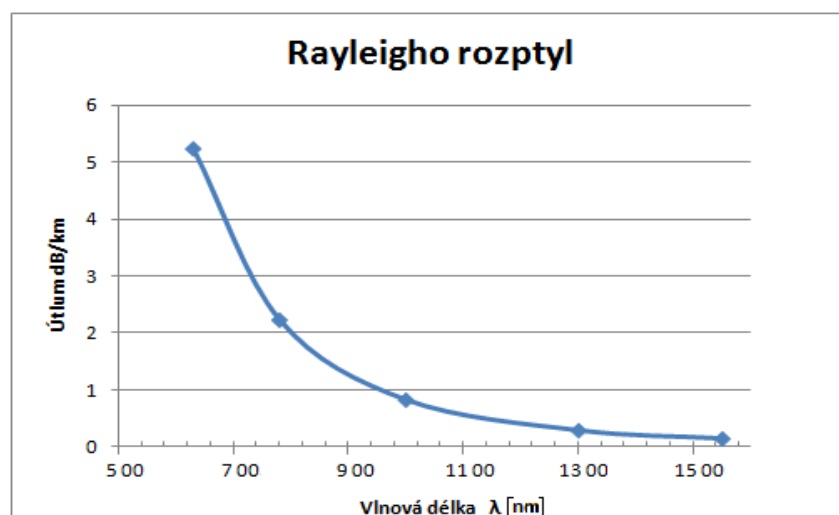
Dále spočítáme přídavné Rayleighovo rozptýlení podle vzorce jako délku budeme uvažovat vzdálenost 1 km

$$A_R = e^{-\gamma_R \cdot L} = e^{-1,202 \times 10^{-3} \cdot 10^3} = 0,3$$

$$\alpha_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{A_R} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{0,3} \right) = 5,22 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$$

V tabulce jsou zbylé hodnoty pro vlnové délky a v grafu jsou vyneseny hodnoty v závislosti na vlnové délce a měrného útlumu.

Vlnová délka λ (nm)	Rayleighovo rozptýlení γ_r (m^{-1})	Přídavné Rayleighovo rozptýlení A_r (-)	vložený útlum ($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)
630	12,02E-4	0,300307	5,224339
780	5,12E-4	0,599323	2,223387
1000	1,9E-4	0,827373	0,822988
1300	0,663E-4	0,935804	0,288151
1550	0,328E-4	0,967702	0,142583

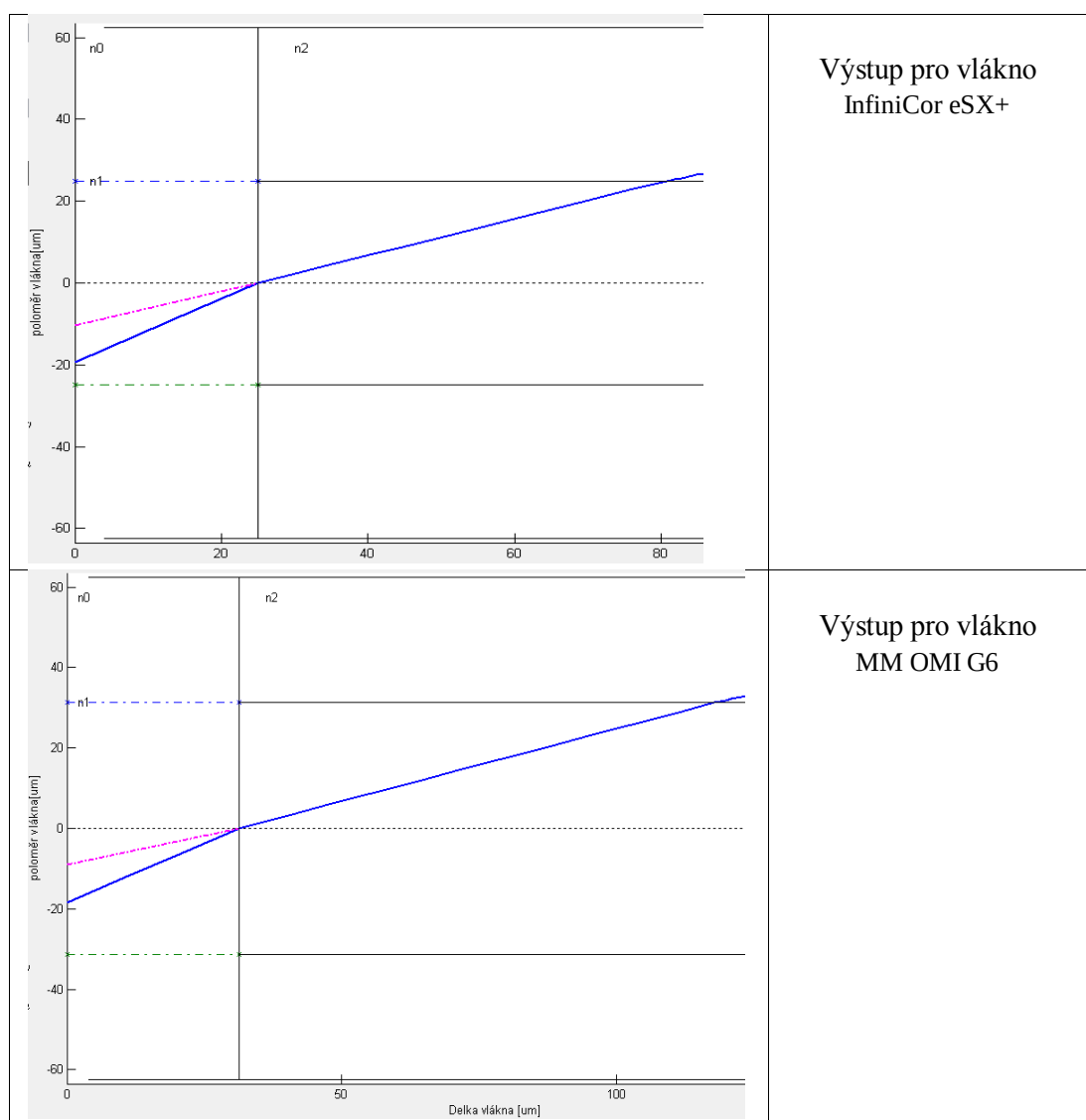


Graf: Závislost útlumu na vlnové délce při Rayleighově rozptýlení

4. Příklad

Program VLAKNO_NA slouží k vizualizaci průchodu paprsku vláknem a můžeme v něm zobrazit různé stavy nasvícení čela vlákna.

vlákno	InfiniCor eSX+	LaserWAVE 550/300	MM OMI G6	SM	RC-Er 1550c3	SMF-282
Průměr jádra D_j	125 μm	125 μm	125 μm	125 μm	125 μm	125 μm
Průměr pláště D_j	50 μm	50 μm	62.5 μm	9 μm	7.9 μm	8.2 μm
n_1	x	x	x	1.5	1.5	x
n_2	x	x	x	1.495	1.42	x
NA	0.2	0.21	0.275	x	x	0.14
Hodnoty odečtené z programu						
NA	0.2	0.21	0.275	0.12	0.483	0.14
délka paprsku v 1 m vlákna	1.009 m	1.00995 m	1.017 m	1.0032 m	1.083 m	1.004 m



5. Příklad

Program DiSiGi a DIBIT slouží k vizualizaci vidové disperze a mezisymbolové interference pro mnohomodová vlákna.

vlákno	InfiniCor eSX+	LaserWAVE 550/300
Průměr jádra D_j	125 μ m	125 μ m
Průměr pláště D_j	50 μ m	50 μ m
n_1	1,5	1,5
n_2	x	x
NA	0.2	0.21
S_0	0,101	0,105
λ_0	1300nm	1295nm
Hodnoty odečtené z programu DiSiGI		
n_2	1,4681	1,485
Relativní změna indexu	0,009	0,008
Rozšíření 100m	1,2 ns	1,27 ns
Časové posunutí	4,47ns	4,41ns
Rozšíření 1000m	12ns	14,90ns
Časové posunutí	44,7ns	49,03ns
Hodnoty odečtené z programu DIBIT		
Pro šířku impulzu s disperzí 100 m		
Přenosová rychlost pro NRZ	1.991 MHz	1.999 MHz
Přenosová rychlost pro RZ	0.99MHz	0.997 MHz
Pro šířku impulzu s disperzí 1000 m		
Přenosová rychlost pro NRZ	1.94 MHz	1.67 MHz
Přenosová rychlost pro RZ	0.971 MHz	0.977 MHz
Pro šířku impulzu 500e-6 s (nevztahuje se na vlákna)		
Přenosová rychlost pro NRZ	1 MHz	
Přenosová rychlost pro RZ	0,5 MHz	

6. příklad

Program DICHRO slouží k vizualizaci chromatické disperze u jednomodových vláken.

vlákno	DSF Dispersion Shifter Fiber	NZDSF Nonzero Dispersion Shifted	AllWAVE ZeroWater Peak
Průměr jádra D_i	125 μm	125 μm	125 μm
Průměr pláště D_o	9 μm	9 μm	9 μm
S_0 [ps.nm ⁻² km ⁻¹]	0,09	0,045	0,085
λ_0	1550nm	1405	1295nm
ITU-T	G.653	G.555	G.652
Vypočtené hodnoty DICHRO			
$D(\lambda)$ Koeficient disperze na λ 1550 [ps.nm ⁻¹ km ⁻¹]	0.09	6.33	17,8
$D(\lambda)$ Koeficient disperze na λ 1460 [ps.nm ⁻¹ km ⁻¹]	-9	3,52	12,1
$D(\lambda)$ Koeficient disperze na λ 850 [ps.nm ⁻¹ km ⁻¹]	-62	-----	-85,1
Δt Časové rozšíření při λ 1550 a L 600 m [ps]	0.0607	3,529	10,7
$L_{\max}$ [km] pro (B= 2,5Gbit.s ⁻¹ ; $\Delta\lambda$ =1 nm; $k=0,5$; $D(\lambda)=17,1$	-----	-----	11,36
$L_{\max}$ [km] pro (B= 2,5Gbit.s ⁻¹ ; $\Delta\lambda$ =1 nm; $k=0,5$; $D(\lambda)=6,33$	-----	32,0	-----
$L_{\max}$ [km] pro (B= 2,5Gbit.s ⁻¹ ; $\Delta\lambda$ =1 nm; $k=0,5$; $D(\lambda)=20.8$	9,8	-----	-----
$L_{\max}$ [km] pro (B= 2,5Gbit.s ⁻¹ ; $\Delta\lambda$ =1 nm; $k=1$; $D(\lambda)=17,1$	-----	-----	22,7
$L_{\max}$ [km] pro (B= 2,5Gbit.s ⁻¹ ; $\Delta\lambda$ =1 nm; $k=1$; $D(\lambda)=6,33$	-----	64,0	-----
$L_{\max}$ [km] pro (B= 2,5Gbit.s ⁻¹ ; $\Delta\lambda$ =1 nm; $k=1$; $D(\lambda)=20.8$	19,1	-----	-----

B druhá příloha

7. Seznam přiloženého CD

Bakalarska_prace	
	OpticFiber.docx
	OpticFiber.pdf
Programy_MATLAB	
	PMDDI
	PMDDI.m, PMDDI.fig, PMDDI.exe
	DIBIT
	DIBIT2.m, DIBIT2.fig, DIBIT.exe
	DICHRO
	DICHRO1.m, DICHRO1.fig, DICHRO.exe
	DISIGI
	DisperzeSIGI.m, DisperzeSIGI.fig, DISIGI.exe
	VLAKNO_NA
	VLAKNO_NA.m, VLAKNO_NA.fig, VLAKNO_NA.exe
Zdrojové_Obrázky.zip	