

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Kolimace vláknového zakončení pomocí čoček a vláknových segmentů s gradientním indexem lomu

Klára Eöllösová

Vedoucí: Ing. Matěj Komanec, Ph.D.
Obor: Elektronika a komunikace
Zaměření: Elektronika a komunikace
Květen 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Eöllišová** Jméno: **Klára** Osobní číslo: **465353**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Kolimace optického svazku na výstupu jednořivových optických vláken ve viditelné a blízké infračervené oblasti

Název bakalářské práce anglicky:

Optical beam collimation at the output of single-mode optical fibers in the visible and near-infrared region

Pokyny pro vypracování:

Cílem Vaší bakalářské práce bude teoretická rešerše, rozbor, simulace, návrh praktického řešení a experimentální ověření kolimace optického svazku vystupujícího z jednořivového optického vlákna, a to ve viditelné a blízké infračervené oblasti. Základem bude analýza kritických parametrů pro kolimaci optického svazku z pohledu optických vláken, jako jsou numerická apertura, stopa pole, vlnová délka a divergence svazku.

Porovnejte možnosti řešení kolimace pomocí čočky či segmentu gradientního mnohovědového optického vlákna a dále proveďte i jejich simulační porovnání pro zvolené konfigurace. Pro simulaci kolimace využijte dostupného softwarového vybavení. Na základě porovnání obou variant zvolte vhodné řešení pro dané cílové parametry (aplikaci). Zabývejte se metodami měření stopy pole a divergence svazku, které pak využijte v následné experimentální části bakalářské práce. Experimentální část bakalářské práce bude představovat konkrétní provedení kolimace pro dané jednořivové optické vlákno a vlnovou délku (varianta ve viditelné a infračervené oblasti) při mezních parametrech optického svazku.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Saleh, B.E.A., Teich, M.C. Základy fotoniky. Matfyzpress, Praha, 1994
- [2] NOVOTNÝ, Karel, Tomáš MARTAN a Jan ŠÍSTEK. Systémy pro optické komunikace. Praha, Vydavatelství CVUT, 2003. ISBN 80-010-2810-0.)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Matěj Komanec, Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Matěj Komanec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Matěji Komančovi, Ph.D. za celkové vedení a koordinaci práce, věnovaný čas i trpělivost a všechny rady udělené při psaní této bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Dmytru Suslovovi za pomoc v laboratoři a Ing. et Ing. Jaroslavovi Krejčímu, Ph.D. za cenné rady, náměty a připomínky. Také bych ráda poděkovala svým rodičům a přátelům za morální podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Abstrakt

Práce seznamuje se základními parametry optických vláken důležitých pro kolimaci optického svazku. Dále popisuje možnosti navazování optických vláken a vysvětluje princip kolimace. Obsahuje simulace kolimátorů s čočkou s gradientním profilem indexu lomu pro vlnové délky 630, 1550 a 2000 nm. Součástí je návrh praktického řešení kolimátorů na uvedených vlnových délkách a metody měření základních parametrů. Na závěr je rozebráno měření definovaných parametrů na vlnových délkách 1550 a 630 nm pomocí uvedených metod.

Klíčová slova: čočky s gradientním indexem lomu, kolimace, jednovidové vlákno, stopa pole, divergence, útlum odrazu, vložený útlum

Vedoucí: Ing. Matěj Komanec, Ph.D.
Fakulta elektrotechnická,
Technická 2,
16627 Praha 6,
B2-533

Abstract

The thesis describes basic parameters of optical fibers important for collimation of optical beam. Possibilities of fiber coupling are discussed, explaining basic principles of collimation. Simulations of collimators with graded index lenses are included for wavelengths of 630, 1550 and 2000 nm. In the thesis a proposal of a practical solution of a collimator design is included considering listed wavelengths and furthermore measurement approaches of basic parameters are mentioned. Measurement of defined parameters itself is described for wavelengths 1550 and 630 nm based on described measurement methods.

Keywords: graded-index lens, collimation, single-mode fiber, mode field diameter, divergence, return loss, insertion loss

Title translation: Collimation of fiber end using lenses and fiber segments with a gradient refractive index profile

Obsah

1 Úvod	1	6.2.3 Útlum odrazu (Return loss) .	30
2 Základní parametry optických vláken (pro kolimaci optického svazku)	3	6.2.4 Vložný útlum (Insertion loss)	30
2.1 Numerická apertura (Numerical aperture)	3	6.3 Vlnová délka 630 nm	31
2.2 Stopa pole (Mode Field Diameter)	4	6.3.1 Rozbíhavost	32
2.3 Mezní vlnová délka (Cut-off wavelength)	5	6.3.2 Vložný útlum (Insertion loss)	33
2.4 Útlum odrazu (Return loss)	6	7 Závěr	35
2.5 Vložný útlum (Insertion loss)	6	Literatura	37
2.6 Divergence svazku	7	A Obrázky	39
3 Vazba mezi optickými vlákny	9	B Tabulky	51
3.1 Spojování optických vláken	9	C Seznam zkratk a symbolů	53
3.1.1 Optické konektory	9	Seznam použitých zkratk	53
3.1.2 Nerozebíratelné spoje	10	Seznam použitých symbolů	53
3.2 Navazování světla do optického vlákna	11		
3.2.1 Navazování pomocí čoček	11		
3.3 Navazování pomocí kolimátorů	12		
3.3.1 Kolimátory na bázi vláknového segmentu s gradientním indexem lomu	13		
3.3.2 Volba řešení vzhledem k cílové aplikaci	14		
4 Simulace	17		
4.1 Vlnová délka 1550 nm	17		
4.1.1 Výstupy simulace na 1550 nm	18		
4.2 Vlnová délka 630 nm	19		
4.2.1 Výstupy simulace na 630 nm	20		
4.3 Vlnová délka 2000 nm	20		
4.3.1 Výstupy simulace na 2000 nm	21		
4.4 Mezní parametry svazku	22		
4.5 Návrh praktického řešení	22		
5 Metody měření	23		
5.1 Stopa pole	23		
5.2 Divergence svazku	23		
5.3 Útlum odrazu (Return loss)	24		
5.4 Vložný útlum (Insertion loss)	25		
6 Měření	27		
6.1 Uspořádání měření	27		
6.2 Vlnová délka 1550 nm	28		
6.2.1 Stopa pole	28		
6.2.2 Rozbíhavost	29		

Obrázky

2.1 Podélný řez optickým vláknem (Navázání světelného paprsku do vlákna pod mezním úhlem)	4
2.2 Stanovení velikosti MFD dle definice $1/e^2$	5
2.3 Sbíhající a rozbíhající se svazek a jeho divergence [4] (upraveno)	7
3.1 Různé druhy zabroušení ferule [12] (upraveno)	10
3.2 Svařování optických vláken	11
3.3 Transformace velikosti stopy svazku [4] (upraveno)	12
3.4 Princip kolimování čočkou svazku jdoucího ze zdroje s rozbíhavostí θ na svazek s rozbíhavostí ϑ	13
3.5 Optické dráhy paprsků ve vláknovém segmentu s gradientním indexem lomu; Profil indexu lomu ve vláknovém segmentu s gradientním indexem lomu [3] (upraveno)	14
3.6 Optické dráhy svazku vystupujícího z vláknového segmentu s gradientním indexem lomu [7]	14
4.1 Principiální 3D schéma kolimátoru	17
4.2 Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 1550 nm: 2D náčrtek	18
4.3 Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 1550 nm: 3D náčrtek	18
4.4 Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 630 nm: 2D náčrtek	19
4.5 Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 630 nm: 3D náčrtek	20
4.6 Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 2000 nm: 2D náčrtek	21
4.7 Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 2000 nm: 3D náčrtek	21
5.1 Schématický náčrtek měření divergence	24
5.2 Schématický náčrtek měření RL s pomocí optického cirkulátoru	25
5.3 Schématický náčrtek měření IL	25
6.1 Detail konce GRIN segmentu přilepeného do válcovité krytky	28
6.2 1550 nm: Závislost MFD na úhlu natočení	29
6.3 Příklady vzájemného natočení ferule a GRIN segmentu	30
6.4 1550 nm: Závislost RL na úhlu natočení	31
6.5 Navázání HeNe laseru do vlákna	32
A.1 Principiální 2D náčrtek kolimátoru pro 1550 nm	39
A.2 1550 nm: 3D profil pole	39
A.3 1550 nm: Profil pole - podélný řez	40
A.4 1550 nm: Dopadající svazek	41
A.5 1550 nm: Dopadající svazek - příčný řez	41
A.6 630 nm: 3D profil pole	42
A.7 630 nm: Profil pole - podélný řez	43
A.8 630 nm: Dopadající svazek	44
A.9 630 nm: Dopadající svazek - příčný řez	44
A.10 2000 nm: 3D profil pole	45
A.11 2000 nm: Profil pole - podélný řez	46
A.12 2000 nm: Dopadající svazek	47
A.13 2000 nm: Dopadající svazek - příčný řez	47
A.14 Uspořádání experimentu	48
A.15 Navázání svazku o vlnové délce 632 nm do vlákna	49

Tabulky

6.1 Data k rozbíhavosti na 1550 nm.	29
6.2 Data k rozbíhavosti na 630 nm..	32
B.1 Naměřené a vypočítané hodnoty na 1550 nm	51

Kapitola 1

Úvod

Vláknově-optické spoje jsou hojně využívanou a perspektivní technologií. Díky vysokým přenosovým rychlostem a nízkým měrným útlumům optických vláken postupně nahrazují metalické spoje téměř ve všech oblastech použití. Do průmyslových aplikací jsou optická vlákna implementována zejména kvůli jejich odolnosti na elektromagnetické rušení a nízké hmotnosti. Optické vláknová technika nalézá uplatnění také v široké škále senzorů a detektorů. V neposlední řadě se optická vlákna uplatňují v komunikačních technologiích a to v čím dál tím větší míře. V případě použití tzv. Fiber-to-the-home (FTTH) připojení jsou optická vlákna zavedena až do bytu uživatele. Do budoucna se optická vlákna a jejich aplikace budou dále rozvíjet například v podobě optických gyroskopů a interferometrů, případně v oblasti řezání, svařování a obrábění úzkým optickým svazkem.

Pro maximální využití optické trasy je však nutné optický signál v průběhu trasy upravovat. Mezi takové metody úprav patří aktivní zesilování, ale také kolimování optického svazku, které je nezbytné především při realizování optických spojů ve volném prostoru, tzv. free-space optics (FSO).

K základním použitím kolimátorů patří spojky určené pro vazbu optického svazku do jiného typu optického vlákna, na to se běžně používají kolimátory z vláknových segmentů s gradientním indexem lomu. Dalším příkladem aplikace kolimátorů jsou pasivní, reciproké rotační spojky, které umožňují přenášet optický signál přes otáčivá prostředí. V neposlední řadě se kolimátory běžně používají u optických spojů ve volném prostoru, jak již bylo zmíněno výše. V tomto případě jsou využívány především kolimátory s jednou nebo několika málo čočkami, z nichž vystupující svazek má poloměr řádově jednotky milimetrů.

Cílem práce je vytvořit simulaci a realizovat kolimátory splňující parametry pro zvolené aplikace pro vlnové délky 1550, 2000 a 630 nm s použitím jednovidového optického vlákna. Vlnová délka 1550 nm byla zvolena jako oblast častého nasazení FSO spojů. Pro oblast viditelného světla byla zvolena vlnová délka 630 nm, čili HeNe laser. Vlnová délka 2000 nm byla zvolena z důvodu přítomnosti "atmosférického okna", které se vyskytuje v oblasti přibližně 2000 až 2400 nm a v němž je útlum atmosféry nízký.

V úvodu práce jsou popsány základní parametry optických vláken relevantních u tématu kolimace, následuje kapitola o spojování vláken a principu

kolimace, po níž jsou zobrazeny výsledky simulací. Shrnutí výstupů ze simulací je pojato jako návrh praktického řešení kolimátorů na uvedených vlnových délkách. Před samotným měřením jsou rozebrány možné měření stopy pole, divergence svazku, útlumu odrazu a vloženého útlumu. Následuje experiment na vlnových délkách 1550 a 630 nm zkoumající definované parametry. Výstupy experimentální části jsou diskutovány vzhledem ke zvolené aplikaci a limitním parametrům.

Kapitola 2

Základní parametry optických vláken (pro kolimaci optického svazku)

V této kapitole jsou vysvětleny základní fyzikální parametry optických vláken relevantních k tématu kolimace optického svazku.

Tato práce se zabývá převážně jednovidovými optickými vlákny SMF (single-mode fiber) a proto zde není uvedeno mnoho podrobností o mnohovidových vláknech MMF (multi-mode fiber).

2.1 Numerická apertura (Numerical aperture)

Základním principem optických vláken je totální odraz signálu šířícího se jádrem vlákna - ve zjednodušené představě paprsek, který dopadá na rozhraní jádro/plášť pod úhlem ϕ_i menším nebo rovným úhlu akceptance ϕ_a , se odráží zpět do jádra [1]. Nutnou podmínkou totálního odrazu je, že paprsek přechází z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí (tzn. vyšší index lomu jádra než pláště), pak dochází k tzv. lomu od kolmice. S tímto jevem úzce souvisí numerická apertura (NA).

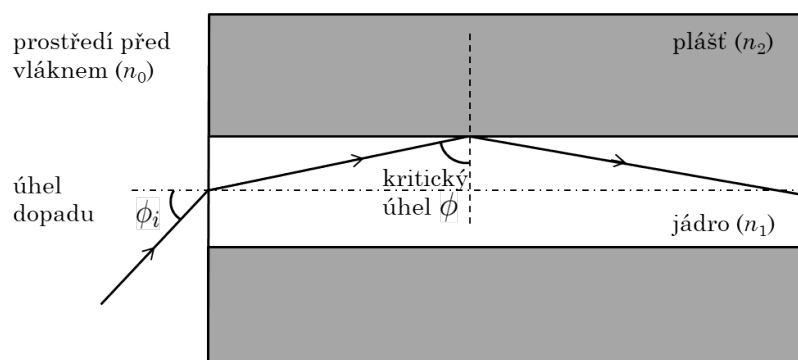
Numerická apertura u optických vláken označuje, nakolik je vlákno schopno vést optický signál vstupující do jádra. Tuto bezrozměrnou veličinu popisuje [2] rovnice

$$NA = n_0 \sin \phi_a = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.1)$$

kde n_0 je index lomu prostředí na vstupu vlákna (obvykle vzduch, $n_0 = 1$), n_1 je index lomu jádra optického vlákna, n_2 je index lomu pláště optického vlákna (platí $n_1 > n_2$) a ϕ_a je tzv. úhel akceptance, neboli mezní úhel navázání. Pro úhel dopadu paprsku ϕ_i platí [3], že aby došlo k navázání paprsku a aby byl dále veden v jádře, pak $0 \leq \phi_i \leq \phi_a$. Rovnice (2.1) neplatí pro vlákna s gradientním indexem lomu a vlákna mnohovidová, u nich se NA zjišťuje experimentálně.

Situace pro výpočet numerické apertury popsaná výše je zobrazená na obr. 2.1.

U všech materiálů (a tedy i u těch, z nichž jsou vyráběna optická vlákna) platí, že jejich index lomu závisí na vlnové délce vedeného světla [4]. Důsledkem tohoto jevu je materiálová disperze, ta se projevuje vznikem zpožděním přenosu jednotlivých vlnových délek při průchodu pulzu složeného z více



Obrázek 2.1: Podélný řez optickým vláknem (Navázání světelného paprsku do vlákna pod mezním úhlem)

frekvencí. Díky změně indexu lomu dojde k ovlivnění velikosti numerické apertury pro různé vlnové délky.

Typické hodnoty numerické apertury pro jednovidová vlákna [5] pro vlnovou délku 1550 nm jsou přibližně 0,13 až 0,21 - záleží na konkrétním typu vlákna. Pro vlnovou délku 630 nm bývají hodnoty NA nižší - řádově 0,10 až 0,14. Vlákna pro vlnovou délku 2000 nm mívají NA rovno přibližně 0,11 až 0,13.

2.2 Stopa pole (Mode Field Diameter)

Jak je psáno v [6], nejmenší poloměr volně se šířícího optického svazku je roven w_0 , viz obr. 2.3. Pro mnohovidová vlákna se udává hodnota šířky jádra, zatímco u jednovidových se mluví o průměru stopy pole, neboli Mode Field Diameter (MFD). Jelikož pole proniká do pláště v okolí jádra, není u jednovidových vláken průměr stopy pole roven průměru jádra. Průměr stopy pole u jednovidového vlákna je definován pomocí radiální intenzity svazku.

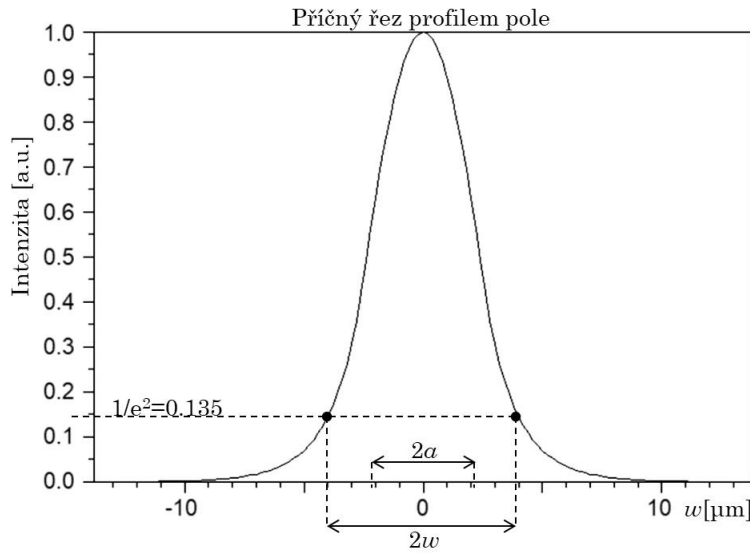
Radiální intenzita stopy pole s gaussovským průběhem intenzity ve vzdálenosti w od středu jádra se v [6] definuje jako

$$I(w) = I_0 e^{-2(\frac{w}{w_0})^2} = I_0 e^{-2(\frac{d}{d_0})^2}, \quad (2.2)$$

kde I_0 je maximální intenzita svazku a $2w_0$ (resp. d_0) šířka optického svazku rovna velikosti stopy pole. To vychází z rovnosti $w = w_0$, ze které vyplývá, že intenzita výkonu $I(w_0)$ je rovna 0,135 násobku maximálního výkonu $I(0)$, protože $1/e^2 = 0,135 = 13,5\%$. Grafické znázornění definice MFD je vyobrazeno na obr. 2.2. Je důležité podotknout, že definice MFD s pomocí $1/e^2$ není jediná existující - neřádka bývá nahrazována např. definicí s pomocí $1/e$. [7]

Parametr stopy pole je podle [7] funkcí vlnové délky, poloměru jádra a indexů lomů jádra a pláště. Tyto závislosti vyplývají z definice w_0 . Dle [7] je možné w_0 definovat aproximací

$$w_0 = a(0,65 + 1,62V^{-3/2} + 2,88V^{-6}), \quad (2.3)$$



Obrázek 2.2: Stanovení velikosti MFD dle definice $1/e^2$

kde a je poloměr jádra a V je normovaný kmitočet.

Normovaný kmitočet, který v anglické literatuře bývá označován jako V-number, je v [4] definován jako

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2.405, \quad (2.4)$$

kde n_1, n_2 jsou indexy lomu jádra a pláště, a je poloměr jádra vlákna a λ je vlnová délka použitého záření ve volném prostoru. Hodnota normovaného kmitočtu [8] je pro dominantní vid jednovidového vlákna menší nebo rovna hodnotě 2,405. Z toho vyplývá, že jednovidová optická vlákna s malým poloměrem jádra musí mít pro dodržení jednovidovosti vyšší hodnotu numerické apertury pro stejnou hodnotu mezní vlnové délky λ_c (pro definici viz kapitulu 2.3), jak již bylo zmíněno v pojednání o numerické apertuře.

Se stopou pole úzce souvisí také veličina efektivní plochy. Ta představuje velikost plochy jádra optického vlákna, kterou prochází výkon, a je definována vzorcem [8]

$$A_{\text{eff}} = \pi \frac{\text{MFD}^2}{4}. \quad (2.5)$$

Stopa pole je jeden z parametrů, který výrobci uvádějí u jednovidových vláken. Protože je ale stopa pole závislá na vlnové délce, často se u jednotlivých vláken uvádí více hodnot MFD podle použité vlnové délky. Kupříkladu k vláknu SMF-28-J9 od ThorLabs, Inc. [5] jsou uvedeny hodnoty stopy pole pro vlnové délky 1310 nm ($9,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$) a 1550 nm ($10,4 \pm 0,5 \mu\text{m}$).

2.3 Mezní vlnová délka (Cut-off wavelength)

Schopnost optického vlákna vést pouze jeden vid je dána její vlnovou délkou, tu limituje parametr zvaný mezní vlnová délka λ_c . Parametr mezní vlnové délky

Vložný útlum se vypočítává z P_{in} , což je výkon vcházející do optické soustavy, a P_{out} , který představuje výstupní výkon. Stejně jako u RL jsou jednotkou této veličiny dB. Některé z příčin vzniku vložného útlumu mohou být nedokonalosti na površích spojovaných vláken, případně rozdílné velikosti efektivních ploch A_{eff} . Obecně ztráta výkonu signálu bývá výsledkem vložení pasivní komponenty, jako je např. konektor, do optické sítě. [7]

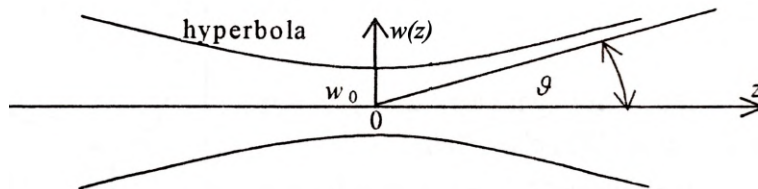
2.6 Divergence svazku

Další klíčový parametr optických svazků se nazývá divergence, neboli rozbíhavost svazku. Divergence svazku popisuje [8], jak rychle se měřený svazek rozbíhá od optické osy v závislosti na vzdálenosti ve směru šíření.

Každý paprsek, šířící se prostředím, mění svoje MFD - buďto se rozbíhá (paprsek divergentní) nebo sbíhá (paprsek konvergentní). Asymptotickým přiblížením tvaru křivky tohoto rozbíhání pro velkou vzdálenost od nejužšího bodu svazku je hyperbola. Divergence svazku je definovaná jako úhel ϑ , který svírá tečna k této hyperbole s optickou osou. Tento úhel se nazývá divergenční úhel a jeho velikost je dána [4] vztahem

$$\text{tg}\vartheta \approx \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi w_0}, \quad (2.11)$$

kde $w(z)$ je šířka svazku v daném bodě svazku. Všechny popsané veličiny jsou zakresleny v obrázku 2.3



Obrázek 2.3: Sbíhající a rozbíhající se svazek a jeho divergence [4] (upraveno)

Svazky, jejichž divergence je velmi malá, se nazývají kolimované svazky. Typické hodnoty [5] divergence pro kvalitní kolimátory sestavené z několika čoček a optimalizované pro vlnovou délku 1550 nm se obvykle pohybují v rozmezí 0,005° až 0,120°. Optické prvky s nízkou divergencí mají využití v optických spojích ve volném prostoru, tzv. FSO.

Kapitola 3

Vazba mezi optickými vlákny

V této kapitole jsou popsány možnosti spojování optických vláken mezi sebou, navazování signálu z volného prostoru do vlákna a princip kolimování pomocí různých metod (čočky, GRIN segmenty vlákna).

3.1 Spojování optických vláken

Navazování optického signálu do vlákna je jedním z kritických bodů optické trasy, při kterém může docházet k velkým ztrátám. Proto jsou kladeny velké nároky na kvalitu provedení.

Spoje vláken se dělí na dvě hlavní skupiny: na trvalé a demontovatelné spoje. Trvalé spoje (viz kapitola 3.1.2 Trvalé spoje) jsou obvykle realizovány pomocí svařování. Demontovatelným spojům je věnována část 3.1.1 Optické konektory. Avšak přestože jsou konektory nebo svar kvalitní, vždy se na spoji objeví alespoň minimální útlum. [11]

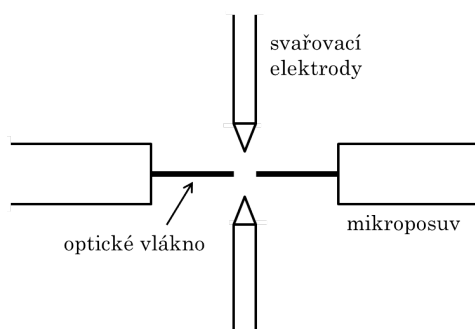
3.1.1 Optické konektory

V některých aplikacích je požadována snadná rozpojitelnost spoje, v takových případech se obvykle volí spojení optických vláken pomocí optických konektorů, jakožto snadnou variantu demontovatelného spoje.

Dobrý konektor splňuje požadavky na snadné a rychlé ovládání, avšak jedním z nejdůležitějších parametrů je útlum, který by měl být co nejnižší (pro kvalitní konektory obvykle 0,2 dB). Mezi nejčastější důvody ztrát výkonu na konektorech patří různé velikosti numerické apertury spojovaných vláken nebo velikostí jader (resp. MFD u jednojádřových vláken), nesouosost vláken, odrazy od konců vláken, nečistoty, škrábance a další nedokonalosti na konci vláken atd. [7]

Dále [3] musí být zajištěna spolehlivá opakovatelnost spojení a to tak, aby nedocházelo k problémům s navázáním optického signálu do vlákna. V neposlední řadě plní konektor funkci mechanické ochrany konce vlákna při manipulaci s ním, musí odolat tahu vláken a také vlhkosti, prachu apod.

Konektory se liší především tvarem přední části konektoru, tzv. ferule. Nejčastějšími typy [12], viz obr. 3.1, jsou:



Obrázek 3.2: Svařování optických vláken

Alternativou ke svarům jsou mechanické gelové spojky [3], které byly hojně používány v minulosti, kdy nebyly dostupné kvalitní svářečky. Jejich princip je jednoduchý - mezi dvě vlákna je nanesen gel s vhodným indexem lomu, následně jsou vlákna mechanicky spojena.

3.2 Navazování světla do optického vlákna

Při navazování optického svazku do vlákna je nutné zajistit, aby byl průměr svazku v místě vstupu menší nebo roven průměru jádra (u jednovlákenných vlákenných MFD) optického vlákna a zároveň aby maximální úhel, pod kterým světlo dopadá na čelo optického vlákna, byl menší než numerická apertura daného vlákna. Těchto podmínek se dá dosáhnout použitím různých navazovacích technik, např. čočkou nebo využitím GRIN vlákna.

3.2.1 Navazování pomocí čoček

Klasická čočka o konstantním indexu lomu je popsána ohniskovou vzdáleností f , která je dána [4] vzorcem

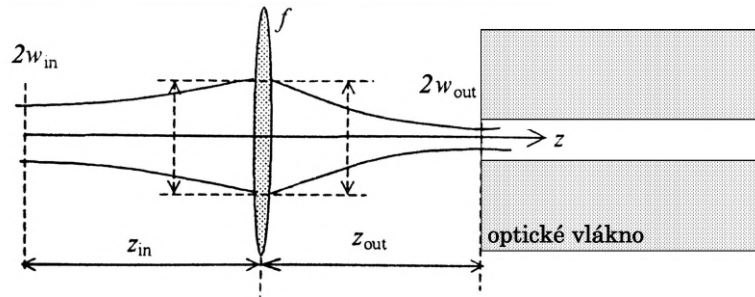
$$f = \frac{\pi w_{\text{in}} w_0}{\lambda}, \quad (3.1)$$

kde f je požadovaná ohnisková vzdálenost čočky, $2w_{\text{in}}$ hodnota MFD kolimovaného svazku vstupujícího do čočky a $2w_0$ hodnota MFD sfokusovaného, vystupujícího svazku.

Ohnisková vzdálenost f bývá nazývána také jako vazební délka [4], jakožto vzdálenost, do které se má umístit čočka, aby transformovala poloměr vstupujícího svazku w_{in} na poloměr w_0 svazku vystupujícího. Proces transformace lze zhlédnout na obr. 3.3.

S pomocí vzorce (3.1) určíme potřebnou čočku, kterou následně umístíme do Rayleighovy vzdálenosti z_0 , definované v [4] jako

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}, \quad (3.2)$$



Obrázek 3.3: Transformace velikosti stopy svazku [4] (upraveno)

kde w_0 je minimální MFD optického svazku. Obecné MFD lze podle [4] zpětně definovat z Rayleighovy vzdálenosti jako

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}}. \quad (3.3)$$

Dle [4] je tedy Rayleighova vzdálenost definovaná jako vzdálenost nejužšího místa svazku a jeho $\sqrt{2}$ násobku. Výhodou užití vzdálenosti z_0 jako optimální pro umístění čočky je, že v Rayleighovy vzdálenosti má nejmenší poloměr křivosti vlnoplochy $R(z)$.

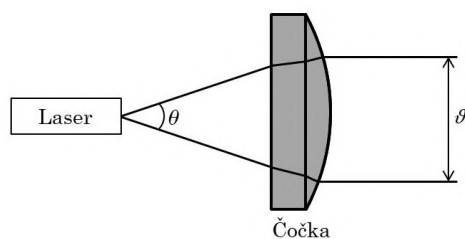
Alternativou k použití čočky je volba vhodného vláknového segmentu. Tyto čočky s gradientním indexem lomu jsou popsány dále.

3.3 Navazování pomocí kolimátorů

V některých aplikacích potřebujeme optický svazek vést ve volném prostředí. Pokud bychom optický svazek před výstupem z vlákna neupravovali, začal by se rozbíhat, jeho šířka by se rozšiřovala a takový optický svazek by bylo náročné opět navázat do vlákna. Proto je nutné upravit optický svazek do podoby vhodné k šíření ve volném prostoru. Takové vlastnosti splňuje kolimovaný svazek.

Kolimovaný svazek [15] je takový svazek, který se v prostoru šíří rovnoběžně v tom smyslu, že se jeho šířka nezvětšuje. Jejich divergence je tedy v ideálním případě nulová, svazek je zaostřen do nekonečna a stopa pole ideálně kolimovaného svazku zůstává po celou svoji trasu konstantní. Optická trasa kolimovaného svazku je v optimálním případě taková, že při umístění druhého kolimátoru proti prvnímu nedochází ke zvyšování ztrát.

Kolimátor je taková součástka, která dokáže upravit svazek jí procházející tak, aby byl co nejpodobnější svazku kolimovanému, jak je popsán výše. Tyto součástky se používají k přizpůsobení rozbíhavosti a šířky optického svazku požadovaným způsobem tak, aby byl zajištěn vysoký přenos výkonu optické trase. Kolimátor se skládá z jednovidového, případně mnohovidového, vlákna a kolimujících čoček. Kolimátory mohou být použity [16] nejen k vytvoření svazku s malou divergencí, ale také k zaostření svazku rozbíhavého svazku, případně k zaostření kolimovaného svazku, nebo k rozšíření kolimovaného svazku.



Obrázek 3.4: Princip kolimování čočkou svazku jdoucího ze zdroje s rozbíhavostí θ na svazek s rozbíhavostí ϑ

K sestrojení kolimovací soustavy se používá mnoho druhů čoček [17], například vláknové čočky (fiber lenses), kulové čočky (ball lenses), asférické čočky (aspherical lenses), sférické singlety a dublety (spherical singlets, spherical doublets), válcové čočky (cylindrical lenses), GRIN čočky (GRAded INdex lenses - viz níže) a další.

■ 3.3.1 Kolimátory na bázi vláknového segmentu s gradientním indexem lomu

Jedny z dnes často používaných [17] kolimátorů jsou tvořené optickými elementy s gradientním indexem lomu, a to GRIN čočkami respektive segmenty GRIN vláken, které jsou pomocí jednoduché ferule napojeny na vlákno. Tyto kolimátory dosahují zaostření právě díky plynulé změně indexu lomu v materiálu čočky.

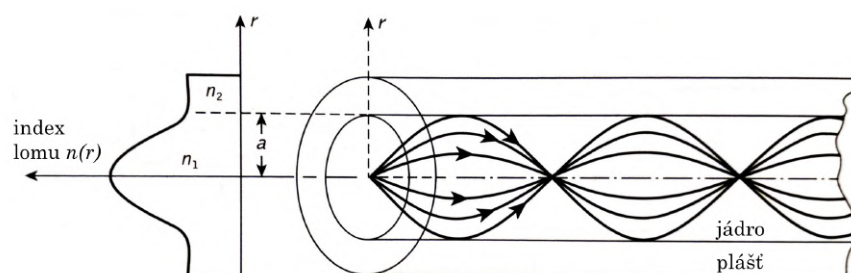
Profil indexu lomu v segmentu s gradientním indexem lomu je zobrazen na obr. 3.5, kde $n(r)$ je gradientně se měnící index lomu závislý na vzdálenosti r od osy segmentu podle vzorce [5]

$$n(r) = n_1 \left(1 - \frac{(r\sqrt{A})^2}{2} \right), \quad (3.4)$$

kde \sqrt{A} je gradientní konstanta s jednotkou mm^{-1} a radiální pozice r se hodnotami pohybuje v rozmezí $-d/2$ do $+d/2$, kde d je průměr vláknového segmentu. Toto znamená, že ve středu vlákna, na jeho optické ose, je index lomu nejvyšší, plynule se mění až po okraj jádra a dále se již nemění. Tento profil indexu lomu má za následek [18] ohyb dráhy paprsků procházejících jádrem do sinusovek, které mají stejnou periodu a rozdílné amplitudy, viz obr. 3.5.

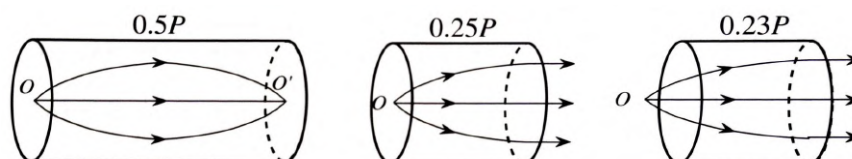
U vláknových segmentů se udává tzv. pitch [5], který představuje jednu periodu sinusového průběhu v GRIN vlákně (funguje stejně u GRIN čočky). Výrobci uvádějí pitch v souvislosti s délkou segmentu Z vzhledem k vlnové délce λ , pro kterou je daná součástka určena. Pro výpočet parametru P , jak bývá pitch označován, se používá vzorec

$$P = \frac{\sqrt{AZ}}{2\pi}. \quad (3.5)$$



Obrázek 3.5: Optické dráhy paprsků ve vláknovém segmentu s gradientním indexem lomu; Profil indexu lomu ve vláknovém segmentu s gradientním indexem lomu [3] (upraveno)

Z tohoto vztahu vyplývá, že pitch je bezrozměrná veličina. Standardní velikosti P bývají rovny 0,29 nebo 0,23 a to v závislosti na zakončení vláknového GRIN segmentu. Jak vláknové GRIN segmenty tak GRIN čočky mohou být zakončené rovně nebo i zkoseně, většinou pod úhlem 8° , pro minimalizování výkonu odraženého se zpět do zdroje. Kupříkladu GRIN čočka GRIN2908 [5], optimalizovaná pro vlnovou délku 830 nm, má pitch 0,29. Pro znázornění vlivu veličiny pitch na rozbíhavost svazku vystupujícího z optického elementu s gradientním indexem lomu je zde uveden obr. 3.6.



Obrázek 3.6: Optické dráhy svazku vystupujícího z vláknového segmentu s gradientním indexem lomu [7]

Jako kolimátory [5] se vláknové GRIN segmenty i GRIN čočky používají v kombinaci s ferulí napojenou na 10-50 cm dlouhý úsek vlákna, který je zakončen konektorem - takováto ferule bývá v anglické literatuře označována jako pigtailed ferrule.

Výhodami GRIN čoček jsou jejich malé rozměry a hmotnost, nenáročnost na obsluhu (jelikož typicky nejsou laditelné) a relativně nízká cena. Nevýhodou jsou rozměry GRIN čoček, které limitují použitelné vlnové délky. Jak již bylo zmíněno výše, kolimátory s GRIN čočkami často nalézají uplatnění telekomunikacích.

3.3.2 Volba řešení vzhledem k cílové aplikaci

Každá z výše uvedených metod vazby optického signálu z/do optického vlákna má své přednosti a negativa. Z hlediska složitějších systémů čoček se sférické dublety (triplety) používají pro větší stopu pole (1 až 5 mm), které dokáží kolimovat svazek na větší vzdálenost jednotek metrů a umožňují tak přenos signálu s minimální ztrátou, avšak za vyšší cenu nežli GRIN kolimátory.

Kolimátory využívající GRIN čoček (vláknových GRIN segmentů) mají menší stopu pole, proto se hojně uplatňují v telekomunikačních zařízeních, kde je menší stopa pole dostačující.

Podrobnějšímu zkoumání podrobíme kolimátory na bázi GRIN čoček, jelikož nejvíce vyhovují našim požadavkům na laditelnost výstupní stopy pole, rozbíhavosti optického svazku a variabilitě výsledné konfigurace kolimátoru.

Kapitola 4

Simulace

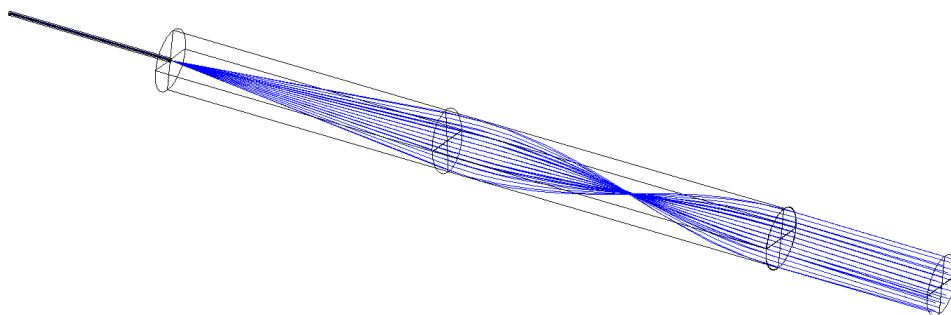
Následující kapitola popisuje výstupy ze simulací, provedených v programu OpticStudio™ Zemax.

V jednotlivých podkapitolách pro 1550 nm, 630 nm a 2000 nm jsou popsány fyzické parametry jednotlivých kolimátorů spolu s hodnotami nasimulovaných veličin stopy pole, vložného útlumu a divergence svazku. Na závěr samostatná podkapitola shrnuje návrh praktického řešení uvedených kolimátorů.

4.1 Vlnová délka 1550 nm

Na obr. 4.1 a A.1 (obrázky a tabulky označené velkými písmeny jsou umístěné v příloze na konci práce) je zobrazen princip kolimování pomocí gradientních segmentů - GRIN čočka plynule mění dráhu paprsků a vhodnou volbou délky jednotlivých částí soustavy se vystupující svazek stává rovnoběžným. Tento princip byl již popsán výše a obrázky 4.1 a A.1 jsou pouze ilustrativní a reálná podoba kolimátoru je zobrazena níže.

K vytvoření kolimátoru vhodného pro vlnovou délku **1550 nm**, viz obr. 4.2 a 4.3, bylo použito konvenční křemenné vlákno **SMF-28** od ThorLabs, Inc. [5] se stopou pole o poloměru $10,4 \pm 0,5 \mu\text{m}$ pro 1550 nm, poloměrem pláště $125 \mu\text{m}$, numerickou aperturou **0,14** a indexem lomu jádra **1,4677** pro vlnovou délku 1550 nm. Zde zobrazený kolimátor má rozměry, odpovídající katalogovému listu výrobce.

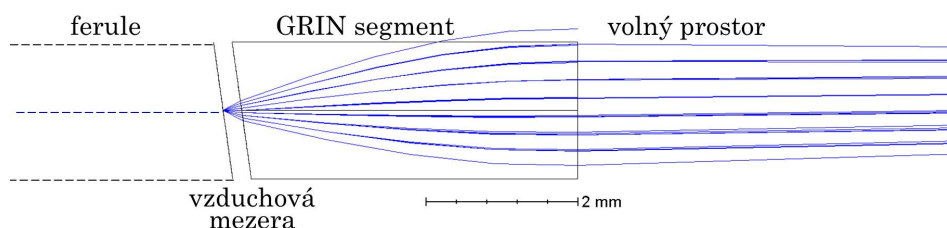


Obrázek 4.1: Principiální 3D schéma kolimátoru

Mezi samotnou GRIN čočkou, která tvoří klíčovou část tohoto seskupení, a

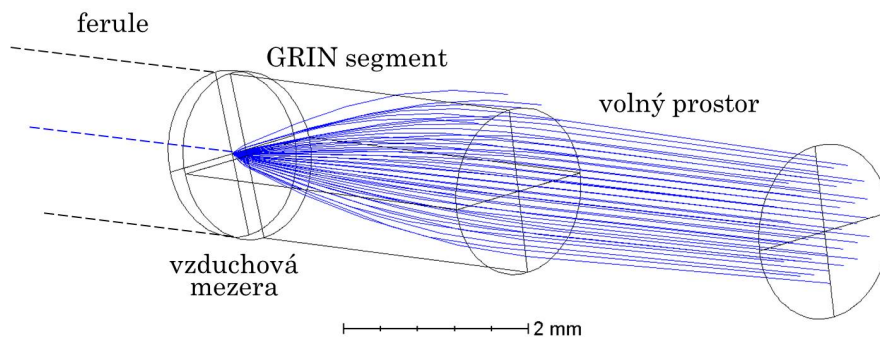
ferulí je vzduchová mezera o tloušťce **0,245 μm** .

Za GRIN čočku jsem zvolila **GRIN2315A** opět od ThorLabs, Inc. [5]. Tento vláknový segment s gradientním indexem lomu je od výrobce optimalizovaný pro vlnovou délku **1560 nm**. Délka segmentu je **4,43 mm**, jeho průměr d je 1,8 mm a numerická apertura je rovna hodnotě 0,46. Ze vstupní strany je, pro snížení odrazivosti, čočka zkosená pod úhlem 8° , navíc je pokryta antireflexní vrstvou. Nejvyšší hodnota index lomu n_1 této GRIN čočky je **1,5901**, gradientní konstanta \sqrt{A} je rovna hodnotě **0,326**. Před vzduchovou mezerou se nachází ferule, do níž je připevněno jendovidové vlákno **SMF-28e+** od ThorLabs, Inc. s mezní vlnovou délkou **<1260 nm**.



Obrázek 4.2: Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 1550 nm: 2D náčrt

Délky jednotlivých segmentů jsou optimalizovány tak, aby byly vycházející paprsky rovnoběžné, čili aby byl optický svazek zcela kolimovaný. Navržený systém je reciprokový (viz níže - výstup simulace, parametr IL).



Obrázek 4.3: Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 1550 nm: 3D náčrt

4.1.1 Výstupy simulace na 1550 nm

Parametry, zjišťované simulacemi, jsou stopa pole, vložný útlum a divergence svazku.

Program měří parametr nazvaný RMS Spot Radius, který představuje hodnotu poloviny MFD. Na základě simulace byla tedy hodnota stopy pole při výstupu z kolimátoru stanovena na **1,13 mm**. Výrobce gradientního segmentu neuvádí katalogovou hodnotu MFD a proto bude porovnání provedeno až

v kapitole 6 o měření. V příloze na obr. A.4 je vykreslen dopadající svazek, na obr. A.3 a A.2 je zobrazen profil dominantního vidu. Je zřejmé, že profil svazku není dokonale gaussovský, to je pravděpodobně způsobeno zkosením vstupní strany GRIN segmentu, díky kterému se svazek posune ke straně.

K výpočtu nasimulovaného vložného útlumu byl použit vzorec (2.10) uvedený výše. Výsledná hodnota vložného útlumu je **0,16 dB**. V příloze na obr. A.5 je vykreslen výkon svazku na výstup u kolimátoru s číselnými hodnotami.

Posledním simulovaným parametrem je rozbíhavost svazku. Jako hodnotu divergence pro kolimátory s GRIN segmentem uvádí výrobce $0,250^\circ$. Dle simulace je divergence kolimátoru na 1550 nm rovna **$0,265^\circ$** .

Parametr útlumu odrazu je tak malý, že se v simulaci nezobrazuje.

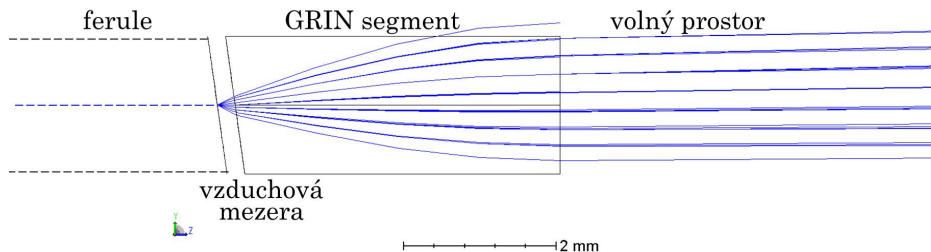
4.2 Vlnová délka 630 nm

Simulace kolimátoru na této vlnové délce je analogické k simulaci kolimátoru pro 1550 nm, pro snadnější orientaci v textu jsou změněné parametry zvýrazněny tučným písmem.

K vytvoření kolimátoru vhodného pro vlnovou délku **630 nm**, viz obr. 4.4 a 4.5, bylo uvažováno konvenční jednovidové křemenné vlákno **S630-HP** od ThorLabs, Inc. [5] se stopou pole o poloměru **$4,2 \pm 0,5 \mu\text{m}$** pro 630 nm, poloměrem pláště $125 \mu\text{m}$, numerickou aperturou **0,12** a indexem lomu jádra **1,4615** pro vlnovou délku 600 nm. Zde zobrazený kolimátor má rozměry, odpovídající katalogovému listu výrobce.

Mezi samotnou GRIN čočkou, která tvoří klíčovou část tohoto seskupení, a ferulí je vzduchová mezera o tloušťce **$0,234 \mu\text{m}$** .

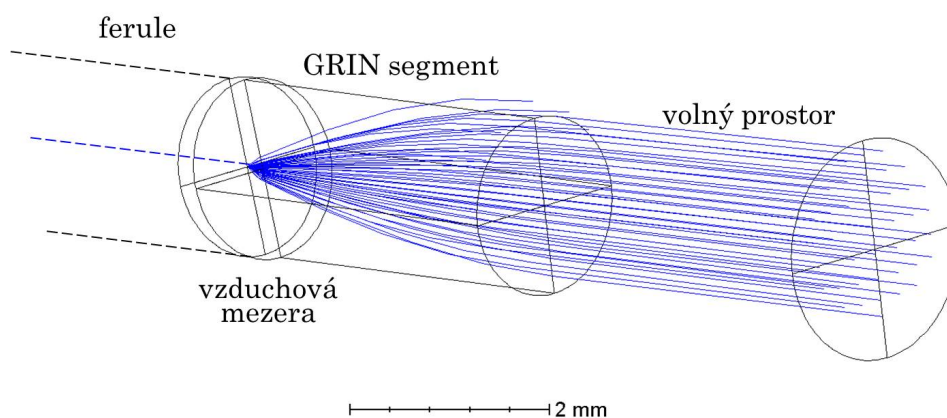
Za GRIN čočku jsem zvolila **GRIN2306A** opět od ThorLabs. [5]. Tento vláknový segment s gradientním indexem lomu je od výrobce optimalizovaný pro vlnovou délku **630 nm**. Délka segmentu je **4,10 mm**, jeho průměr d je 1,8 mm a numerická apertura je rovna hodnotě 0,46. Z jedné strany je pro snížení odrazivosti, čočka zkosená pod úhlem 8° , navíc je pokryta antireflexní vrstvou. Nejvyšší hodnota index lomu n_1 této GRIN čočky je **1,6073**, gradientní konstanta \sqrt{A} je rovna hodnotě **0,339**. Před vzduchovou mezerou se nachází ferule, do níž je připevněno jednovidové vlákno **SM600** s mezní vlnovou délkou **500 - 600 nm**.



Obrázek 4.4: Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 630 nm: 2D náčrt

Délky jednotlivých segmentů jsou optimalizovány tak, aby byly vycházející

paprsky rovnoběžné, čili aby byl optický svazek zcela kolimovaný. Navržený systém je reciproký.



Obrázek 4.5: Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 630 nm: 3D náčrtek

4.2.1 Výstupy simulace na 630 nm

Parametry, zjišťované simulacemi, jsou stopa pole, vložný útlum a divergence svazku.

Na základě simulace byla hodnota stopy pole při výstupu z kolimátoru stanovena na **0,884 mm**. Ani u tohoto kolimátoru neuvádí výrobce katalogovou hodnot MFD a proto nebylo možné tyto hodnoty porovnat. V příloze na obr. **A.7** a **A.6** je zobrazen profil dominantního vidu s hodnotami.

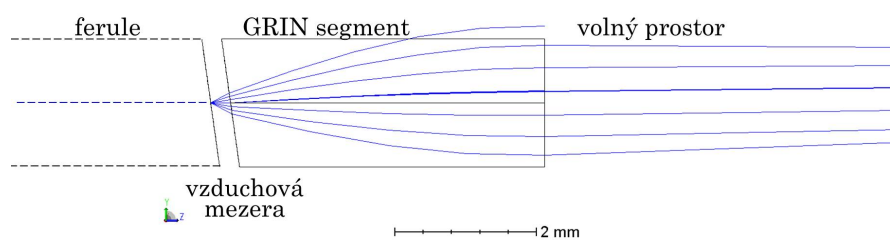
Výsledná hodnota vložného útlumu, vypočítaná z nasimulovaných hodnot, je **0,03 dB**. V příloze na obr. **A.9** je vykreslen výkon svazku na výstup u kolimátoru s číselnými hodnotami.

Posledním studovaným parametrem je rozbíhavost svazku. Hodnota divergence pro kolimátory s GRIN segmentem pro vlnovou délku 630 nm není výrobcem uvedena. Dle simulace je divergence kolimátoru na 630 nm rovna **0,127°**. Tato hodnota je přibližně poloviční oproti hodnotě nasimulované na 1550 nm.

4.3 Vlnová délka 2000 nm

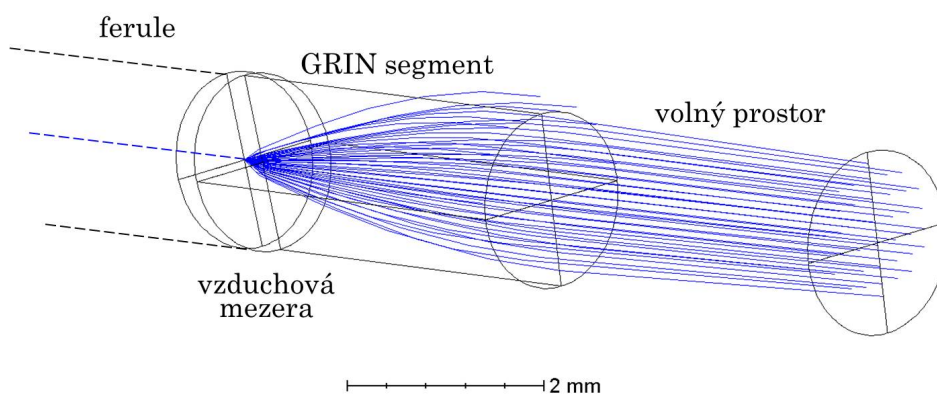
Pro vlnovou délku 2000 nm není na trhu k dispozici kolimátor s vláknovým segmentem s gradientním indexem lomu analogický k uvedeným kolimátorům pro 1560 nm a 630 nm. Nejbližše k požadované vlnové délce 2000 nm je k dispozici čočka GRIN2315A [5], zmíněná již výše.

K vytvoření kolimátoru vhodného pro vlnovou délku **2000 nm**, viz obr. **4.6** a **4.7**, byl použit kolimátor z GRIN čočky **GRIN2315A** a vhodné ferule pro 1550 nm, avšak vzduchová mezera mezi GRIN čočkou a ferulí byla upravena na tloušťku **0,280 μm**. Další parametry tohoto kolimátoru již byly popsány výše.



Obrázek 4.6: Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 2000 nm: 2D náčrtek

Délky vzduchové mezery byla vybrána tak, aby byly výstupní parametry optimální. Čili aby byl optický svazek pro danou vlnovou délku co nejlépe kolimovaný. Navržený systém je opět reciprokový, viz simulace IL.



Obrázek 4.7: Schématické zobrazení jednotlivých komponent tvořících model kolimátoru na 2000 nm: 3D náčrtek

4.3.1 Výstupy simulace na 2000 nm

Parametry, zjišťované simulacemi, jsou stopa pole, vložný útlum a divergence svazku.

Na základě simulace byla hodnota stopy pole při výstupu z kolimátoru stanovena na **0,962 mm**. Výrobce gradientního segmentu ovšem neuvádí katalogovou hodnotu MFD pro tuto vlnovou délku a proto nebylo možné tyto hodnoty porovnat. V příloze na obr. **A.11** a **A.10** je zobrazen profil dominantního vidu s hodnotami.

Přestože je používaný kolimátor určen pro jinou vlnovou délku, potvrdil se předpoklad, že i zde bude hodnota vložného útlumu podobná hodnotě IL pro 1550 nm. Výsledná hodnota vložného útlumu, vypočítaná z nasimulovaných hodnot, je **0,18 dB**.

Z toho vyplývá, že posun používané vlnové délky o 440 nm oproti návrhové vlnové délce 1560 nm, nemá na přenášený výkon příliš dramatický vliv. V příloze na obr. **A.13** je vykreslen výkon svazku na výstup u kolimátoru s číselnými hodnotami.

Posledním simulovaným parametrem je rozbíhavost svazku. Hodnota divergence pro kolimátory s GRIN segmentem uvedená výrobcem je $0,250^\circ$. Dle simulace je divergence kolimátoru GRIN2315A při použití vlnové délky 2000 nm rovna $0,270^\circ$. Divergence je tedy pro zvolenou velikost vzduchové mezery ještě lepší než rozbíhavost svazku při použití vlnové délky 1550 nm a kratší vzduchové mezery.

4.4 Mezní parametry svazku

Na základě simulací lze vyvodit, že mezními parametry svazku pro kolimátor pro vlnovou délku 1550 nm jsou pro MFD 1,13 mm rozbíhavost rovna $0,265^\circ$ a zároveň limitní ztráty pro spoj s kolimátorem jsou 0,58 dB. U kolimátoru pro vlnovou délku 630 nm je rozbíhavost pro MFD 0,884 mm rovna $0,127^\circ$, limitní ztráty pro takovýto kolimátor jsou 0,78 dB. Pro kolimátor upravený z vlnové délky 1550 nm na vlnovou délku 2000 nm se změnil rozbíhavost pro MFD 0,962 mm na $0,270^\circ$ a stejně tak limitní ztráty vzrostou na 1,12 dB.

4.5 Návrh praktického řešení

K fyzickému sestavení kolimátorů budou použity součástky od ThorLabs, Inc. [5]. Před vláknové segmenty s gradientním indexem lomu GRIN2315A a GRIN2306A budou umístěny ferule z borosilikátového skla, které budou zakončené FC/APC konektorem, do něhož bude možné napojit další vlákno. Další možností, mimo použití těchto tzv. pigtailed ferulí (ferule, z níž vede optické vlákno), je na pigtailed feruli bez konektoru navařit segment vlákna, který by byl zakončený požadovaným konektorem. Výhodou tohoto řešení jsou nižší pořizovací náklady na ferule. Nevýhodou nutnost sváření nebo jiného spojování optického vlákna vedoucího z ferule s optickým vláknem zakončeným konektorem. Níže však předpokládám použití ferulí s optickým vláknem zakončeným konektorem.

Pro 630 nm je nejvhodnější ferule SMPF0106-APC [5] s numerickou aperturou 0,12, pro 1550 nm a 2000 nm bude použita ferule SMPF0115-APC s numerickou aperturou 0,14. Ferule SMPF0115-APC je sice optimalizovaná pro vlnovou délku 1550 nm, avšak vzhledem k výsledkům simulace lze očekávat podobně dobré výsledky i z měření.

Vláknový segment s gradientním indexem lomu a ferule budou umístěny do válcovité krytky,

Celý kolimátor bude mechanicky chráněn válcovitou krytkou dlouhou 10 mm, kterou je možné popsat také jako skleněnou kapiláru, a do níž se vloží gradientní segment i ferule zkosenými stranami k sobě. Očekává se možnost potřeby použití optického lepidla.

Kapitola 5

Metody měření

V této kapitole jsou popsány základní metody měření MFD, divergence svazku, RL a IL, včetně konkrétních uspořádání použitých v experimentální části práce.

5.1 Stopa pole

Jelikož patří stopa pole, neboli MFD, mezi jeden z nejdůležitějších parametrů v rámci této práce, je její měření zcela nezbytné.

Princip měření [19] spočívá v tom, že se pomocí profiloměru, anglicky beam profiler, což může být např. dvou-dimenzionální CCD kamera, skenuje tzv. vzdálené pole (Far-Field), které zachycuje profil intenzity svazku a získá se dvou-dimenzionální matice dat. Z těchto dat se zjistí maximální intenzita svazku, z ní se vypočítá hodnota $1/e^2$ a z matice naměřených dat se určí taková šířka pole, pro niž má svazek intenzitu rovnou e^{-2} násobku maximální intenzity. Tento postup vyplývá z definice stopy pole, viz obr. 2.2.

Při měření blízkého pole (Near-Field) je možné [20] zjistit pouze parametr MFD. Při měření vzdáleného pole (Far-Field) z větší vzdálenosti lze získat informace i o dalších parametrech svazku, jako je například jeho divergence [19]. Pro vlákna s Gaussovským profilem pole se hodnoty MFD změřené v blízkém a vzdáleném poli téměř shodují. Pokud není profil vidů gaussovský, stopa pole změřená ve vzdáleném poli bývá výrazně nižší.

Měření se většinou provádí ve vzdáleném poli, které je definované tak, že vzdálenost kamery, resp. fotodetektoru, snímající pole je mnohem větší než Rayleighova vzdálenost z_0 . Při měření v blízkém poli [11] je obvykle nutné zvětšit obraz z vlákna pomocí čoček.

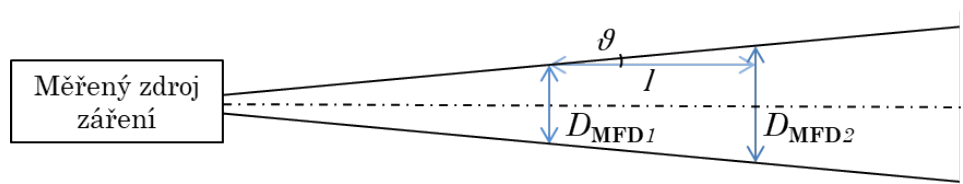
5.2 Divergence svazku

Jedna z možných metod [21] je měření úhlu ve vzdáleném poli. Měření probíhá s pomocí laseru, optického vlákna, případně jiné optické komponenty, jejíž divergenci chceme změřit, a CCD kamery. Při použití této metody je nezbytné znát vzdálenost optické komponenty od kamery detektoru. K samotnému

výpočtu použijeme vzorec

$$\vartheta = \arctan\left(\frac{D}{2l}\right), \quad (5.1)$$

kde ϑ je hledaná divergence, D je naměřená MFD a l je známá vzdálenost výstupu svazku od detektoru. Divergence je pro zvýšení přesnosti měření vhodné spočítat v několika bodech. Vzdálenost l se tedy bere jako velikost kroku, o který se posouvá detektor, a pro stopa pole je dána rozdílem dvou po sobě jdoucích stop pole, tj. $D = D_2 - D_1$, viz obr. 5.1. Tuto metodu využijeme v experimentální části práce.



Obrázek 5.1: Schématický nákres měření divergence

Další [21] možností by bylo použít metodu ohniskové vzdálenosti, která je analogická k předchozí metodě pouze s tou obměnou, že je určená pro měření divergence komponent se známou ohniskovou vzdáleností. Tentokrát vypočítáme divergenci s pomocí vzorce

$$\vartheta = \arctan\left(\frac{D_{\text{MFD}}}{f}\right), \quad (5.2)$$

kde opět ϑ je hledaná divergence, D_{MFD} je naměřená stopa pole a f je známá ohnisková vzdálenost.

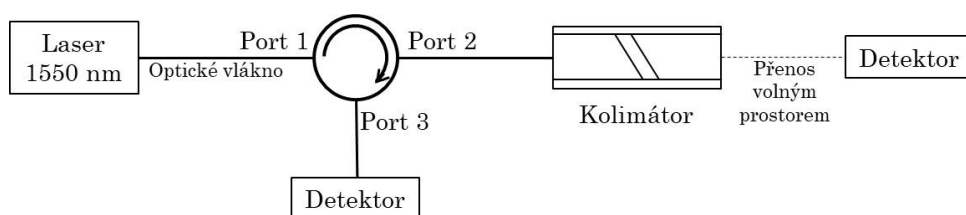
U obou těchto metod je důležité zajistit, aby měřený svazek v rovině detektoru neměl větší průměr než detektor.

5.3 Útlum odrazu (Return loss)

Jak již bylo zmíněno výše, k odrazům dochází [9] při přechodu světla z jednoho materiálu do materiálu s odlišným indexem lomu. V našem případě tedy dochází k odrazům na přechodu ferule - GRIN segment, kde po určité vzdálenosti prochází světlo volným prostorem, vzduchem.

Nejrozšířenější metodou [9] měření útlumu odrazu je měření s pomocí kontinuálního optického reflektometru, anglicky nazývaná jako Optical Continuous Wave Reflectometry (OCWR). Tato metoda vychází přímo z definice RL (2.9) a měří přímo výkon P_{in} a odražený výkon P_{ref} . Obvykle je v této metodě využívám optický 3 dB dělič, který jsme nahradili cirkulátorem.

Princip měření je vykreslen na obr. 5.2. Kontinuální optický signál je vyslán do portu 1 v cirkulátoru, ze kterého se signál přenesen do měřené součástky, kterou je zde kolimátor. Výkon P_{in} vystupující z ferule je měřen detektorem, umístěným jednotky centimetrů za kolimátor. Odražený výkon P_{ref} se vrací



Obrázek 5.2: Schématický nákras měření RL s pomocí optického cirkulátoru

do cirkulátoru portem 2 a vystupuje z něj portem 3, na který je napojen další detektor.

Pro snadné použití vzorce (2.9) je vhodné měřit výkony ve Watech. Při měření v dB lze použít zjednodušenou variantu tohoto vzorce v podobě

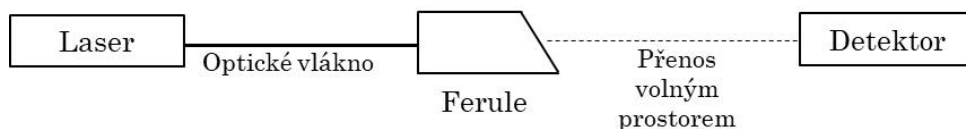
$$RL = P_{in} - P_{ref}. \quad (5.3)$$

5.4 Vložný útlum (Insertion loss)

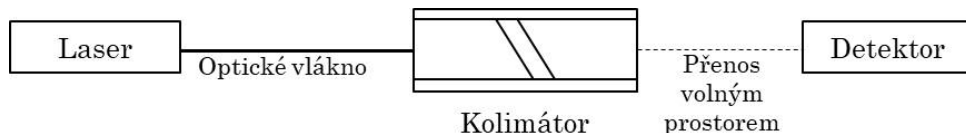
Standardně se vložný útlum měří [7] dvoufázovou metodou, oba kroky jsou znázorněny na obr. 5.3.

V prvním kroku se nepoužívá měřená součástka, což je v našem případě GRIN segment, změní se pouze referenční výkon P_{in} , který po kompletním sestavení optické trasy vstupuje do měřené součástky. Na obr. 5.3a je patrné, že v referenčním měření nejprve změříme výkon vystupující z ferule.

V druhém kroku se, jak již bylo řečeno, měří kompletně sestavená optická součástka, kterou je v našem případě GRIN segment zařazený za feruli. Na obr. 5.3b je principiálně zakresleno proměření takového kolimátoru. Výstupem je výkon P_{out} .



(a) : První krok: měření výkonu vystupujícího z ferule



(b) : Druhý krok: měření výkonu vystupujícího z kolimátoru

Obrázek 5.3: Schématický nákras měření IL

Podobně jako při měření RL, i pro vložný útlum existuje varianta vzorce (2.10) pro měření v dB:

$$IL = P_{in} - P_{out}. \quad (5.4)$$

Kapitola 6

Měření

V této kapitole je popsána experimentální část práce. Jsou zde zahrnuty popisy uspořádání a procesu měření s odkazy na předchozí kapitolu, použité přístroje a pomůcky, naměřená data (pro přehlednost jsou některá data umístěna v příloze) a celkové výstupy z měření.

6.1 Uspořádání měření

K samotnému měření bylo potřeba správně komponenty sestavit a to tak, že se do válcovité průhledné krytky vloží GRIN segment zkosenou stranou dovnitř, z druhé strany se následně umístí ferule s jednovláknovým vláknom zakončeným FC/APC konektorem. Při prvních experimentech se ukázalo, že aby byla zajištěna laditelnost kolimátoru, je nutné GRIN čočku do válcovité krytky přilepit.

Experiment byl sestaven na optickém stole. Válcovitá krytka byla napevno přilepena k vyvýšené podložce, následně byla zajištěna matkou. Ferule s vláknem byla upevněna do posuvné a otočné soustavy, díky níž je možné přesně měnit vzdálenost a úhel natočení mezi ferulí a GRIN segmentem. Sestavení experimentu je zobrazeno na obr. A.14.

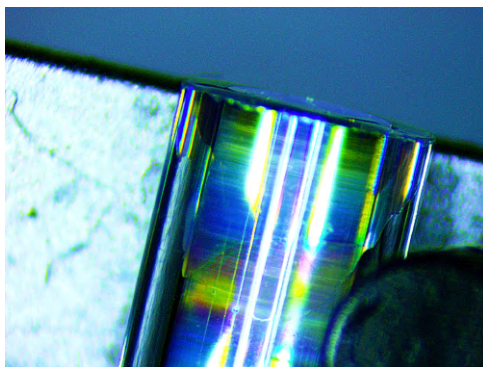
Použité přístroje a pomůcky

Zdroje záření: 632 nm - HeNe laser (max. výstupní výkon 2 mW na 632,8 nm), 1550 nm - CoBrite DX4 (laditelný zdroj, max. výstupní výkon 16 dB); **detektory** ThorLabs, Inc.: S120C (400-1100 nm, max. výkon 50 mW), S122C (700-1800 nm, max. výkon 40 mW), S154C (800-1700 nm, 3 mW), powermeter PM100D; 3-portový 1550 nm **cirkulátor** OPNETI (P grade, SMF-28e vlákno s 900 μm loose tube, FC/APC konektor, IL 0,74 dB, minimální izolace pro port 2-1 54 dB a pro port 3-2 53 dB, směrovost 56 dB, RL 55 dB); mikroskop AmScope; **kamery:** pro viditelné záření (Spiricon SP620U USB-CCD-Kamera, 190-1100 nm) a blízké infračervené záření (Gentec Beamage-4M-IR, 1495-1595 nm); mikrometrický posuv ($\pm 50 \mu\text{m}$); rotační posuv $360^\circ \pm 1^\circ$; spojná čočka ($f = 5 \text{ cm}$; lepidlo Permabond UV610).

■ Lepení

Jako hlavní důvod, proč bylo nutné GRIN segment přilepit, se ukázal tlak vzduchu uvnitř válcovité krytky - bez upevnění GRIN segmentu lepidlem by nebylo možné feruli dostatečně přiblížit, protože tlak vyvíjený ferulí odsouval GRIN segment mimo válcovou krytku a vzdálenost ferule a GRIN segmentu nebylo možné přesně nastavit.

K přilepení GRIN čočky bylo použito optické lepidlo vytvrzované UV lampou. Na obr. 6.1 je zobrazen detail konce GRIN segmentu přilepeného do válcovité krytky. Na této fotce je viditelné i lepidlo, které jako bezbarvý, průsvitný povlak pokrývá GRIN segment v okolí konce válcovité krytky.



Obrázek 6.1: Detail konce GRIN segmentu přilepeného do válcovité krytky

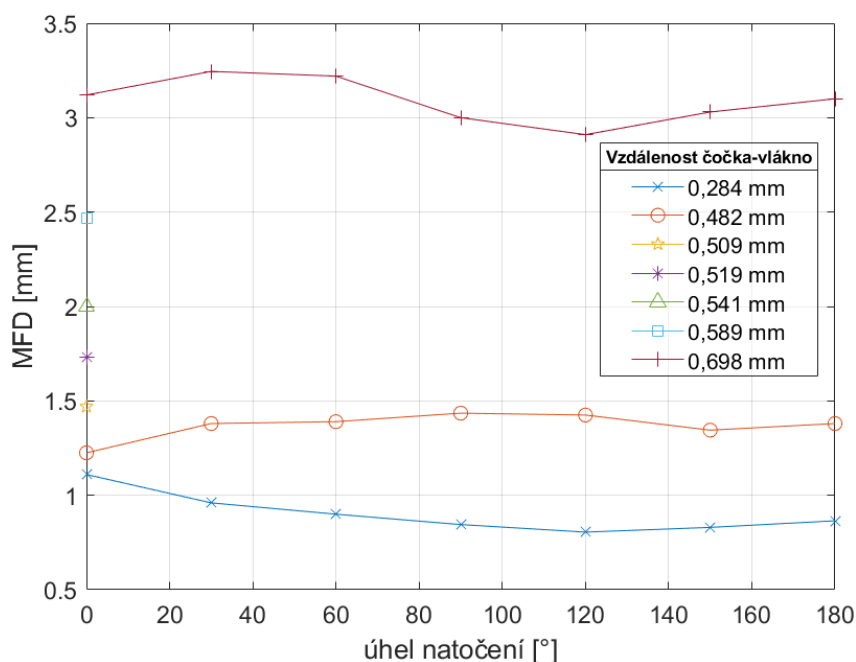
■ 6.2 Vlnová délka 1550 nm

Na vlnové délce 1550 nm byl změřen RL, MFD a rozbíhavost. Pro každé z těchto měření bylo použito jiné sestavení experimentu, které jsou popsány níže. Hodnoty z měření na vlnové délce 1550 nm jsou vypsány v tabulce B.1.

■ 6.2.1 Stopa pole

Pro měření stopy pole byla použita CCD kamera od Beamage pro blízké infračervené záření, která snímá dopadající záření a následně zobrazuje dopadající svazek v počítačovém programu. V nastavení programu kamery lze volit z různých definic MFD, pro mé účely jsem použila nastavení $1/e^2$. Kameru jsem umístila do dráhy optického svazku a následně jsem změřila MFD ve dvou osách. Hodnoty x a y jsou zprůměrovány aritmetickým průměrem a výsledná hodnota je označena jako *MFD průměr* v tab. B.1.

Podobně jako při měření RL i zde bylo MFD proměřeno několikrát v závislosti na úhlu natočení pro několik různých vzdáleností. Hodnota MFD pro optimální vzdálenost ferule a GRIN segmentu, jejichž zkosení svírají nulový úhel, je **1,11 mm**. Z grafu v obr. 6.2 je zjevné, že s rostoucí vzdáleností se zvětšuje i MFD. Přestože by se mohlo zdát, že by z hlediska MFD bylo výhodnější nastavit větší úhel natočení, např. pro 120° u optimální vzdálenosti,



Obrázek 6.2: 1550 nm: Závislost MFD na úhlu natočení

opak je pravdou - při větším úhlu natočení se svazek stáčí do strany. Je tudíž snazší pracovat se svazkem při nulovém natočení ferule a GRIN segmentu.

Dle simulace je velikost MFD **1,06 mm**. Naměřená hodnota tedy odpovídá hodnotě očekávané na základě simulace.

6.2.2 Rozbíhavost

K měření rozbíhavosti byla opět využita CCD kamera. Ovšem tentokrát zůstávalo v průběhu měření nastavení kolimátoru neměnné. Na začátku měření byl kolimátor uveden do optimálního nastavení a následně byla měněna vzdálenost kamery snímající dopadající svazek a to od 12,5 do 32,5 cm.

Princip měření rozbíhavosti je popsán v kapitole 5 - Metody měření.

Tabulka 6.1: Data k rozbíhavosti na 1550 nm

vzdálenost [cm]	MFD [mm]				rozbíhavost ¹ [°]
	x	y	průměr	poloměr	
12,5	1,804	1,796	1,800	0,900	
17,5	2,226	2,255	2,241	1,120	0,252
22,5	2,733	2,744	2,739	1,369	0,285
27,5	3,096	3,102	3,099	1,550	0,207
32,5	3,613	3,665	3,639	1,820	0,309

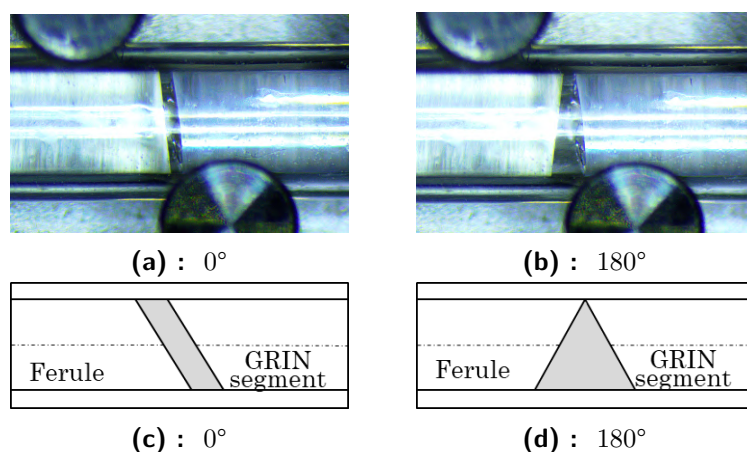
¹V kapitole 5 Metody měření je rozbíhavost definovaná pomocí rozdílu dvou naměřených poloměrů. Z pěti měření lze tedy získat pouze čtyři hodnoty rozbíhavosti.

Na základě naměřených dat je rozbíhavost kolimátoru **0,263°**. Při porovnání se simulací, dle které je velikost rozbíhavosti **0,265°**, opět vidíme, že i zde výsledky měření velmi dobře odpovídají simulacím.

6.2.3 Útlum odrazu (Return loss)

Pro měření útlumu odrazu byl použit cirkulátor v kombinaci s dvěma detektory pro měření výkonu s tím, že hodnoty RL byly odečítány z portu 3 dle obr. 5.2. V průběhu měření několikrát měněn výkon laseru od 10 do 16 dBm. Data označená jako *RL po korekci* v tab. B.1 představují reálnou hodnotu RL po odečtení výkonu P_{in} vystupujícího z ferule.

Jelikož ferule i GRIN segment jsou pro snížení odrazivosti zkoseny o 8° , RL (stejně jako MFD) byl proměřen v závislosti na vzájemném úhlu natočení ferule a GRIN segmentu - jako 0° je označen případ, kdy konce ferule i GRIN segmentu jsou rovnoběžné. V dalších krocích měření bylo rotováno s ferulí kolem podélné osy a tím byl měněn úhel jejího natočení až do úplného extrému (označeného jako 180°), kdy vzdálenost konců ferule a GRIN segmentu je na jedné straně čel nejmenší a na druhé největší. Příklady natočení ferule a GRIN segmentu jsou zobrazeny na obr. 6.3.



Obrázek 6.3: Příklady vzájemného natočení ferule a GRIN segmentu

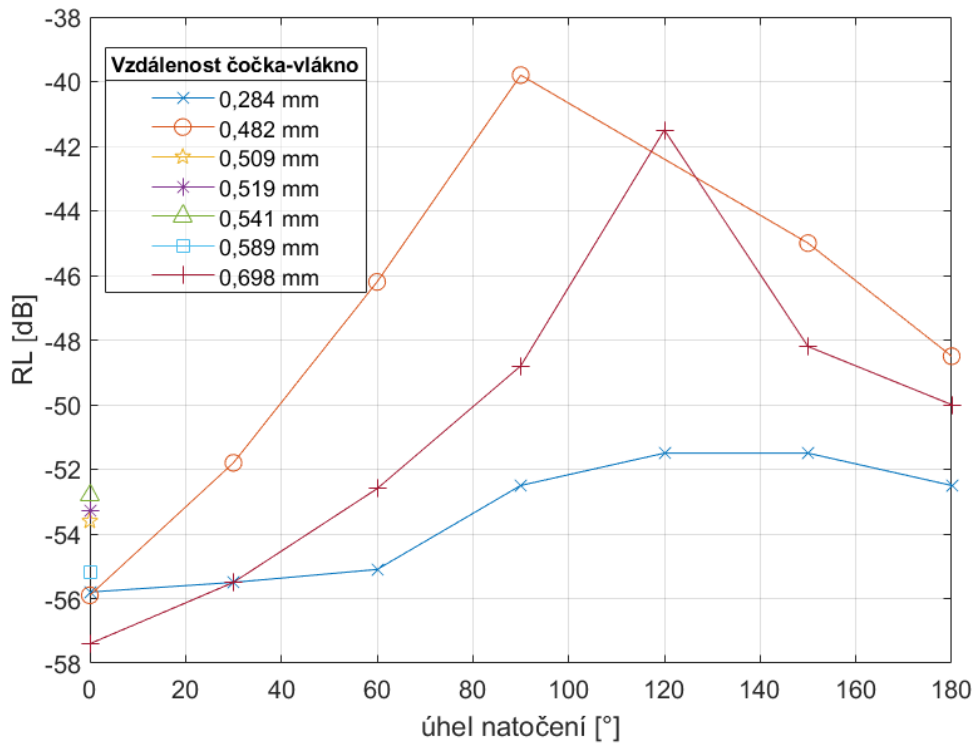
Závislost RL na úhlu natočení byla proměřena podrobně pro tři vzdálenosti ferule a GRIN segmentu. Pro několik dalších vzdáleností byl změřen RL bez natočení. Naměřená data jsou zanesena do grafu v obr. 5.2.

Z grafu na obr. 5.2 lze vypožorovat, že z hlediska útlumu odrazu je nevhodnější nastavení s nejkratší vzdáleností mezi ferulí a GRIN segmentem, tudíž bude dále popisována jako optimální vzdálenost.

6.2.4 Vložný útlum (Insertion loss)

K měření IL byl kolimátor upraven do optimálního nastavení.

Vložného útlumu jsem měřila dvoufázovou metodou, jak je popsána v kapitole 5 (Metody měření) a na obr. 5.3. Nejprve jsem změřila výkon vystupující



Obrázek 6.4: 1550 nm: Závislost RL na úhlu natočení

z ferule: $P_{\text{in}} = 8,38$ dBm, následně jsem proměřila výkon vystupující z kolimátoru: $P_{\text{out}} = 8,33$ dBm.

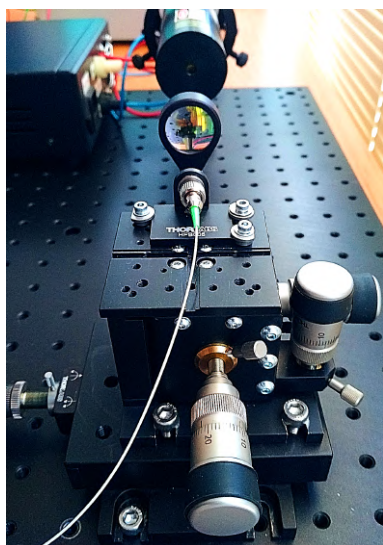
Dle vzorce (5.4) je tedy hodnota vložného útlumu pro kolimátor na 1550 nm rovna **0,05 dB**. Při porovnání s nasimulovanou hodnotou 0,16 dB je zřejmé, že námi naměřený útlum je menší, než očekávaný útlum. Jedná se však o velmi malý rozdíl a proto lze říci, že si hodnoty odpovídají.

6.3 Vlnová délka 630 nm

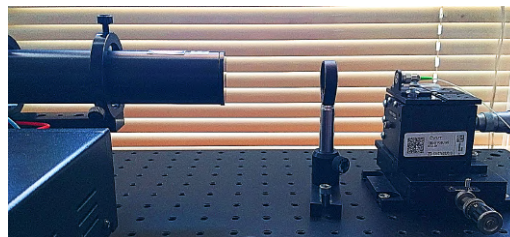
K měření na vlnové délce 630 nm byl použit HeNe laser (s vlnovou délkou 632 nm). Optický svazek jdoucí z tohoto laseru bylo třeba nejprve navázat do vlákna. K tomu byla použita čočka a jednovidové vlákno upevněné na laditelném podstavci, viz obr. 6.5. Další fotky navázání svazku o vlnové délce 632 nm jsou v příloze - viz obr. A.15. Jednovidové vlákno, do něhož navazujeme záření z HeNe laseru, je součástí pigtailed ferule. Jedná se tudíž o vlákno, které je na přímo připojené ke kolimátoru.

Vzdálenost čočky a konce vlákna je dána ohniskovou vzdáleností čočky. Ke konkrétnímu umístění konce vlákna vzhledem k čočce je použit právě laditelný podstavec, který umožňuje přesně nastavit výšku, vzdálenost a pravo-levé umístění ferule. Jelikož používáme vlákno zakončené FC/APC konektorem, na laditelném podstavci je připevněný speciální nástavec pro

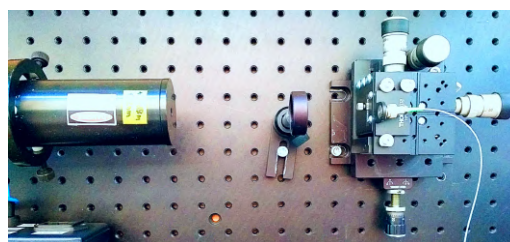
vlákna se zkosenou ferulí.



(a) : Pohled zředu



(b) : Pohled z boku



(c) : Pohled shora

Obrázek 6.5: Navázání HeNe laseru do vlákna

6.3.1 Rozbíhavost

Měření rozbíhavosti probíhalo stejně jako při experimentu s kolimátorem pro vlnovou délku 1550 nm pouze s kamerou Spiricon SP620U pro VIS oblast - vhodnou pro viditelné záření. Tato kamera měřila MFD již přímo 86,5% z maximálního výkonu (pro MFD větší než přibližně 0,4 mm). Pro MFD menší než 0,4 mm bylo třeba odečíst hodnotu velikosti manuálně z podélného zobrazení profilu pole.

Rozbíhavost byla proměřena pro několik různých vzdáleností (A, B, C) ferule a GRIN segmentu s optimálním natočením. Naměřená data jsou zanesena do tabulky 6.2. Pro měření A) byla nastavena vzdálenost 0,258 mm, pro B) 0,292 mm a pro C) 0,315 mm. Hodnota úhlu rozbíhavosti 0,733° pro vzdálenost A byla pro nepřesnost vyloučena z výpočtu výsledné rozbíhavosti.

Tabulka 6.2: Data k rozbíhavosti na 630 nm

vzdálenost [cm]	MFD [mm]				rozbíhavost [°]		
	A)	B)	C)		A)	B)	C)
7,5	0,866	0,636	0,278	0,242			
12,5	1,221	0,751	0,338	0,317	0,203	0,066	0,034
17,5	2,500	1,058	0,564		0,733	0,176	0,129
22,5	3,080	1,730	0,672		0,332	0,385	0,062
27,5	3,740	2,360	0,948		0,378	0,361	0,158

výsledky: **0,305 0,247 0,096**

Z dat v tabulce 6.2 vyplývá, že z hlediska rozbíhavosti je optimální vzdá-

lenost ferule a GRIN segmentu C, tedy 0,315 mm. Ovšem tato vzdálenost se již poměrně liší od vzdálenosti uváděné v katalogovém listu (0,234 mm). Při použití vzdálenosti B - 0,292 mm se naměřená rozbíhavost nejvíce blíží katalogové hodnotě 0,250°. Pro nejmenší vzdálenost A, tedy 0,258 mm, je rozbíhavost největší. Můžeme se domnívat, že menší vzdálenost mezi ferulí a GRIN segmentem byla výrobcem zvolena i přes horší rozbíhavost proto, že dochází k menším odrazům - podobně jako u kolimátoru na 1550 nm, kde se se zvyšující vzdáleností zhoršuje RL, viz obr. 6.4.

■ 6.3.2 Vložný útlum (Insertion loss)

Jako poslední měření jsme proměřili vložný útlum kolimátoru pro 630 nm. Postup měření byl stejný jako u kolimátoru pro 1550 nm, i zde bylo nastavení kolimátoru optimální. Hodnota výkonu vystupujícího z ferule je $P_{\text{in}} = -21,5$ dBm, výkon vystupující z GRIN segmentu kolimátoru je roven $P_{\text{out}} = -22,2$ dBm. Výsledná hodnota IL je podle (5.4) **0,07 dB**. Porovnáme-li tuto hodnotu se simulací, zjistíme, že naměřená hodnota vložného útlumu je nižší než nasimulovaná (0,03 dB). I zde, podobně jako při měření IL na 1550 nm, se hodnoty téměř rovnají.

Kapitola 7

Závěr

Na začátku práce byly vysvětleny základní parametry optických vláken relevantních u tématu kolimace, v následující kapitole byl popsán princip spojování vláken a kolimace. Z popsaných možností kolimátorů byl vybrán kolimátor s vláknovým segmentem s gradientním indexem lomu, jehož konstrukce byla pro vlnové délky 1550, 630 a 2000 nm uvedena za začátku rozboru simulací.

Výstupy simulací vykazují největší stopu pole pro kolimátor pro vlnovou délku 1550 nm a to 1,13 mm, následuje kolimátor pro 2000 nm se stopou pole rovnou 0,962 mm a s podobnou velikostí MFD 0,884 mm kolimátor pro 630 nm. Nejlépe kolimovaný svazek vychází z kolimátoru pro vlnovou délku 630 nm s divergencí 0,127°, dalším v pořadí je kolimátor pro vlnovou délku 1550 nm s 0,265°, od této hodnoty se příliš neliší divergence pro 2000 nm, která je rovna 0,270°. Z hlediska vložného útlumu jsou výsledky u kolimátorů pro 1550 a 630 nm srovnatelné, přibližná hodnota u těchto kolimátorů je 0,16, resp. 0,03 dB. Oproti těmto dvěma výsledkům vychází vložný útlum pro vlnovou délku 2000 nm jako největší: 0,18 dB. Na závěr kapitoly o simulacích se nachází návrh praktického řešení sestavení kolimátorů, který byl realizován.

Před samotným měřením jsou popsány typické metody měření stopy pole, divergence, vložného útlumu a útlumu odrazu. Následuje měření spolu s konkrétním výčtem použitých přístrojů a pomůcek, popisem sestavení měřicích soustav, doplněných o fotografie, výsledky měření včetně grafů a tabulek.

Z hodnot MFD naměřených pro kolimátor pro vlnovou délku 1550 nm (zobrazených v grafu 6.2) lze konstatovat, že stopa pole se se zvyšující se vzdáleností ferule a GRIN segmentu zvětšuje. Při ekvidistantních změnách úhlu natočení je MFD nejmenší přibližně pro úhel 120°. Nutno podotknout, že pro takovýto úhel natočení nebude optický svazek dopadat do stejného místa na stínítku, jako při úhlu natočení 0°. Z tohoto důvodu se používá nulový úhel natočení i za cenu větší stopy pole, protože poloha dopadajícího svazku lze snáze nalézt a proto i následné případné navázání optického svazku do další součástky je jednodušší.

Při pohledu na výsledky rozbíhavosti z měření (0,263°) a simulací (0,265°) kolimátoru na 1550 nm zjistíme, že velmi dobře odpovídají.

Podle očekávání je nejlepší potlačení odrazů, tedy největší útlum odrazu (-54 dB) při optimálním nastavení kolimátoru na 1550 nm. Se zvyšujícím se

vzájemným úhlem natočení ferule a GRIN segmentu se útlum odrazu snižuje a dosáhl až hodnoty -38 dB. Při vzájemném úhlu natočení ferule a GRIN segmentu blízkém 180° se RL opět zvyšuje. Příčinou tohoto jevu může být to, že při tak velkém úhlu natočení se již velmi mění dráha optického svazku, který tím pádem nemá možnost navázat se do optického vlákna umístěného ve feruli, tím dochází ke snížení naměřené hodnoty odrazu. Útlum odrazu ve zkoumaných kolimátorech byl natolik výrazný, že v simulacích byl odražený výkon roven nule.

Měření rozbíhavosti kolimátoru pro vlnovou délku 630 nm probíhalo pro tři různé velikosti vzduchové mezery mezi ferulí a GRIN segmentem. Překvapivým výsledkem je nejmenší rozbíhavost pro největší vzduchovou mezeru ($0,096^\circ$ pro 0,315 mm) a největší rozbíhavost pro nejmenší vzduchovou mezeru ($0,305^\circ$ pro 0,258 mm). Katalogové hodnotě ($0,250^\circ$) se nejvíce přiblížilo zbývající měření a to pro vzduchovou mezeru 0,292 mm s rozbíhavostí $0,247^\circ$.

Výsledná hodnota z měření vložného útlumu u obou měření je téměř shodná: 0,05 dB na vlnové délce 1550 nm a 0,07 dB na vlnové délce 630 nm. Obě tyto hodnoty jsou téměř stejné jako nasimulované vložné útlumy (0,16 dB pro 1550 nm a 0,03 dB pro 630 nm). Rozdíl naměřených a nasimulovaných hodnot je zanedbatelný.

Měření kolimátoru pro vlnovou délku 1550 nm i 630 nm dopadlo podle očekávání na základě výstupů ze simulací. Nasimulované parametry kolimátoru pro vlnovou délku 1550 nm upraveného pro vlnovou délku 2000 nm se příliš neliší od výsledků při použití vlnové délky 1550 nm. Z těchto důvodů lze předpokládat, že při použití kolimátoru s vláknovým segmentem s gradientním indexem lomu GRIN2915A, parametry přenosu budou vyhovující jak na 1550 nm a 2000 nm pro FSO spoje o délce jednotek metrů. Kolimátor pro 630 nm může najít uplatnění v laboratorních aplikacích právě díky použité vlnové délce, která má výraznou červenou barvu. Tato výhoda vlnové délky 630 nm oproti vlnové délce 1550 nm je zjevná. Nespornou předností kolimátoru pro 630 nm je jeho malý vložný útlum, čehož lze při laboratorních měřeních využít.



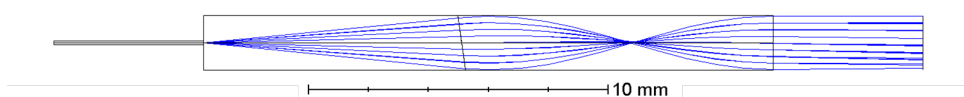
Literatura

- [1] SALEH, Bahaa E. A a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky: Fundamentals of photonics*. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-858-6301-4.
- [2] AGRAWAL, G. P. *Fiber-optic communication systems*. 2nd ed. New York: Wiley, c1997. ISBN 04-711-7540-4.
- [3] SENIOR, John M. a M. Yousif JAMRO. *Optical fiber communications: principles and practice*. 3rd ed. New York: Financial Times/Prentice Hall, 2009. ISBN 978-0-13-032681-2.
- [4] NOVOTNÝ, Karel, Tomáš MARTAN a Jan ŠÍSTEK. *Systémy pro optické komunikace*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2810-0.
- [5] Fiber Components. *ThorLabs, Inc.* [online]. [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=29
- [6] O'SHEA, Donald C. *Elements of modern optical design*. New York: Wiley, c1985. ISBN 04-710-7796-8.
- [7] KASAP, S. O., Harry E. RUDA a Yann BOUCHER. *Cambridge illustrated handbook of optoelectronics and photonics*. New York: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-81596-3.
- [8] PASCHOTTA, Rüdiger. *Encyclopedia of laser physics and technology*. Weinheim: Wiley-VCH, c2008. ISBN 978-3-527-40828-3.
- [9] SUN, Qiang, Ji-song YAN a Zhi-hui ZHANG. *Two methods for measuring optical return loss of optical devices in laser propagation system*. Proc. SPIE 8906, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Laser Communication Technologies and Systems, 890611. 2013-8-21. DOI: 10.1117/12.2033060.
- [10] BIRD, Trevor S. Definition and Misuse of Return Loss [Report of the Transactions Editor-in-Chief]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2009, **51**(2), 166-167. DOI: 10.1109/MAP.2009.5162049. ISSN 1045-9243.

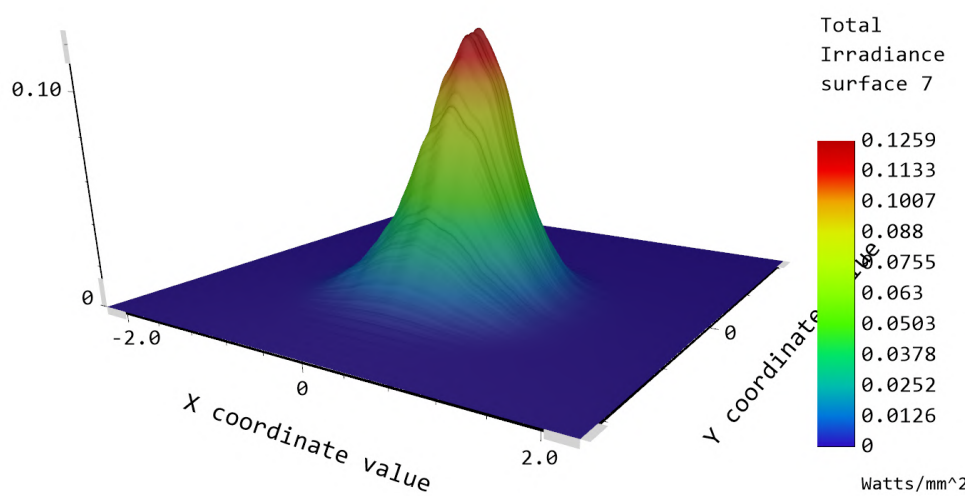
- [11] HUI, Rongqing a Maurice S O'SULLIVAN. *Fiber optic measurement techniques*. London: Elsevier/Academic Press, c2009. ISBN 978-0-12-373865-3.
- [12] Konektory a Transceivery pro sítě LAN a SAN. Samuraj-cz [online]. 2017 [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://www.samuraj-cz.com/clanek/konektory-a-transceivery-pro-site-lan-a-san/>
- [13] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. Brno: Code Creator, 2015 [cit. 2018-11-13]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/Cover.html>
- [14] Trubičková ochrana optického sváru. *Opticord: Telecommunications and Network* [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: https://eshop.opticord.cz/optika-optika-prislušenství-ochrana-svaru_c303.html
- [15] Getting to Know Fiber Collimator. *Fiber Optical Networking* [online]. [cit. 2019-01-12]. Dostupné z: <http://www.fiber-optical-networking.com/getting-know-fiber-collimator.html>
- [16] Technical Note: Focusing and Collimating. *Newport* [online]. [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <https://www.newport.com/n/focusing-and-collimating>
- [17] TUTORIAL: Fiber optic collimators. *Princetel, Inc.* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: http://www.princetel.com/tutorial_collimator.asp
- [18] Gradient Index Lens. SPIE: Optipedia [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: https://spie.org/publications/tt48_55_gradient_index_lens?SS0=1
- [19] RP Photonics Encyclopedia: Encyclopedia of Laser Physics and Technology. *RP Photonics* [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
- [20] GUTTMAN, Jeffrey. *Mode-Field Diameter and "Spot Size" Measurements of Lensed and Tapered Specialty Fibers* [online]. National Institute of Standards and Technology Symposium on Optical Fiber Measurements, 2002 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: https://www.ophiropt.com/user_files/laser/beamprofilers/MFDandSpotSize.pdf
- [21] 3 Ways to Keep Track of Your Laser Beam's Divergence. *Ophir Photonics Blog: Laser Measurement* [online]. [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.ophiropt.com/blog/laser-measurement/3-ways-to-keep-track-of-your-laser-beams-divergence/>

Příloha A

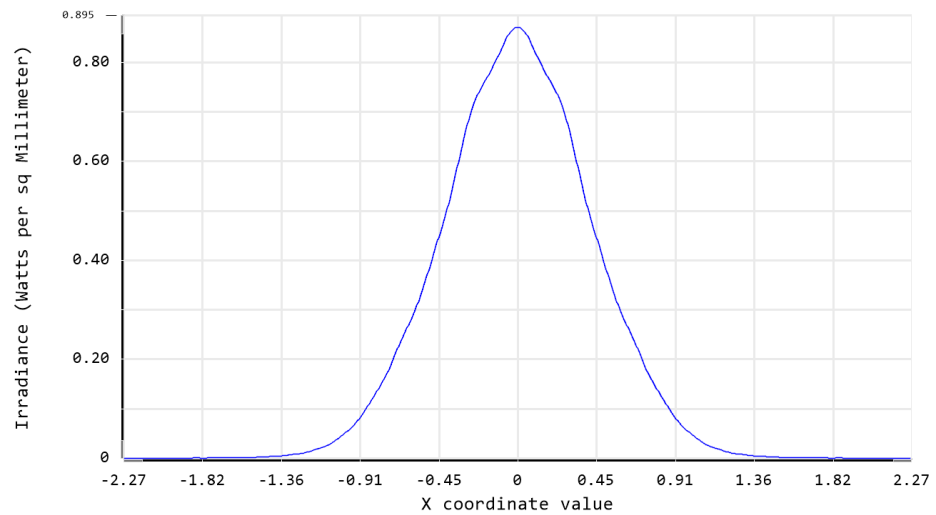
Obrázky



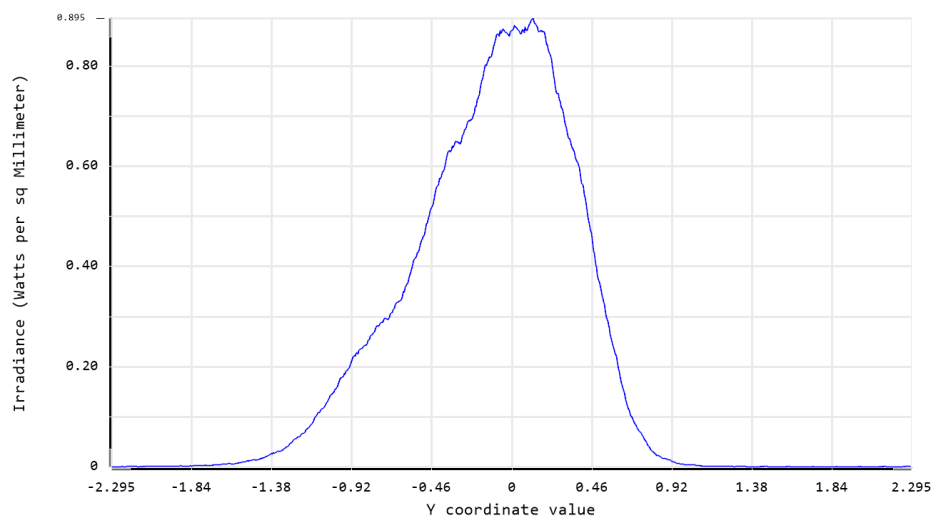
Obrázek A.1: Principiální 2D nákres kolimátoru pro 1550 nm



Obrázek A.2: 1550 nm: 3D profil pole



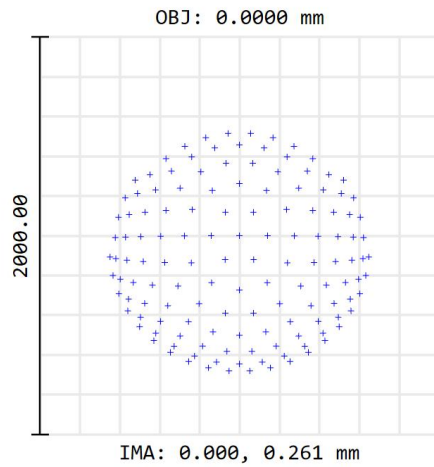
(a) : 1550 nm: Profil pole - podélný řez osou X



(b) : 1550 nm: Profil pole - podélný řez osou Y

Obrázek A.3: 1550 nm: Profil pole - podélný řez

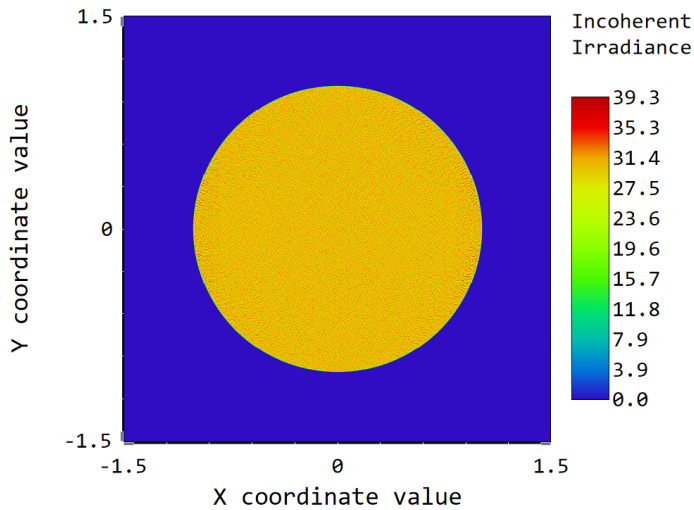
1.55



Surface: IMA

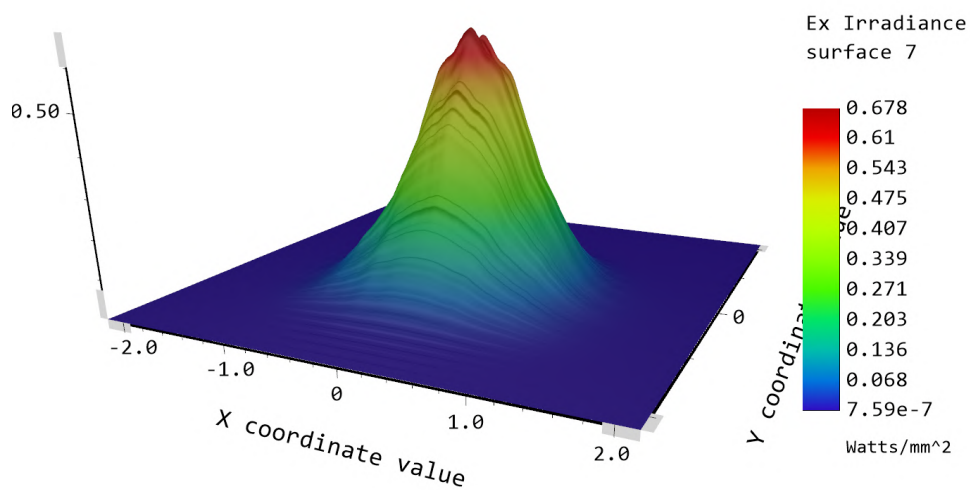
Spot Diagram	
GRIN Lens, Ø1.8 mm, 0.23 Pitch, 8°, AR Coated: 1560 nm, 5/14/2019 Units are µm. Legend items refer to Wavelengths Field : 1 RMS radius : 528.497 GEO radius : 682.116 Scale bar : 2000	Zemax Zemax OpticStudio 18.7
Reference : Chief Ray	1550nm_4.1.ZMX Configuration 1 of 1

Obrázek A.4: 1550 nm: Dopadající svazek



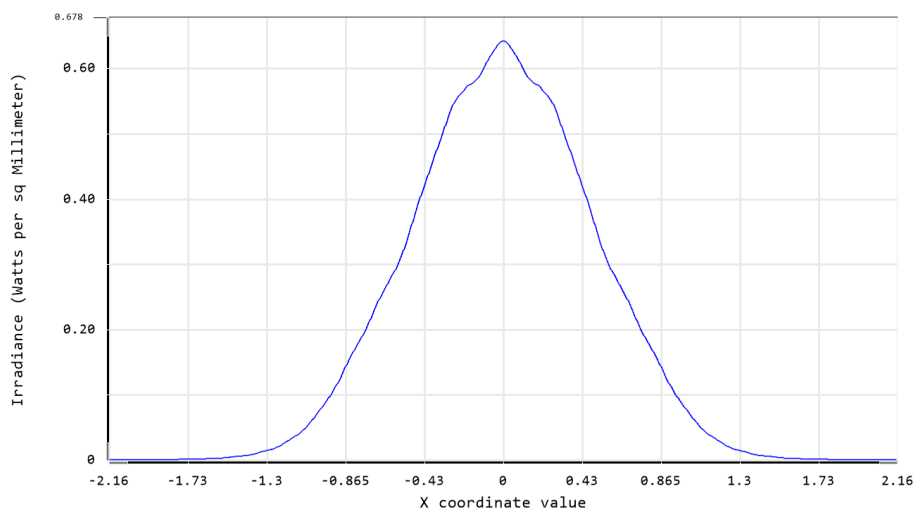
Detector Image: Incoherent Irradiance	
GRIN Lens, Ø1.8 mm, 0.23 Pitch, 8°, AR Coated: 1560 nm 5/21/2019 Detector 14, NSCG Surface 1: Size 3.000 W X 3.000 H Millimeters, Pixels 600 W X 600 H, Total Hits = 963612 Peak Irradiance : 3.9262E+01 Watts/cm ² Total Power : 9.6361E-01 Watts	Zemax Zemax OpticStudio 18.7
	1550nm_5.1-NONSEQ.zmx Configuration 1 of 1

Obrázek A.5: 1550 nm: Dopadající svazek - příčný řez



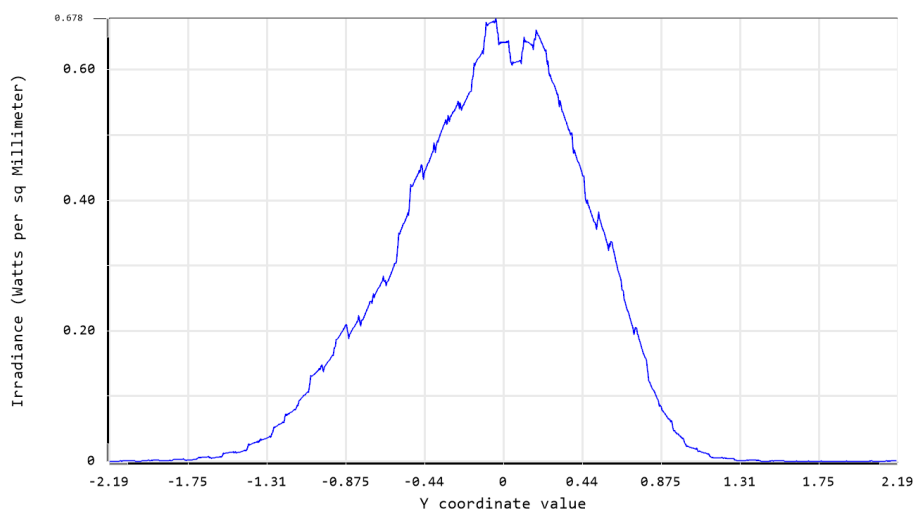
Ex Irradiance surface 7
GRIN Lens, Ø1.8 mm, 0.23 Pitch, 8°, AR Coated: 1560 nm, 5/16/2019
Beam wavelength is 0.63000 µm in the media with index 1.00000 at 0.0000 mm
Display X Width = 4.3267E+00, Y Height = 4.3747E+00 Millimeters
Peak Irradiance = 6.7815E-01 Watts/Millimeters ² , Total Power = 1.0000E+00 Watts
Pilot: Size= 1.5745E+00, Waist= 1.8813E-03, Pos= 1.4771E+01, Rayleigh= 1.7650E-02
Beam Width X = 1.00318E+00, Y = 1.00978E+00 Millimeters

Obrázek A.6: 630 nm: 3D profil pole



Ex Irradiance X-Cross section surface 7
GRIN Lens, Ø1.8 mm, 0.23 Pitch, 8°, AR Coated: 1560 nm, 5/16/2019
Beam wavelength is 0.63000 µm in the media with index 1.00000 at 0.0000 mm
Center, Y = 0.0000E+00
Peak Irradiance = 6.7815E-01 Watts/Millimeters ² , Total Power = 1.0000E+00 Watts
Pilot: Size= 1.5745E+00, Waist= 1.8813E-03, Pos= 1.4771E+01, Rayleigh= 1.7650E-02
Beam Width X = 1.00318E+00, Y = 1.00978E+00 Millimeters

(a) : 630 nm: Profil pole - podélný řez osou X

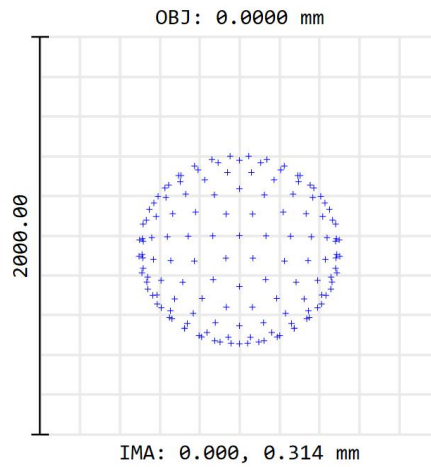


Ex Irradiance Y-Cross section surface 7
GRIN Lens, Ø1.8 mm, 0.23 Pitch, 8°, AR Coated: 1560 nm, 5/16/2019
Beam wavelength is 0.63000 µm in the media with index 1.00000 at 0.0000 mm
Center, X = 0.0000E+00
Peak Irradiance = 6.7815E-01 Watts/Millimeters ² , Total Power = 1.0000E+00 Watts
Pilot: Size= 1.5745E+00, Waist= 1.8813E-03, Pos= 1.4771E+01, Rayleigh= 1.7650E-02
Beam Width X = 1.00318E+00, Y = 1.00978E+00 Millimeters

(b) : 630 nm: Profil pole - podélný řez osou Y

Obrázek A.7: 630 nm: Profil pole - podélný řez

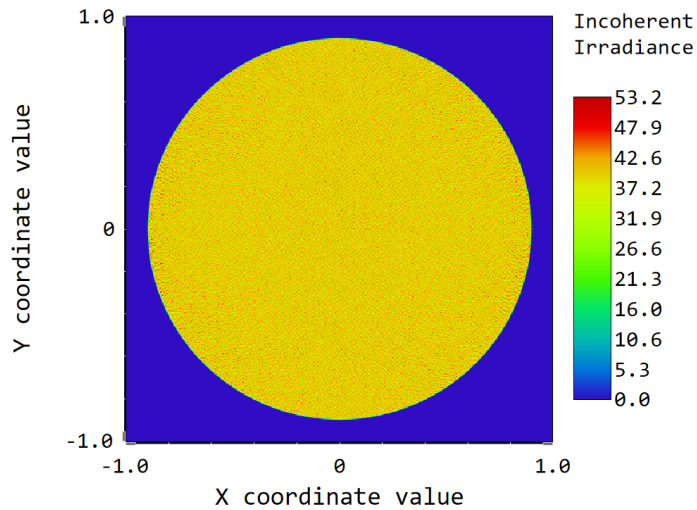
+ 0.63



Surface: IMA

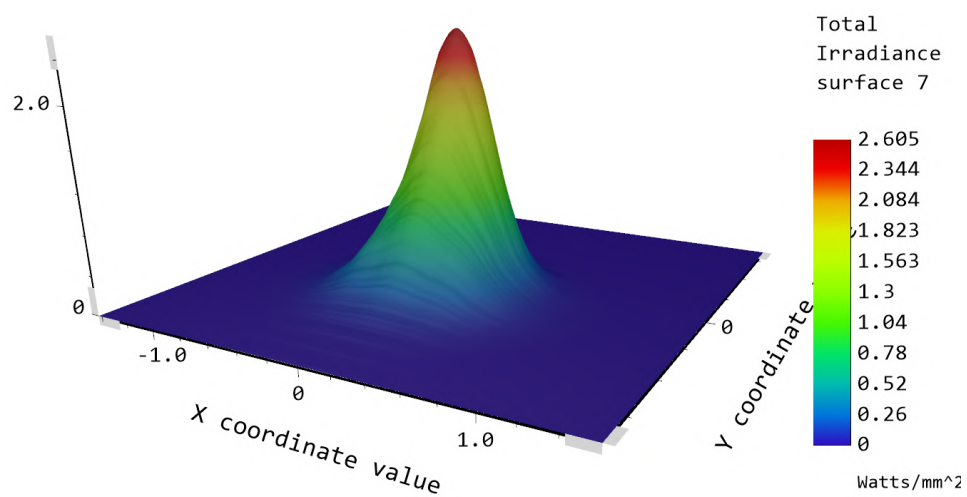
Spot Diagram	
GRIN Lens, Ø1.8 mm, 0.23 Pitch, 8°, AR Coated: 1560 nm, 5/16/2019	Zemax
Units are µm. Legend items refer to Wavelengths	Zemax OpticStudio 18.7
Field : 1	630nm_4.1.ZMX
RMS radius : 442.270	Configuration 1 of 1
GEO radius : 543.370	
Scale bar : 2000 Reference : Chief Ray	

Obrázek A.8: 630 nm: Dopadající svazek

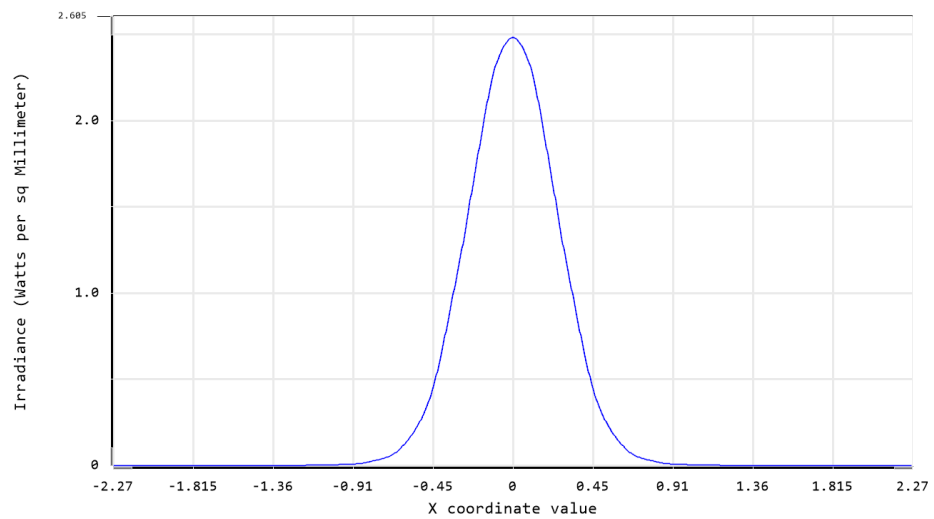


Detector Image: Incoherent Irradiance	
GRIN Lens, Ø1.8 mm, 0.23 Pitch, 8°, AR Coated: 1560 nm	Zemax
5/21/2019	Zemax OpticStudio 18.7
Detector 12, NSCG Surface 1:	630nm_5.1-NONSEQ.ZMX
Size 2.000 W X 2.000 H Millimeters, Pixels 500 W X 500 H, Total Hits = 994252	Configuration 1 of 1
Peak Irradiance : 5.3189E+01 Watts/cm²	
Total Power : 9.9425E-01 Watts	

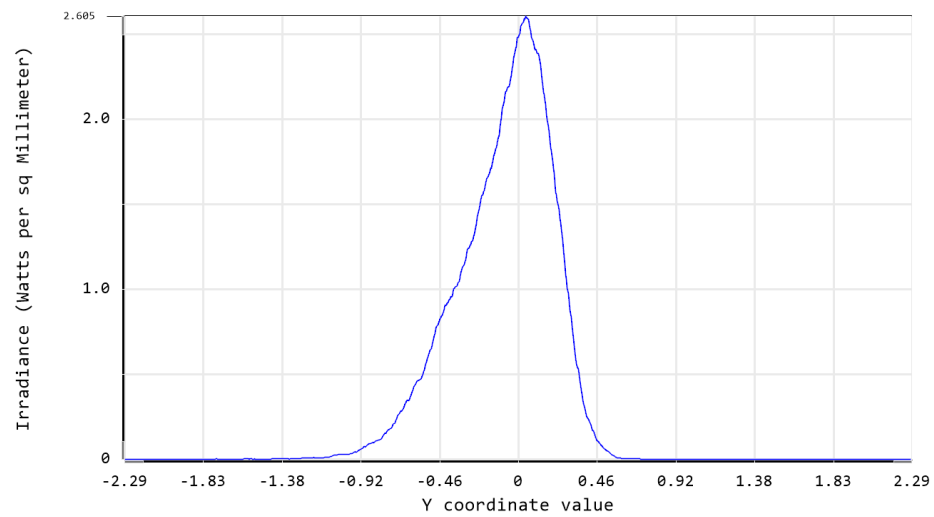
Obrázek A.9: 630 nm: Dopadající svazek - příčný řez



Obrázek A.10: 2000 nm: 3D profil pole

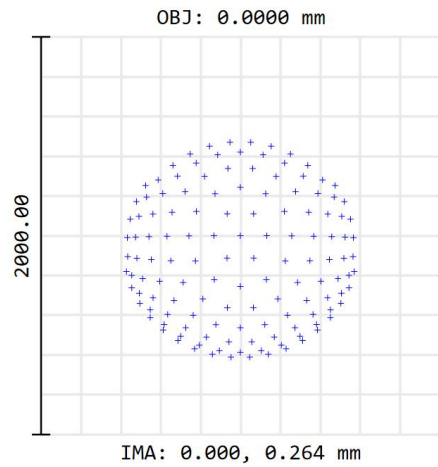


(a) : 2000 nm: Profil pole - podélný řez osou X



(b) : 2000 nm: Profil pole - podélný řez osou Y

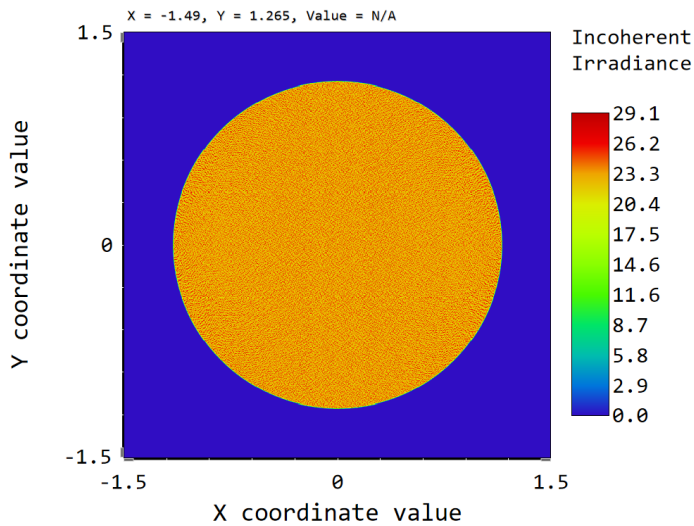
Obrázek A.11: 2000 nm: Profil pole - podélný řez



Surface: IMA

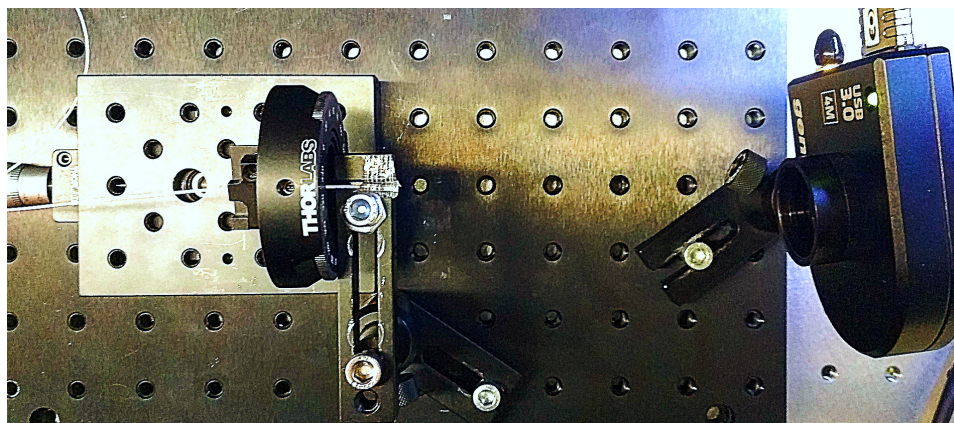
Spot Diagram		Zemax
GRIN Lens, Ø1.8 mm, 0.23 Pitch, 8°, AR Coated: 1560 nm, 5/14/2019 Units are µm. Legend items refer to Wavelengths		Zemax OpticStudio 18.7
Field : 1		2000nm_4.1.zmx
RMS radius : 481.240		Configuration 1 of 1
GEO radius : 613.116		
Scale bar : 2000	Reference : Chief Ray	

Obrázek A.12: 2000 nm: Dopadající svazek

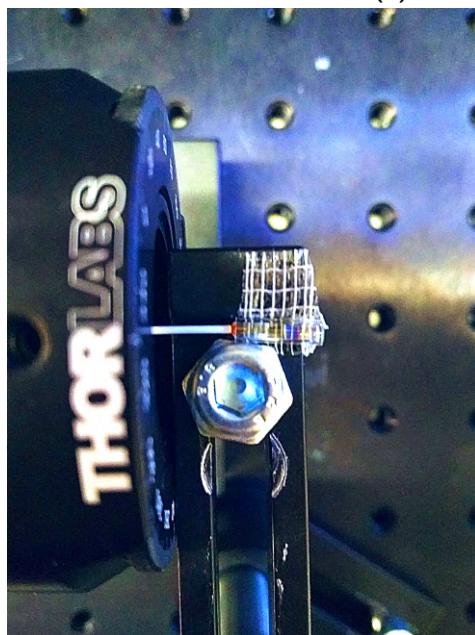


Detector Image: Incoherent Irradiance		Zemax
GRIN Lens, Ø1.8 mm, 0.23 Pitch, 8°, AR Coated: 1560 nm 5/21/2019 Detector 12, NSCG Surface 1: Size 3.000 W X 3.000 H Millimeters, Pixels 600 W X 600 H, Total Hits = 959352 Peak Irradiance : 2.9118E+01 Watts/cm ² Total Power : 9.5935E-01 Watts		Zemax OpticStudio 18.7
		2000nm_5.1-NONSEQ.ZMX
		Configuration 1 of 1

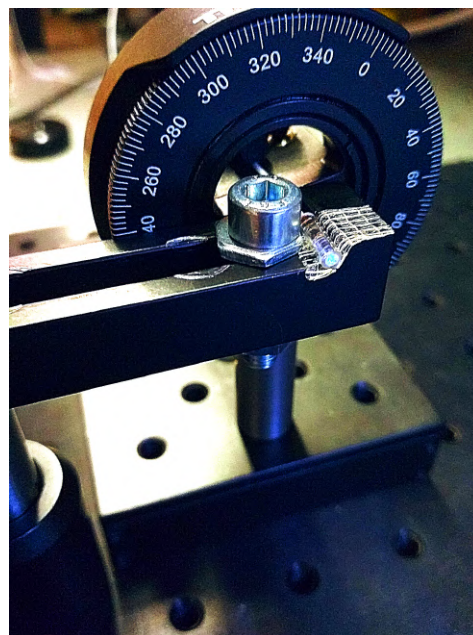
Obrázek A.13: 2000 nm: Dopadající svazek - příčný řez



(a) : Pohled shora

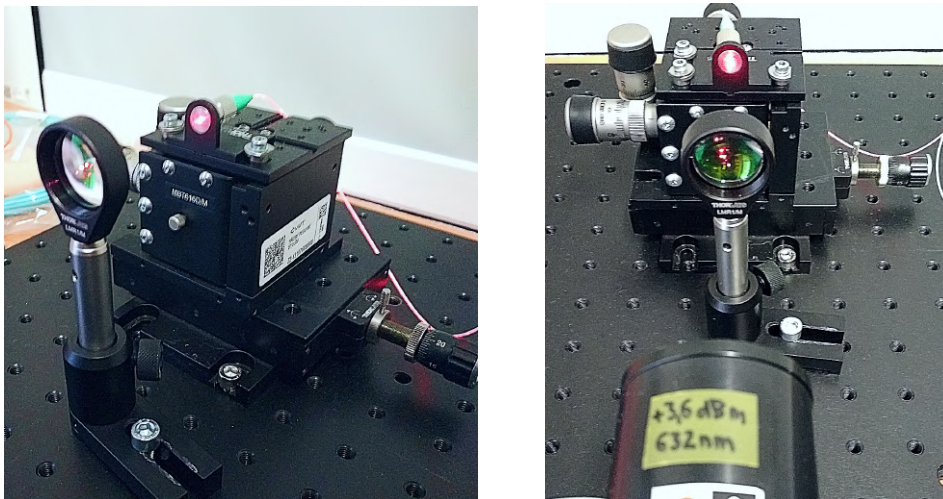


(b) : Detailní pohled



(c) : Pohled zředu

Obrázek A.14: Uspořádání experimentu



Obrázek A.15: Navázání svazku o vlnové délce 632 nm do vlákna

Příloha B

Tabulky

Tabulka B.1: Naměřené a vypočítané hodnoty na 1550 nm

úhel[°]	výkon [dBm]	vzdálenost [mm]	RL[dB]		MFD [mm]		
			naměřeno	po korekci	x	y	průměr
0	8,38	0,284	-45,80	54,18	1,11		1,11
30	8,38	0,284	-45,50	53,88	0,96		0,96
60	8,38	0,284	-45,10	53,48	0,87	0,93	0,90
90	8,38	0,284	-42,50	50,88	0,86	0,83	0,85
120	8,38	0,284	-41,50	49,88	0,80	0,81	0,81
150	8,38	0,284	-41,50	49,88	0,84	0,82	0,83
180	8,38	0,284	-42,50	50,88	0,89	0,84	0,87
0	8,38	0,482	-45,90	54,28	1,27	1,18	1,23
30	8,38	0,482	-41,80	50,18	1,37	1,39	1,38
60	8,38	0,482	-36,20	44,58	1,36	1,42	1,39
90	8,38	0,482	-29,80	38,18	1,42	1,45	1,44
120	8,38	0,482	-36,90	45,28	1,41	1,44	1,43
150	8,38	0,482	-35,00	43,38	1,38	1,31	1,35
180	8,38	0,482	-38,50	46,88	1,33	1,43	1,38
0	8,38	0,509	-43,60	51,98	1,52	1,42	1,47
0	8,38	0,519	-43,30	51,68	1,74	1,72	1,73
0	8,38	0,541	-42,80	51,18	1,94	2,06	2,00
0	12,38	0,589	-41,20	53,58	2,46	2,48	2,47
0	14,38	0,698	-39,40	53,78	3,20	3,04	3,12
30	14,38	0,698	-39,50	53,88	3,18	3,31	3,25
60	14,38	0,698	-36,60	50,98	3,19	3,25	3,22
90	14,38	0,698	-32,80	47,18	2,83	3,17	3,00
120	14,38	0,698	-25,50	39,88	2,97	2,85	2,91
150	14,38	0,698	-32,20	46,58	3,26	2,80	3,03
180	14,38	0,698	-34,00	48,38	3,00	3,20	3,10

Příloha C

Seznam zkratk a symbolů

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
APC	Šikmé zbrošení ferule (Angled physical contact)
CCD	Zařízení s vázanými náboji (Charge-coupled device)
FPC	Rovné zbrošení ferule (Flat physical contact)
FSO	Optické spoje ve volném prostoru (Free space optics)
FTTH	Fiber-to-the-home
GRIN	Gradientní změna indexu lomu (Graded index)
IL	Vložný útlum (Insertion loss)
MFD	Stopa pole (Mode field diameter)
MMF	Vícevidová vlákna (Multi-mode fibers)
NA	Numerická apertura (Numerical aperture)
OCWR	Kontinuální optický reflektometr (Optical continuous wave reflectometry)
PC	Vyboulené zbrošení ferule (Physical contact)
RL	Útlum odrazu (Return loss)
SI	Skoková změna indexu lomu (Step index)
SMF	Jednovidová vlákna (Single-mode fibers)
VIS	Označení viditelné oblasti záření (Visible)

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam
a	poloměr jádra optického vlákna
\sqrt{A}	gradientní konstanta
A_{eff}	efektivní plocha
d	průměr vláknového segmentu
D_{MFD}	naměřená hodnota MFD
d_0	šířka optického svazku / MFD
f	ohnisková vzdálenost
I_0	maximální intenzita svazku
$I(w)$	intenzita svazku
l	vzdálenost detektoru od výstupu svazku
$n_{0,1,2}$	indexy lomů prostředí
$n(r)$	index lomu s gradientním profilem
P	jedna perioda sinusového průběhu v GRIN čočce (pitch)
P_{in}	vstupní výkon
P_{out}	výstupní výkon
P_{ref}	odražený (reflected) výkon
$R(z)$	poloměr křivosti vlnoplochy
V	normovaný kmitočet / V-number
V_c	normovaný mezní kmitočet
w_0	pološířka optického svazku / polovina MFD
w_{in}	pološířka optického svazku vstupujícího do čočky
Z	délka vláknového segmentu s gradientním indexem lomu
z_0	Rayleighova vzdálenost
θ	rozbíhavost zdroje
ϑ	divergenční úhel / úhel rozbíhavosti
λ	vlnová délka záření
λ_c	mezní vlnová délka
ϕ_a	úhel akceptance
ϕ_i	úhel dopadu paprsku na optické vlákno
ϕ	kritický úhel dopadu paprsku na rozhraní jádro/plášť