

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2014

Tomáš Tříška

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

**Pracoviště pro navazování optických
svazků do speciálních vláken**

květen 2014

Diplomant: Bc. Tomáš Tříška

Vedoucí: Doc. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne 7. května 2014

.....
Tomáš Tříška

Poděkování

Poděkování patří hlavně vedoucímu této práce panu Doc. Ing. Stanislavu Zvánovcovi Ph.D. a také panu Ing. Tomáši Němečkovi a panu Ing. Matěji Komancovi za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování práce a sestavování měřicího pracoviště.

V Praze dne 7. května 2014

.....
Tomáš Tříška

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá vytvořením pracoviště pro navazování optických svazků do speciálních optických vláken. V teoretické části jsou popsány základní mikrostrukturní vlákna, jejich specifikace a aplikace. Dále jsou popsány metody měření a výpočtu průměru vidového pole optických vláken MFD. Praktická část se zabývá simulacemi mikrostrukturních vláken v programu BeamPROPTM s ohledem na vidové pole a dále sestavením pracoviště pro experimentální měření těchto vláken, zejména jejich výstupní stopy pole, ze které je v závěru stanoven MFD měřeného vlákna.

Klíčová slova

speciální vlákna, mikrostrukturní vlákna, PCF, MOF, průměr vidového pole, MFD, měření v blízkém poli

Summary

This Master Thesis deals with the assembly of a laboratory for the coupling of optical beams to specialty fibers. The theoretical section explains the basic microstructured fibers, their specifics and utilization. It also describes methods of measurement and determination of the mode-field diameter MFD of optical fibers. The practical section involves simulations of MFD in microstructured fibers in BeamPROPTM and also the assembly of a laboratory for the experimental measurement of these fibers, mainly their radiation field from which the MFD is determined.

Index terms

speciality fibers, microstructured fibers, PCF, MOF, mode-field diameter, MFD, near field measurement

Obsah

SEZNAM ZKRATEK
1 ÚVOD.....	1
2 OBECNÉ PRINCIPY FOTONICKÝCH KRYSTALŮ	4
2.1 1D Fotonické krystaly	4
2.2 2D Fotonické krystaly	6
2.3 3D Fotonické krystaly	10
3 MIKROSTRUKTURNÍ VLÁKNA	11
3.1 Základní charakteristiky mikrostrukturních vláken	12
3.2 Vlákná s pevným jádrem (Solid-core)	15
3.3 Vlákná s dutým jádrem (Hollow-core)	16
3.4 Další speciální typy PCF vláken	17
4 MĚŘENÍ PARAMETRU MFD	19
4.1 Metoda near-field	22
4.2 Metoda far-field	23
4.3 Nepřímé metody měření MFD	24
5 PRAKTICKÁ ČÁST	25
5.1 Simulace PCF vláken v BeamPROP	26
5.1.1 Simulace klasického SMF vlákna	26
5.1.2 Simulace obecného solid-core PCF vlákna	29
5.1.3 Simulace reálného solid-core PCF vlákna ESM-12B	31
5.2 Detekce záření z optického vlákna	35
5.2.1 Klasické SMF vlákno	39
5.2.2 PCF vlákno ESM-12B	41
5.3 Stanovení parametru MFD	42
6 ZÁVĚR	47
LITERATURA.....	49

Seznam zkratek

- BPM - Metoda šíření svazků
- DBR - Distribuovaný Braggův reflektor
- ESM - Neustále jednovidová vlákna
- FF - Vzdálené pole
- IR - Infračervené
- LD - Zdroj s laserovou diodou
- LP - Lineárně polarizované
- MFD - Průměr vidového pole
- MOF - Mikrostrukturní vlákna
- NA - Numerická apertura
- NF - Blízké pole
- PBG - Fotonické zakázané pásmo
- PCF - Vlákna fotonických krystalů (též mikrostrukturní vlákna)
- PLCF - Mikrostrukturní vlákna s tekutými krystaly
- PMD - Polarizační vidová disperze
- SCF - Suspended-core vlákna
- SMF - Standardní jednovidová vlákna
- TE - Transverzálně elektrické
- TM - Transverzálně magnetické
- TO - Příčné odchýlení

1 Úvod

Vývoj technologií v oblasti optických vláken zaznamenal za posledních dvacet let ohromný pokrok. Neustále vzrůstající požadavky na rychlost a kapacitu přenosu zejména v telekomunikačním světě stále nutí posouvat tento vývoj vpřed. Poměrně dlouhou dobu stačila rychlost a šířka pásma přenosu klasickým optickým kabelem na veškeré nároky. Postupně však přestala být tato kapacita dostačující a bylo zapotřebí dalších inovací. Zpočátku se vývoj soustředil zejména na to, jak klasickým optickým vláknem přenést více dat a celkově jak zvětšit šířku pásma. Inovovaly se tedy hlavně zdroje a detektory. Další skok ve vývoji byl zaznamenán s postupným využíváním vlastností spojených s nelineárními jevy, disperzí či polarizací. Až poté se vývoj zaměřil přímo na samotné vlákno s myšlenkami jak upravit strukturu či pozměnit materiály pro dosažení ještě lepších vlastností přenosu. U klasické struktury optického křemenného vlákna je totiž několik drobných nedostatků, které nelze zlepšit, pokud se zcela nezmění samotná struktura či používané materiály vlákna. Útlum těchto křemenných vláken nelze snížit pod hodnotu 0,1 dB/km. To znamená, že na dlouhých trasách je potřeba začlenit opakovače a zesilovače pro regeneraci signálu zhruba každých 50 km. Dále se také projevují nelineární jevy spojené s Kerrovým jevem, tedy automodulace fáze, křížová modulace či čtyřvlonné směřování, které zhoršují přenos. U klasických vláken je též problematické přenášet signál na vyšších vlnových délkách než zhruba 1625 nm [1].

Obsahem této práce je vytvoření pracoviště pro navazování optických svazků do speciálních vláken spolu s detekcí jejich výstupního vidového pole a dále také analýza nových struktur a materiálů speciálních druhů optických vláken. Zabývá se zejména takzvanými mikrostrukturními vlákny, též nazývanými PCF vlákny (Photonic crystal fibers) nebo MOF (Microstructured optical fibers) a jejich možnými variantami a aplikacemi. Jelikož je tato oblast vláknové optiky poměrně rozšířenou a složitou, nezabývá se tato práce obecnými principy přenosu a vlastnostmi spojenými s klasickými optickými vlákny. V práci se však objevují některé základní termíny z problematiky klasických optických vláken, které nejsou rozebírány příliš do hloubky. Větší důraz je tedy kladen spíše na konkrétní typy struktur, principy přenosu, simulacemi a praktickým měřením těchto nových typů vláken.

První kapitola obecně popisuje vlastnosti jednotlivých elementárních typů struktur fotonických krystalů. Popsány jsou jednotlivé dimenze periodicity těchto struktur a jejich vliv na procházející světelné záření. Je zde vysvětlen princip zakázaného pásma PBG (Photonic Band Gap) a jeho využití pro přenos světla mikrostrukturními vlákny pracujícími na tomto principu. U jednotlivých typů struktur jsou taktéž uvedena běžná uspořádání používaná v praxi a některé další aplikace.

Druhá kapitola se zabývá samotnými mikrostrukturními vlákny. Jsou zde uvedeny základní charakteristiky mikrostrukturních vláken, jako je útlum či disperze, a jejich srovnání s klasickými optickými vlákny. Dále jsou popsány hlavně vlákna s pevným jádrem (Solid Core) a vlákna s dutým jádrem (Hollow Core), u kterých jsou vysvětleny principy vedení světla v závislosti na typu struktury. Na konci jsou stručně představeny další varianty PCF vláken jako například nelineární PCF nebo Suspended Core PCF a také možnosti jak měnit jejich vlastnosti začleněním jiných druhů materiálů.

Třetí kapitola popisuje metody měření a stanovení parametru průměru vidového pole MFD (Mode-Field Diameter) a poskytuje tak teoretický podklad pro praktickou část. Popsány jsou jednak přímé metody měření, tedy měření v blízkém poli (Near Field) a ve vzdáleném poli (Far Field), kde jsou rovněž uvedeny možné sestavy pro samotné měření, a stručně také několik nepřímých metod měření MFD

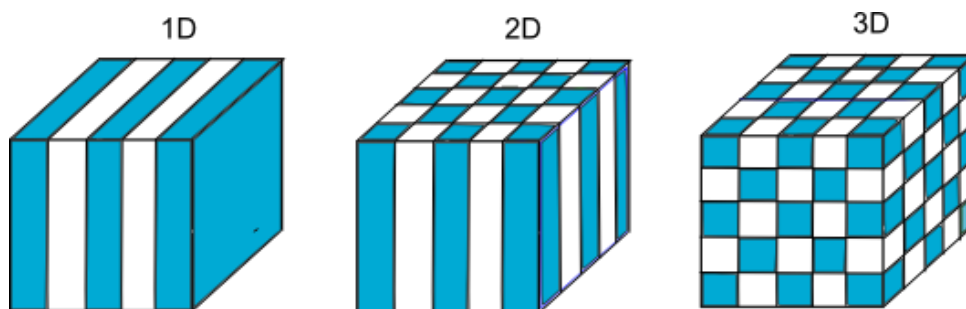
Čtvrtá kapitola, praktická, je rozdělena na tři podkapitoly. V první jsou uvedeny výsledky simulací v programu BeamPROP pro struktury jak klasických, tak mikrostrukturních vláken. U klasického vlákna je simulováno šíření energie v jádře a na jeho výstupu, tedy stopa pole, a dále rozbor jednotlivých vyšších vidů vedených vlákem. U PCF vlákna je taktéž simulována stopa pole základního vidu a její závislost na jednotlivých parametrech mikrostruktury. Součástí je také simulace konkrétního typu Solid Core vlákna typu ESM-Endlessly Single Mode (neustále jednovidové vlákno), které bude i prakticky měřeno v dalších kapitolách. Zkoumáno je zejména vedení jednotlivých vidů ve vláknech v závislosti na vlnové délce vstupního záření a ověření, zdali vlastnosti tohoto vlákna odpovídají katalogovým údajům. V druhé části je uvedeno experimentální měření a postup při návrhu a sestavování měřicího pracoviště pro navazování a detekci optických svazků v optických vláknech, které je založené na principu měření stopy pole v blízkém poli. Měřeno je jak standardní SM optické vlákno, tak i PCF vlákno ESM-12B. Výstupem měření jsou obrazy stopy pole základního módu na výstupu optického vlákna. U klasického vlákna jsou taktéž zkoumány vyšší vidy a jejich srovnání s výsledky simulací.

Pomocí obrazů změřené stopy pole vláken je ve třetí části stanoven průměr vidového pole MFD. Pomocí programu Matlab je vytvořen skript, který zpracovává nasnímané obrazy. Dále je zkoumána velikost MFD v závislosti na vlnové délce a vstupním výkonu.

Hlavním cílem práce bylo sestavení měřicího pracoviště, jehož realizace byla ověřena při prozkoumání jednotlivých metod měření stopy pole a s využitím teoretických principů o mikrostrukturních vláknech. Sestavené pracoviště by v budoucnu mělo sloužit k případnému testování a měření nových typů vláken. V České Republice totiž není mnoho institucí a pracovišť, které by se zabývaly měřením speciálních typů vláken.

2 Obecné principy fotonických krystalů

Jako první se fotonickými krystaly zabýval anglický fyzik John W. Rayleigh [3], který zkoumal jedno-dimenzionální periodické dielektrické struktury (alternující v jedné rovině). Periodickou dielektrickou strukturou se myslí prostředí, ve kterém se index lomu opakovaně mění. Bylo zjištěno, že při určitém uspořádání těchto struktur je možné zcela potlačit šíření světla na určitých vlnových délkách. To vše nezávisle na směr šíření a polarizaci. Celý tento jev se nazývá Fotonické zakázané pásmo PBG (Photonic Band Gap) a je podrobněji popsán v dalších kapitolách. Obor zabývající se fotonickými krystaly a jejich začleňování do oblasti vláknové optiky se začal rychle rozvíjet koncem 80. let 20. století, kdy Eli Yablonovitch a Sajeev John nezávisle publikovali studii o fotonických krystalech [1] [5]. Oproti Rayleighmu však zkoumali dvou-dimenzionální struktury dielektrik, pomocí kterých bylo možné usměrnit světelné záření a řídit podmínky jeho šíření úpravou těchto struktur [1]. Tyto dvou-dimenzionální fotonické krystaly tvoří základ PCF vláken a jsou nejčastěji realizovány ve formě vzduchových otvorů uvnitř křemenného vlákna. Tato vlákna jsou též podrobněji popsány v následujících kapitolách.

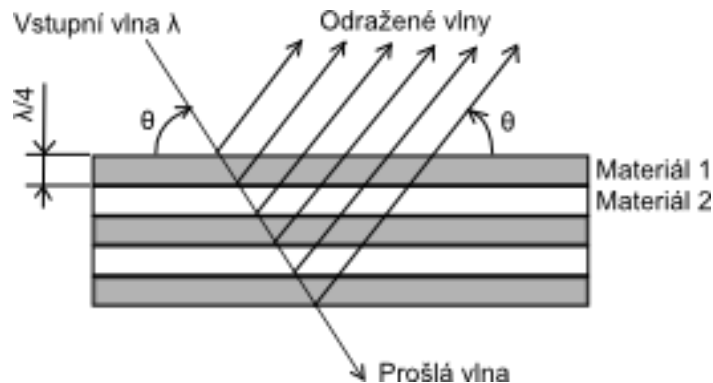


Obr. 1 Zjednodušené znázornění jednotlivých periodických struktur fotonických krystalů [1]

2.1 1D Fotonické krystaly

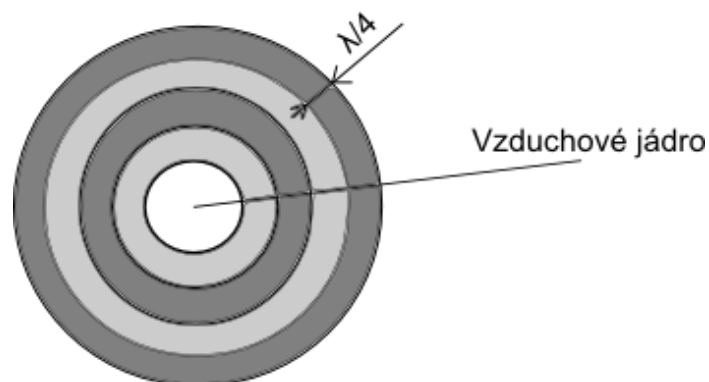
1D fotonický krystal zjednodušeně znázorněný na Obr. 1 nazývaný též jako Braggovo zrcadlo či vícevrstvý reflektor je nejjednodušším typem fotonického krystalu [3] [4]. Skládá se v podstatě ze dvou typů dielektrických vrstev s různým indexem lomu, které se periodicky opakují v jedné rovině. Při vhodné volbě indexů lomu a tloušťky vrstev se světlo procházející ve směru uspořádání vrstev odráží a přenáší postupně do následujících vrstev. Dochází tedy k Fresnelovu odrazu na každém rozhraní mezi různými vrstvami. Vlny, které se při průchodu odrazily, jsou ve fázi, ale prošlé vlny již nikoliv. Tím pádem se prošlé vlny mezi sebou vyruší. Uplatní se tedy pouze odražené složky světla, které mají za následek totální odraz (Obr. 2). Většinou se tyto struktury konstruují jako čtvrtvlnné. To znamená, že tloušťka každé z vrstev odpovídá čtvrtině vlnové délky vstupního záření.

Princip Braggova reflektoru se používá zejména v optických DBR laserech (Distribuovaný Braggův Reflektor), ve kterých tvoří součást rezonátoru nebo také v optických filtrech [4].



Obr. 2 Princip Braggova reflektoru [8]

Tento princip je možný implementovat i v oblasti optických vláken. Zatím však není zcela zdokonalen natolik, aby se tento typ vláken používal v praxi, a zůstává tak spíše v oblasti teorie. Struktura těchto vláken se skládá z jádra s nízkým indexem lomu obklopeného několika vrstvami s různými indexy lomu tvořící plášť s tím, že se střídají vrstvy s vyšším a nižším indexem lomu (Obr. 3). Výpočty a rovnice popisující návrh takového vlákna vycházejí z Blochova teorému pro pásové struktury. Každá z dielektrických vrstev je tedy popsána vlastní maticí odrazu a maticí přenosu. Tento typ vláken se v praxi nevyužívá a pozornost přitahují spíše fotonické krystaly a vlákna s 2D strukturou jejichž principy jsou již poměrně známé a v praxi nacházejí širší uplatnění [4].

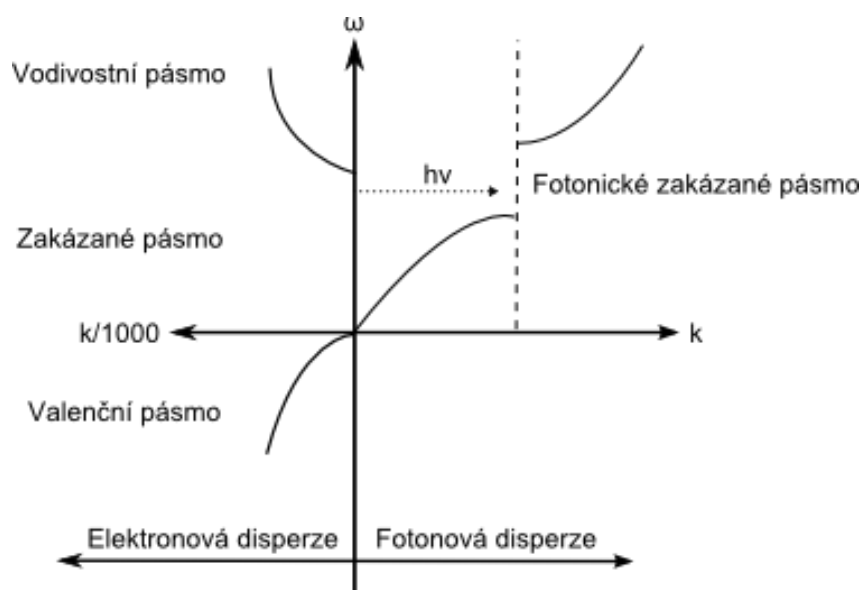


Obr. 3 Braggovo vlákno [4]

2.2 2D Fotonické krystaly a zakázané pásmo PBG

2D fotonické krystaly jsou nejjednodušeji představitelné jako soustava tyčí se čtvercovým průřezem, které jsou uspořádány ve tvaru šachovnice jako na Obr. 1. Opět se tedy střídají dva typy dielektrických vrstev s různým indexem lomu, tentokrát však ve dvou osách. Struktura může být realizována jako sestava dielektrických tyčí ve vzduchu případně jako vzduchové otvory vytvořené v dielektriku. Princip struktury se vzduchovými otvory v dielektriku tvoří základ samotných mikrostrukturních vláken, která jsou podrobněji popsány v kapitole 3. Tyto otvory mají velmi malé rozměry. Jejich průměr se pohybuje v řádech jednotek μm [1].

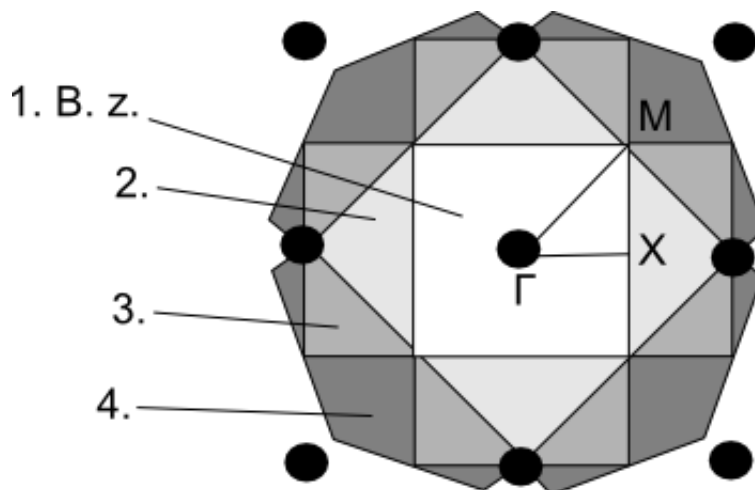
Hlavním přínosem a využitelným jevem u takovéto struktury fotonických krystalů je takzvaný princip zakázaného pásma PBG (Photonic Band Gap) [1] [3] [5] [6]. Zakázaným pásmem se myslí rozsah frekvencí či vlnových délek, na kterých světlo nešíří v určitém směru v dané struktuře. Je možné tento princip přirovnat k šíření elektronů a děr v polovodičích. Dochází totiž k interakci mezi elektronem a periodickým potenciálem krystalové mřížky a vznikají tak energetická pásma. Elektron pak nemůže projít danou strukturou, pokud jeho energie spadá do daného pásma. Nahradíme-li tento elektron fotonem a krystalovou mřížku nahradíme dielektrickou strukturou, tak je možné dosáhnout v podstatě stejného výsledku. Jediný rozdíl je v tom, že se krystalová mřížka utváří sama, avšak dielektrickou strukturu je nutné uměle vyrobit. V přírodě lze totiž nalézt jen malé množství přirozenou cestou takto utvořených struktur. Důležitou podmínkou je, aby byla vlnová délka dané částice (fotonu) srovnatelná s periodicitou struktury. Jedině tak se dosáhne správné interakce mezi částicí a strukturou.



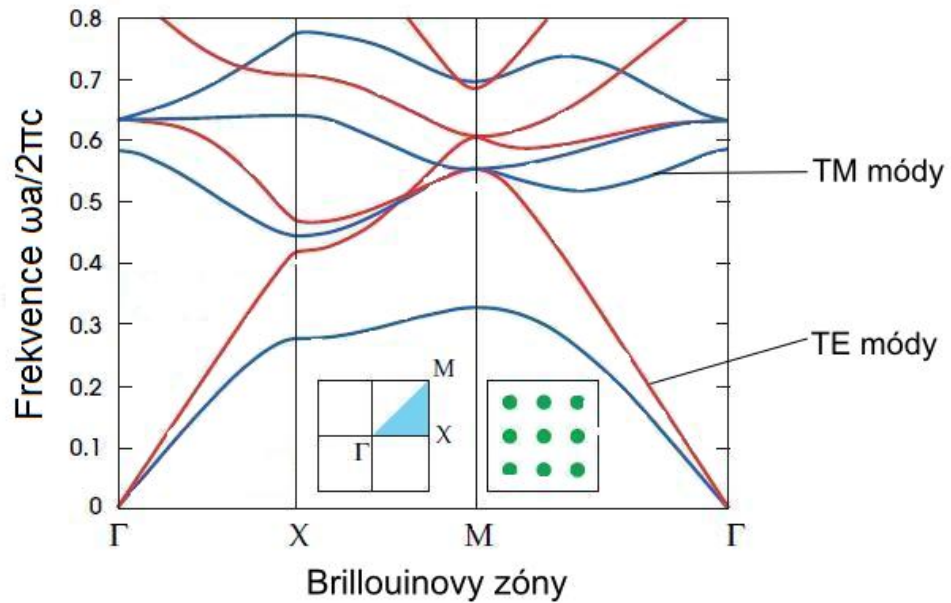
Obr. 4 Vztah mezi elektronovým a fotonickým zakázaným pásmem [5]

Na Obr. 4 je znázorněn vztah mezi principem zakázaného pásma u polovodičů a zakázaného pásma u fotonů pomocí závislosti úhlové frekvence na vlnovém vektoru. Jelikož jsou vzdálenosti v atomovém měřítku mnohem menší než u optických vlnových délek, musí být elektronový vlnový vektor vydělen hodnotou 1000. Na levé straně jsou znázorněny valenční, zakázaná a vodivostní pásma. Při rekombinaci elektronu a díry vznikne foton na hranici elektronového energetického pásma, který se volně šíří v daném směru. Pokud ale dojde k rekombinaci na rozhraní zakázaného a vodivostního pásma nemá se vzniklý foton z této rekombinace kam šířit. Dojde tedy ke vzniku jakéhosi pásma na fotonové straně, které odpovídá hranici zakázaného a vodivostního pásma na straně elektrické, kde je znemožněna rekombinace elektronů a děr [5].

Jako první příklad šíření světla v 2D dielektrické struktuře je uvedena soustava dielektrických tyčí ve vzduchu uspořádaných do tvaru čtverce. Na Obr. 6 je uvedeno rozložení TM vidů (transverzálně magnetických) a TE vidů (transverzálně elektrických) při šíření světla touto strukturou v ose XY. Tyto vidy reprezentují rozložení elektromagnetického záření v určitém směru. Světlo šířícího se v této ose je možné rozdělit na dva stavy polarizace, kde každá má svou vlastní pásovou strukturu (TE a TM). Na Obr. 6 je také znázorněna závislost normované frekvence na směru šíření světla ve struktuře pomocí takzvaných Brillouinových zón [3], které jsou důležitým aspektem při uvažování šíření světla v krystalických strukturách. Tyto zóny souvisí s rozložením jednotlivých bodů v mřížce (struktuře) krystalu a jejich vzájemné propojení v běžném a recipročním prostoru. Světlo se šíří podél pomyslného trojúhelníku postupně přes jednotlivé body Brillouinovy zóny označené velkými písmeny v Obr. 6 na ose x, které reprezentují velikost vlnového vektoru ve směru šíření světla. Například písmeno Γ reprezentuje střed první Brillouinovy zóny. Z průběhů je zřejmé, že minima a maxima jsou vždy na rozhraní jednotlivých zón. Na Obr. 5 je znázorněn příklad zobrazení jednotlivých Brillouinových zón u obecné čtvercové mřížky spolu s písmeny označující hlavní body první Brillouinovy zóny.



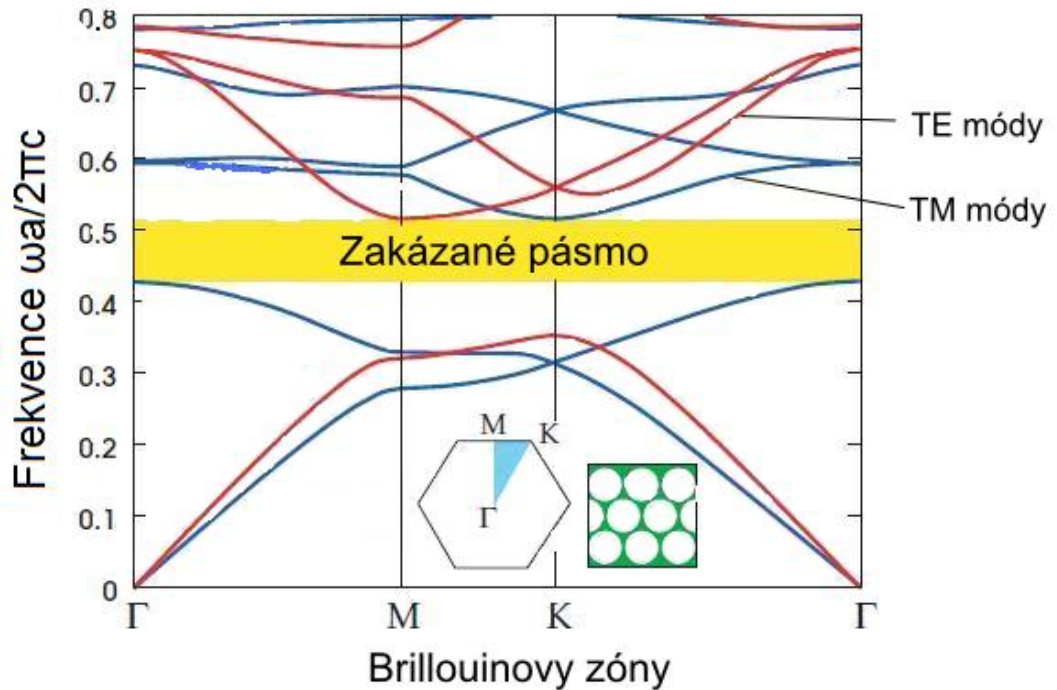
Obr. 5 Znáznornění Brillouinových zón u čtvercové mřížky [3]



Obr. 6 Zakázaná pásma u čtvercové struktury [3]

Dále je patrné, že TM módy vytvářejí určité zakázané pásmo mezi prvním a druhým stavem. Toto však neplatí pro TE módy, které se prolínají. Je to způsobeno únikem energie elektrického pole ven z dielektrických tyčí, a tudíž není možné u takovéto 2D struktury vytvořit zakázaná pásma pro oba stavy polarizace [3].

Pro vytvoření jevu zakázaného pásma pro oba stavy polarizace je nutné změnit strukturu mřížky krystalu. Vhodnou změnou je totiž možné docílit i toho, aby se zakázaná pásma obou stavů polarizace neprolínaly a vytvořily takzvané totální zakázané pásmo. Z předchozí struktury bylo patrné, že se u TM módů vytváří zakázané pásmo na základě izolovaných oblastí s vysokou permitivitou ϵ a naopak u TE módů se pásmo vytváří na základě co nejlepšího propojení jednotlivých bodů mřížky. Předpokladem struktury mřížky je tedy vhodná kombinace těchto vlastností [3]. Nejlépe se toho docílí uspořádáním bodů mřížky do tvaru trojúhelníku. Takovéto uspořádání se nazývá hexagonální. Dále se také zamění jednotlivá dielektrika tím, že je místo dielektrických tyčí ve vzduchu použito vzduchových otvorů v dielektrickém substrátu. Tato struktura v podstatě tvoří základ pro šíření světla v mikrostrukturách, neboli PCF vláknech, kterými se tato práce zabývá [1].

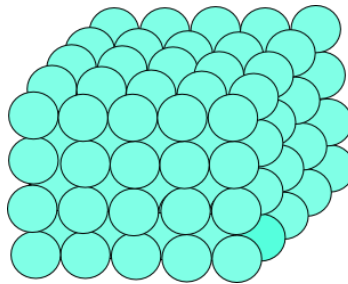


Obr. 7 Totální zakázané pásmo u hexagonální struktury [3]

Z Obr. 7 je patrné, že již došlo v utvoření totálního zakázaného pásma v určitém rozsahu frekvencí, které je platné pro oba stavy polarizace. Podmínka, že v daném totálním pásmu je znemožněno šíření záření platí, pouze pokud uvažujeme krystalovou strukturu jako nekonečnou. Pokud by však ve struktuře vznikne defekt narušující periodicitu, znamená to, že na určitých izolovaných frekvencích ležících uvnitř zakázaného pásma je možné šíření světla strukturou. Procházející světlo totiž zůstane spoutáno uvnitř defektu. Je možné vnímat tento mechanismus jako dokonalé zrcadlo, které pracuje jen na určité frekvenci (vlnové délce). Tento princip tvoří základ pro šíření světla v mikrostrukturních vláknech s dutým jádrem, takzvaných hollow-core vláknech. Světlo zavedené do dutého jádra se pak šíří uvnitř vzduchového otvoru, který narušuje periodicitu struktury. Tento jev nabízí zcela nové možnosti ve vláknové optice, jelikož je možné šíření světla prostředím s nižším indexem lomu než u klasických optických vláken [3]. Vzduchové prostředí je možné nahradit například jiným plynem, teoreticky i vakuem. Existují i struktury plněné například tekutými krystaly, které jsou představeny v kapitole 3.3.

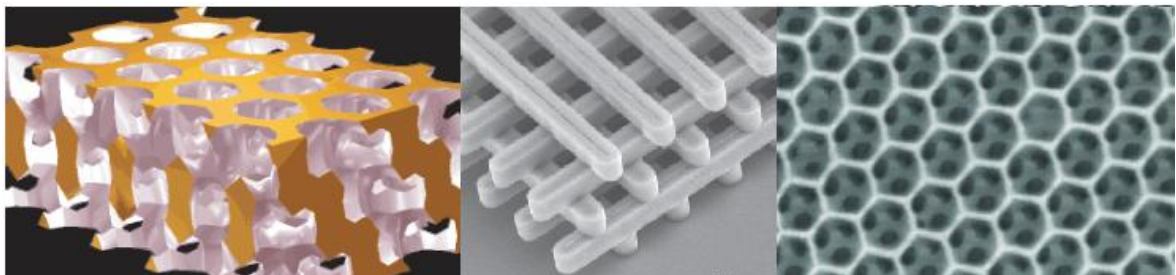
2.3 3D Fotonické krystaly

Struktury periodické ve třech dimenzích (ve všech třech osách), vykazují stejné vlastnosti jako 2D struktury, tedy vznik zakázaných pásem atd. Je však velmi složité takovéto struktury vytvořit uměle a simulovat jejich vlastnosti. 3D fotonické krystaly je možné srovnat se skutečnými krystaly a strukturami vyskytujícími se v přírodě. Nejznámější takovou strukturou je opál, kámen tvořený z koloidního křemene. Tato struktura se v podstatě skládá z malých kuliček velikosti desetin μm uspořádaných do tvaru krychle, znázorněno na Obr. 8. Při šíření světla takovouto strukturou dochází k jeho difrakci (ohybu) na rozhraní kuliček s jejich meziprostorem. Odražené světlo se pak jeví jako jinak zbarvené v závislosti na jeho průchodu strukturou. Dalšími příklady z přírody jsou například motýlí křídla či paví pera, jejichž struktura též obsahuje periodické struktury s odlišným indexem lomu [9].



Obr. 8 Struktura opálu [9]

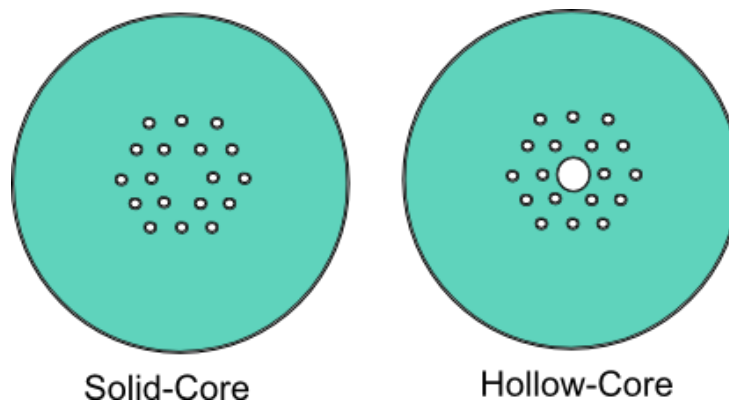
Podobné struktury se celkem obtížně konstruuji uměle. Mezi uměle vytvořené 3D struktury patří například Yablonovit, což je struktura složená z válcových otvorů navrtaných do dielektrického substrátu a uspořádaných do tvaru trojúhelníku [3]. Byl jedním z prvních umělých 3D fotonických krystalů, který vykazoval totální zakázané pásmo. Další strukturou je takzvaná „Woodpile“ struktura složená s vrstev dielektrických hranolů střídající směr v každé druhé vrstvě nebo struktura zvaná jako inverzní opál, která je zobrazena na Obr. 9.



Obr. 9 Ukázka struktury Yablonovit, Woodpile a Inverse opal [3]

3 Mikrostrukturní vlákna

Mikrostrukturní vlákna, též nazývaná jako PCF vlákna (Photonic Crystal Fibers) nebo také MOF vlákna (Microstructured Optical Fibers) jsou většinou uvažovány jako struktury fotonických krystalů periodické ve dvou dimenzích [1] [3]. Jak už bylo řečeno v kapitole o 2D krystalech, jako základní uspořádání se nejčastěji používá vzduchových otvorů (kapilár) vytvořených v dielektrickém substrátu, nejčastěji křemene SiO_2 . Tyto otvory vedou podél celého vlákna a jsou soustředěny kolem jádra vlákna většinou v hexagonálním tvaru o několika vrstvách. Podle typu jádra vlákna se rozdělují na vlákna s plným jádrem (Solid Core) nebo s dutým jádrem (Hollow Core). Tyto dva typy se také odlišují způsobem vedení světla uvnitř vlákna. Zatímco Solid Core vlákna využívají modifikovaného totálního odrazu podobnému tomu u klasických optických vláken, Hollow Core vlákna již využívají principu, který odlišuje mikrostrukturní vlákna od běžných optických vláken, a tím je princip vedení světla v dutině s využitím principu zakázaného pásma PBG, který je popsán v kapitole 2.2. Je však nutné říct, že existuje mnohem více typů struktur těchto vláken, které vykazují další jedinečné vlastnosti. Tyto struktury se vyznačují asymetrickým uspořádáním jednotlivých prvků a odlišným tvarem, které slouží k dosažení velmi konkrétních požadovaných vlastností a jejich výroba je tedy spíše na zakázku. Nejrozšířenější jsou však hexagonální struktury Solid-Core a Hollow-Core uvedené na Obr. 10.

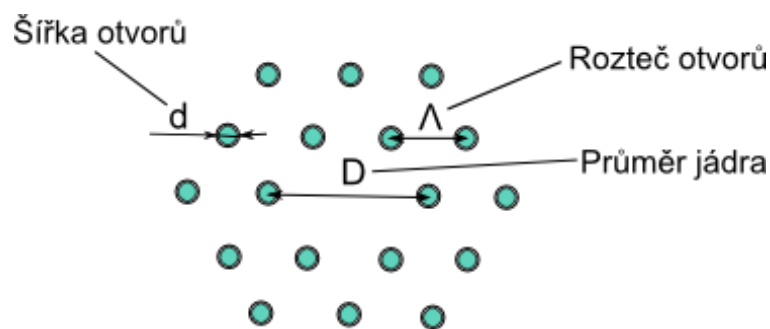


Obr. 10 Hollow core a solid core struktury [1]

Mezi nevýhody těchto vláken patří kromě složitější výroby například obtížné zkracování či sváření, jelikož dojde k narušení citlivé struktury vlákna. Pro spojování se tedy používají hlavně mechanické spojky. Zajímavostí je, že se konce těchto vláken nesmí čistit tekutými rozpouštědly kvůli kapilárním silám, díky kterým by se tekutina vtáhla dovnitř vlákna, a došlo by k narušení prostředí pro průchod záření [10]. Tato vlákna se používají zejména ve vláknových laserech a zesilovačích, kde je potřeba vyššího vstupního výkonu. Dále pak v senzorové technice nebo v laditelných optických filtrech.

3.1 Základní charakteristiky mikrostrukturálních vláken

Základní charakteristiky mikrostrukturálních vláken se příliš neliší od těch pro klasická optická vlákna. Pouze je trochu modifikována jejich velikost díky odlišné struktuře vlákna. Velmi důležitou roli hraje v těchto parametrech geometrie samotné struktury. Nejdůležitějšími jsou hlavně šířka vzduchových otvorů d , rozteč otvorů Λ , průměr jádra D a také počet vrstev vzduchových otvorů kolem jádra N_r , znázorněné na Obr. 11. V publikacích se často využívá i poměru d/Λ [1] [3] [5] [6]. Jelikož je nejstandardnější struktura hexagonální, budou v následující kapitole popisovány parametry, jejichž vztah se odvíjí zejména od tohoto tvaru. U ostatních typů struktur platí samozřejmě stejné veličiny, avšak jejich analýza a podrobnější stanovení je obtížnější v závislosti na geometrické složitosti struktury.



Obr. 11 Základní geometrické parametry hexagonální struktury [3]

Při uvažování indexu lomu n u PCF vláken je také nutné brát v úvahu samotnou strukturu. Index lomu jádra je v podstatě neměnný a závisí pouze na typu vlákna. U Solid-Core vlákna je jádro tvořeno klasickým SiO_2 s indexem lomu $n_g = 1,44$ a u Hollow-core je jádro tvořené vzduchem, tedy s indexem lomu $n_a = 1$. Index lomu pláště je však mnohem komplikovanější. Hranice mezi jádrem a pláštěm totiž není, zejména u Solid-Core vláken, pevně stanovena (podobně jako u optických vláken s gradientní změnou indexu lomu). Dále se také musí započítat jak index lomu okolního křemene, tak i veškeré prvky a vzduchové otvory soustředěné kolem jádra. Proto se používá efektivní (zprůměrovaný) index lomu n_{eff} , jehož velikost závisí i na celkových parametrech struktury. Dále je zapotřebí uvést některé další veličiny, pomocí kterých se popisuje šíření světla v těchto vláknech jako je normalizovaná frekvence $k\Lambda$ a normalizovaná podélná složka vlnového vektoru $\beta\Lambda$. Pro dané prostředí s indexem lomu n obecně platí, že pokud $\beta < kn$, je umožněno průchodu záření a naopak pokud $\beta > kn$, je záření evanescentní, tedy postupně se vytrácející [6]. Toto je důležitý poznatek při tvorbě struktur mikrostrukturálních vláken, kde se střídají oblasti s různým indexem lomu.

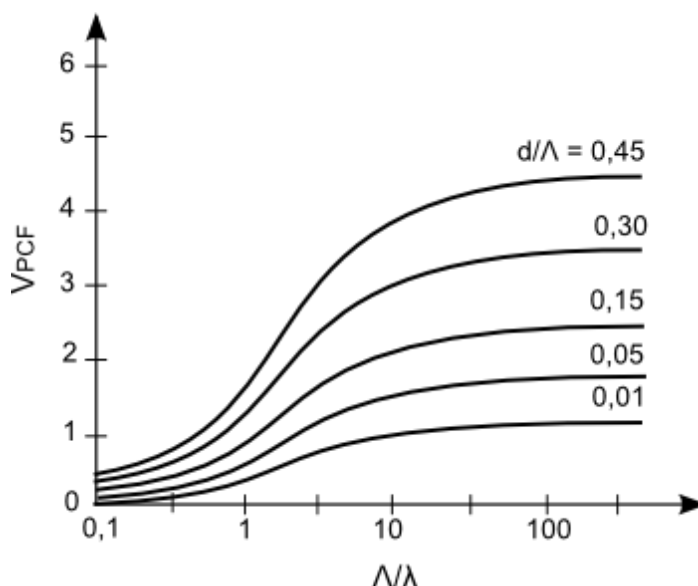
Pro mikrostrukturální vlákna také platí, že pokud $\beta < k$, záření prochází celou strukturou. Pokud je β v rozsahu $k < \beta < kn_g$, světlo se šíří pouze v oblasti, kde je materiál SiO₂. Ve vzduchových otvorech je pak záření evanescentní. Důležitá je také definice normovaných parametrů u a v , které reprezentují šíření světla v jádře a plášti (u-jádro, v-plášť) [6]:

$$u = \Lambda \sqrt{k^2 n_g^2 - \beta^2} \quad v = k\Lambda \sqrt{n_g^2 - 1} \quad (1)$$

Jejich vzájemný vztah je dán u mikrostrukturálních vláken polynomem definující závislost indexu lomu n_{max} na normalizované frekvenci V při poměru $d/\Lambda = 0,4$ a $n_g = 1,44$ [6]:

$$u(v) = (0,00151 + 2,62v^{-1} + 0,155v - 0,000402v^2 + 3,63 \times 10^{-6}v^3)^{-1} \quad (2)$$

Na následujícím grafu na Obr. 12 je zobrazena závislost různých poměrů šířky otvorů k jejich rozteči d/Λ :



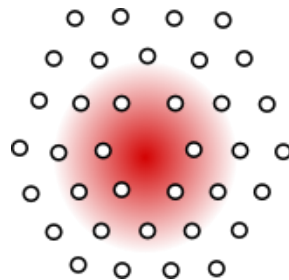
Obr. 12 Závislost normované frekvence na poměru Λ/λ [6]

Mikrostrukturální vlákno je jednovidové pokud platí: $d/\Lambda < 0,43$.

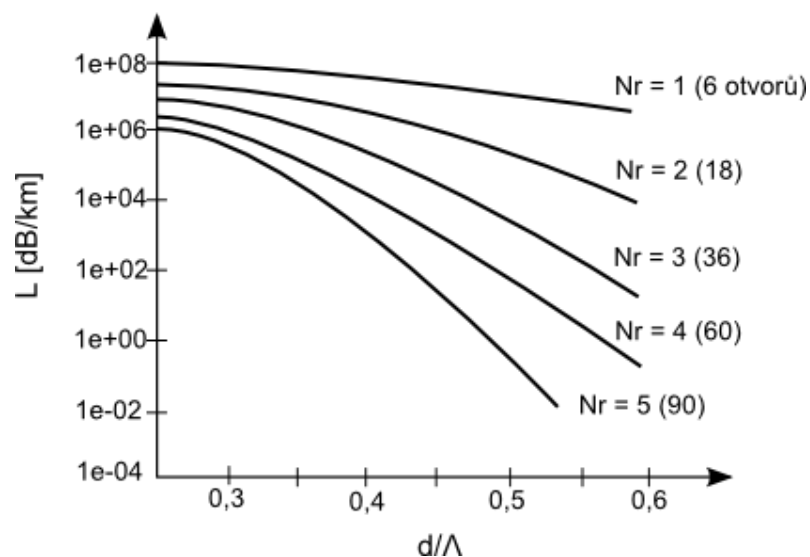
Pro jednotlivé oblasti s různým n je také definována příčná efektivní vlnová délka, která určuje, zdali je světlo vázáno k danému prvku ve struktuře (např. vzduchovému otvoru) [6]:

$$\lambda_{eff}^i = \frac{2\pi}{\sqrt{k^2 n_i^2 - \beta^2}} \quad (3)$$

Útlum PCF vláken je ovlivněn v podstatě stejnými faktory jako u klasických optických vláken. Hlavní podíl na útlumu mají jednak Rayleighův rozptyl na částicích SiO_2 menších než je vlnová délka λ , tak i absorpce v infračervené a ultrafialové oblasti, které vznikají interakcí částic procházejícího záření s částicemi SiO_2 , při kterých vzniká teplo. U PCF vláken navíc vzniká útlum způsobený únikem energie základního vidu ven z jádra, kde část záření proniká do pláště mezi jednotlivé vzduchové otvory ve struktuře [1]. Tento únik energie do pláště je znázorněn na Obr. 13. Toto také platí díky vztahům mezi β , k a n definovaným v úvodním odstavci této kapitoly, kde je popsáno za jakých podmínek se záření šíří strukturou a kdy je naopak evanescentní.



Obr. 13 Únik energie základního módu do struktury vlákna [3]

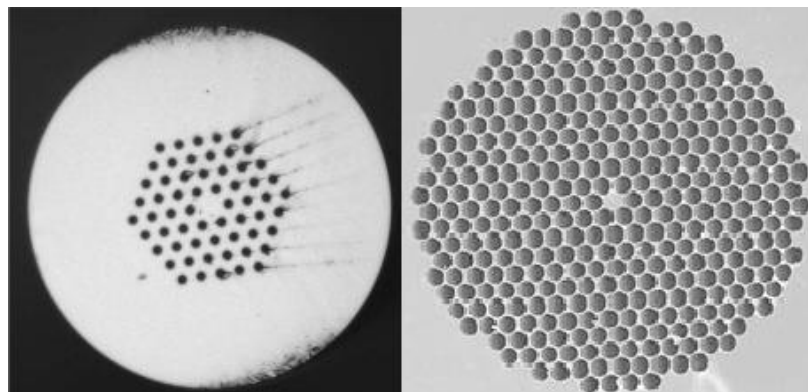


Obr. 14 Závislost útlumu na počtu vrstev struktury (otvorů) [1]

Tento útlum je tedy ovlivněn z velké části samotnou strukturou. Při zvolení vhodného poměru šířky vzduchových otvorů a jejich rozteče d/λ a také počtu vrstev otvorů N_r lze tento útlum snížit až ke hranici 0,1 dB/km. Při zvyšování počtu vrstev otvorů se útlum snižuje, znázorněno na Obr. 14. Únik energie na jednotlivých typech struktur je dobře patrný v praktické části, v kapitole, kde jsou uvedeny simulace jednotlivých struktur. Obecně lze říct, že u komerčních vláken, které mají samozřejmě vhodně zvolené geometrické parametry, není složka útlumu převažující.

3.2 Vlákna s pevným jádrem (Solid-Core)

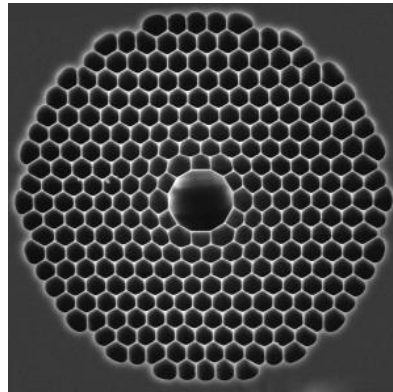
Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, mikrostrukturní vlákna s plným jádrem spadají do kategorie vláken fotonických krystalů. Nevyužívají však jevu zakázaného pásma. K vedení světla v tomto vlákně se využívá jakéhosi modifikovaného totálního vnitřního odrazu. Podobně jako u klasických optických vláken má totiž jádro vyšší hodnotu indexu lomu než plášť. Jádro i plášť jsou většinou vyrobené ze stejného typu materiálu (křemen s indexem lomu 1,44). Index lomu pláště je totiž nutné uvažovat jako efektivní neboli zprůměrovaný, pokud počítáme se vzduchovými otvory. Podmínkou pro dosažení totálního odrazu je, aby konstanta šíření $\beta = kn$. Pokud bude navíc β v rozsahu $k < \beta < kn_g$, světlo se bude šířit pouze ve skleněném materiálu a ve vzduchových otvorech bude evanescentní, viz kapitola 3.1 [6]. Světlo je tím pádem díky totálnímu odrazu uvězněno uvnitř oblasti jádra ve formě určitého tvaru kopírujícího tvar jádra s minimálním únikem jeho energie mezi vzduchové otvory. Aby toto bylo možné, musí mít vlákno patřičný poměr $d/\Lambda < 0,43$, aby mohl být uvažován pouze základní vid šířící se vláknem bez ohledu na vlnovou délku záření [1]. Tato vlákna se tak nazývají jako neustále jednovidová s označením ESM (Endlessly Single Mode), které jsou mimo jiné součástí experimentálního měření a simulací v praktické části. Umožňují totiž pracovat v jednovidovém režimu v širokém rozsahu pracovních λ , zhruba 200 – 2000 nm což je výhoda oproti klasickým vláknům [13]. Obyčejná jednovidová vlákna jsou na těchto nízkých λ již ve vícevidovém režimu. Přináší to mnoho výhod, jelikož je pak díky většímu jádru možné navázat do vlákna záření s vysokým výkonem, ale relativně nižší hustotou výkonu, což má za následek zmírnění nelineárních jevů, které vznikají zejména při navazování záření s vysokou intenzitou. Tato vlákna mají také mnohem vyšší numerickou aperturu $NA \sim 1$, oproti klasickým jednovidovým vláknům jejichž NA je v rozsahu 0,11 až 0,21. Ve většině případů lze tato vlákna opatřit standardními typy konektorů (FC, APC.), jelikož mohou mít v podstatě stejný vnější průměr, například 125 μm . Z cenového hlediska jsou však mnohonásobně dražší oproti například klasickým jednovidovým vláknům, díky těmto novým technologiím až dvacetinásobně při uvažování ceny za metr samotného vlákna [14].



Obr. 15 Ukázka reálných solid core struktur [1] [15]

3.3 Vlákna s dutým jádrem (Hollow-Core)

Mikrostrukturní vlákna s dutým jádrem využívají principu zakázaného pásma na periodické struktuře fotonických krystalů. U vláken využívající odrazu na rozhraní látek s různým indexem lomu je podmínkou, že index lomu jádra musí být větší než index lomu pláště. U mikrostrukturních vláken využívající princip PBG je však možné šíření a vázání světla uvnitř jádra s nižším indexem lomu než pláště, tedy vzduchového jádra [3]. Přináší to mnohé výhody, zejména rozšíření spektra použitelných vlnových délek, jelikož se světlo šíří vzduchem, tedy nikoliv pevnou látkou, ale plynem. Jak už bylo řečeno v kapitole 2.2, tato vlákna pracují jako dokonalé „zrcadlo“ v určitém rozsahu vlnových délek, kdy je procházející záření spoutáno uvnitř jádra z důvodu vzniku zakázaného pásma v pásmové struktuře. Pokud dorazí světlo na rozhraní vzduchového jádra a pláště, kde jsou periodicky uspořádány vzduchové otvory, dochází ke koherentnímu rozptylu. K utvoření zakázaného pásma tak dojde díky složené interferenci z dílčích rozptýlených složek světla [3].



Obr. 16 Ukázka reálné struktury Hollow-Core vlákna [10]

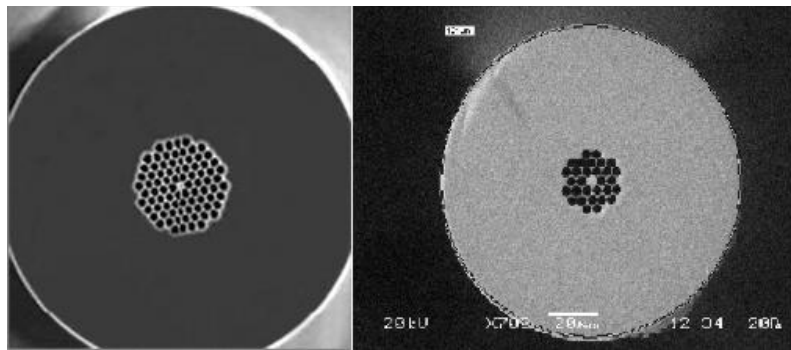
Hollow-Core vlákna se používají například pro kompresi pulsů s vysokou intenzitou, jelikož je většina výkonu vázána k jádru. Díky různým úpravám struktury lze dosáhnout vyšší numerické apertury (až 0,7) [10], případně začlenění více jader do jednoho vlákna, jelikož by se díky vázané energii v jádru neměly jednotlivé složky ovlivňovat, jako je tomu u klasických vláken, kde dochází při zavedení pulsů s vysokou intenzitou k interakci jednotlivých složek a následným nelineárním jevům jako je například křížová modulace či čtyřvlnné směšování. Další alternativou je zavedení jiných typů tekutin do jádra pro dílčí modifikaci indexu lomu.

3.4 Další speciální typy PCF vláken

Existuje mnoho různých variant a tvarů samotných struktur, kterými lze dosáhnout podobné nebo dokonce lepší vlastnosti šíření světla v PCF vláknech. Kromě odlišné geometrie lze též pozměnit i samotné materiály vlákna. Například místo SiO_2 se využije materiálů na bázi fluoridu [16].

Nelineární PCF

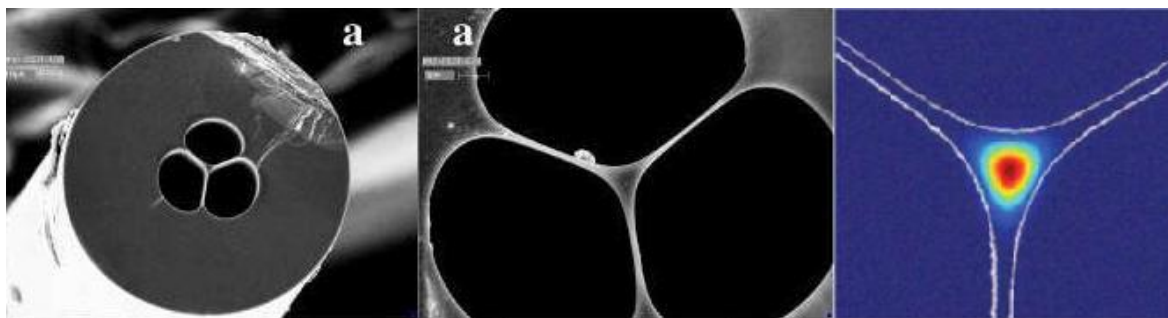
Nelineární mikrostrukturální vlákna jsou v podstatě modifikací klasických Solid-Core PCF vláken. Využívají taktéž modifikovaného vnitřního odrazu k vedení světla. Hlavním rozdílem je tvar mikrostruktury, pomocí kterého se dosahuje specifických vlastností jako například parabolický tvar průběhu chromatické disperze. Mají velmi malé jádro, a tedy vysoký poměr $d/\Lambda > 90\%$ [16] [17]. Tato vlákna pracují spíše na nižších λ kolem 850 nm. Podporují tak i vícevidový režim, kdy jsou i vyšší vidy dobře vázané k jádru díky velkému rozdílu indexu lomu jádra a pláště. Někdy je jádro dokonce dotované příměsí s vysokým indexem lomu pro ještě větší navýšení tohoto rozdílu. Dále se vyznačují vysokou nelinearitou pro podporu jevů jako je čtyřvlonné směšování.



Obr. 17 Ukázka struktur nelineárních PCF vláken [12] [14]

Suspended-Core vlákna

Vlákna zvaná Suspended-Core Fibers – SCF patří do kategorie nelineárních PCF vláken, jelikož mají nepravidelný tvar struktury s vysokým rozdílem indexu lomu jádra a pláště díky velmi malému průměru jádra (až 1,3 μm), který je srovnatelný s vlnovou délkou vedeného světla. Mají dle názvu jakési „zavěšené“ jádro [18] [19] [20]. Kolem jádra jsou umístěny tři, popřípadě šest velkých vzduchových otvorů, mezi nimiž jsou tenké výztuhy, které spojují jádro k vnějšímu plášti. Šířka výztuh držících jádro je velmi tenká, zhruba okolo 100 nm. Díky těmto rozměrům je skoro 90 % výkonu přenášeno v jádře. K dalším vlastnostem patří také vysoká NA. Tato vlákna nachází velmi dobré využití například jako chemické senzory nebo ve spektroskopii. Na Obr. 17 je znázorněn typický tvar struktury SCF vláken a rozložení energie základního vidu v jádře.



Obr. 18 Detailní pohled na strukturu SCF vlákna a rozložení energie v jádru [20] [29]

Liquid Crystal PCF

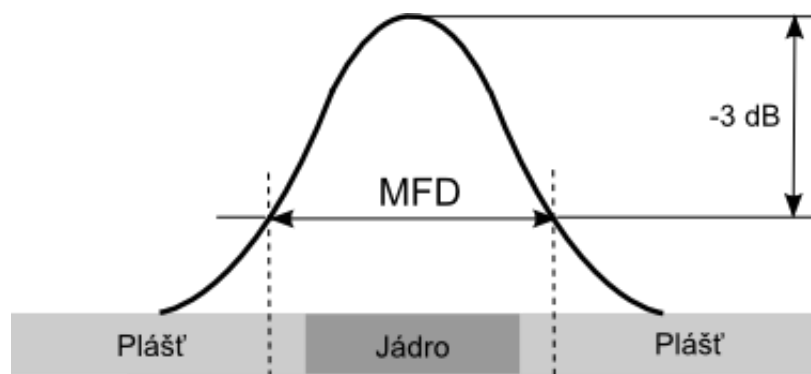
Vlastnosti mikrostrukturálních vláken je možné měnit kromě změny geometrické struktury také použitím jiných materiálů. Otvory plněné vzduchem je možné naplnit jinou tekutinou s požadovaným indexem lomu. Jedním z vhodných materiálů jsou například tekuté krystaly. Vlákná plněná tekutými krystaly se nazývají PLCF (Photonic Liquid Crystal Fibers) [30]. U tohoto typu vláken lze dosáhnout duálního způsobu vedení světla, který je závislý na teplotě tekutých krystalů. Pokud je teplota krystalů nad hranicí 55 °C, záření se šíří pomocí totálního odrazu, avšak pokud klesne teplota pod 55 °C, tak se světlo šíří na principu zakázaného pásma PBG [31]. Další výhodou je možnost nastavení polarizačních vlastností díky orientaci molekul tekutých krystalů. Využití tak kromě senzorů nachází v kompenzátorech polarizačně vidové disperze PMD či v optických filtrech.

Fluoridová a chalkogenidová vlákna

Mezi speciální vlákna patří i druhy, kde je základní materiál SiO_2 zcela nahrazen či dotován příměsí jiného materiálu. Velmi používanými jsou substráty na bázi fluoridu jako například fluorid-zirkon případně chalkogenidová vlákna s příměsí síry nebo selenidu [32]. Takováto vlákna se vyznačují rozšířením infračervené hranice útlumové charakteristiky směrem k vyšším hodnotám, jelikož se v daných materiálech méně projevuje absorpce v IR oblasti. Používají se zejména v chemických senzorech, IR zdrojích, zesilovačích nebo v optických přepínačích [33].

4 Měření parametru MFD

Velmi důležitým parametrem pro charakterizaci parametrů optických vláken je průměr vidového pole MFD (Mode Field Diameter). Pro obecnou rotačně symetrickou strukturu vychází z rozložení intenzity záření základního vidu šířícího se uvnitř jádra vlákna, tedy charakter vidového pole. Profil intenzity má Gaussovský charakter. Obecně je MFD definován jako pokles maxima profilu optické intenzity této stopy pole o 3 dB [21] [22] [23]. Je užitečným parametrem zejména při připojování optického vlákna ke zdroji případně při spojování různých typů vláken a při definici nelinearit. Při spojení dvou vláken s různou velikostí MFD totiž dochází ke značnému útlumu. Obecně bývá MFD většinou trochu větší než průměr jádra, jelikož je část energie základního módu vedena i v plášti (Obr. 19). Toto samozřejmě platí i pro PCF vlákna, kde část energie proniká mezi jednotlivé vzduchové otvory ve struktuře [3].



Obr. 19 Znáznornění MFD vzhledem k oblastem vlákna [21]

MFD lze vyjádřit dvěma základními způsoby. Prvním způsobem je MFD vyjádřen rozložením $E(r)$ v blízkém poli (Near-Field NF), kde $E(r)$ je rozložení intenzity elektrického pole přímo na výstupu vlákna. Blízkým polem se rozumí vzdálenost zhruba srovnatelná s vlnovou délkou vstupního záření, které se šíří optickým vláknem. Metody jak tento parametr měřit jsou popsány v kapitole 4. Pro blízké pole je MFD definován takzvaným Petermannovým II. Vzorcem [21]:

$$MFD = d_n = 2\sqrt{2} \sqrt{\frac{\int_0^\infty E^2(r)r^3 dr}{\int_0^\infty E^2(r)r dr}} \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

kde $E(r)$ je rozložení intenzity elektrického pole a r radiální vzdálenost.

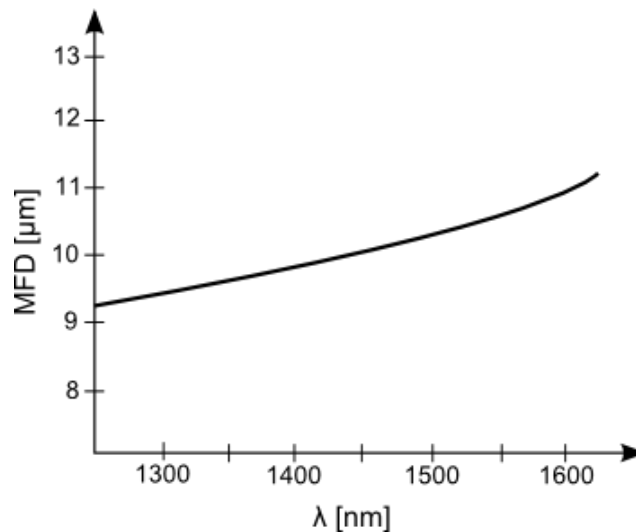
Druhým způsobem jak stanovit MFD je pomocí rozložení intenzity změřením ve vzdáleném poli (Far Field FF) [21]:

$$MFD = d_f = 2\sqrt{2} \sqrt{\frac{\int_0^\infty F^2(p) p dp}{\int_0^\infty F(p)^2 p^3 dr}} \quad [\mu\text{m}] \quad (4)$$

kde $F(p)$ je rozložení intenzity v závislosti na úhlu. Existuje mnoho dalších modifikací těchto vztahů, avšak všechny vyjadřují totéž. Souvislost mezi těmito dvěma vyjádřeními lze určit pomocí Hankelovy transformace (rotačně symetrická 2D Fourierova transformace) [21]:

$$F(p) = \int_0^\infty E(r) J_0(rp) r dr = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \mathcal{H}\{E\}(p) \quad (5)$$

kde J_0 je první Besselova funkce nultého řádu. U klasických SMF vláken na vlnové délce 1310 nm je MFD zhruba 9,2 μm . Na 1550 nm je to 10,5 μm (průměr vlákna je 8,2 μm). Závislost MFD pro SM vlákno je znázorněna na Obr. 20. Velikost MFD roste téměř lineárně s rostoucí vlnovou délkou.



Obr. 20 Závislost MFD na λ pro SMF vlákno [21]

MFD dále slouží k výpočtu různých typů ztrát způsobené mikroohyby, makroohyby, nepřesností spojených konců vláken, popřípadě vyosením vlákna, kde část energie uniká z jádra [21].

Ztráty vlivem posunu spoje [21]:

$$L_u = \left(\frac{2u}{d_f}\right)^2 \quad [dB] \quad (6)$$

kde u je posun konce vlákna v příčném směru

Ztráty vyosením χ [21]:

$$L_\chi = \left(\frac{kn_e\chi d_n}{4}\right)^2 \quad [dB] \quad (7)$$

kde k je vlnové číslo a n_e index lomu prostředí, okolo kterého je vlákno vyosené

Ztráty makroohyby [21]:

$$\gamma_M = F(\lambda) \sqrt{\frac{d_\infty^3}{R}} e^{\left(\frac{27}{3} \frac{R}{k_1^3 d_\infty^3}\right)} \quad [db/km], \quad d_\infty = \frac{4}{\sqrt{\beta^2 - k_1^2}} \quad (8), (9)$$

kde R je poloměr ohybu, d_∞ MFD vyjádřený pomocí konstanty šíření základního vidu β a vlnového čísla pro plášť $k_1 = n_1 k$

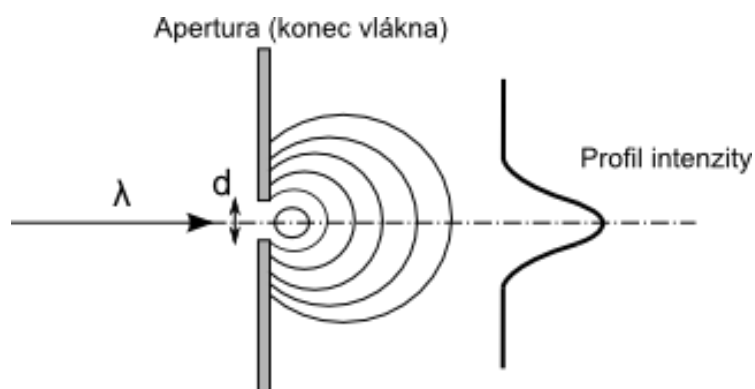
Ztráty mikroohyby [21]:

$$\gamma_\mu(p) = \frac{A}{2^{4+6p}} d_n^2 k_1^{2p} \frac{d_\infty^{4p}}{\left[\left(\frac{3}{2}-p\right) + \left(p-\frac{1}{2}\right)\left(\frac{d_\infty}{d_n}\right)^2\right]^2} \quad [db/km] \quad (10)$$

Metody jeho měření vycházejí ze způsobu získání výstupní stopy vidového pole. Rozdělují se na metody přímé a nepřímé. Přímé metody vycházejí z konkrétních teoretických definic MFD a patří k nim tedy měření v blízkém poli vlákna NF (Near-Field) a měření ve vzdáleném poli FF (Far-Field). Mezi nepřímé metody, které jsou v této práci zmíněny pouze okrajově, patří metody měření MFD na základě offsetu dvou vláken, pomocí průchodu záření přes aperturu s nastavitelným průměrem nebo metody založené na prostorové filtraci [21].

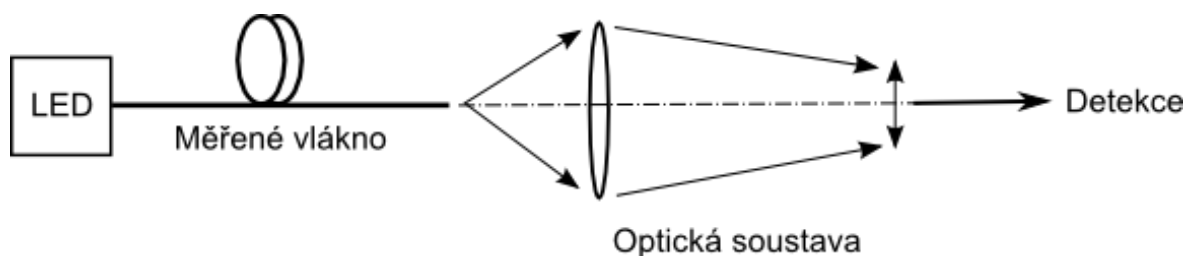
4.1 Metoda Near-Field

Metoda měření v blízkém poli (Near Field) jak napovídá název, je měření intenzity rozložení vidového pole přímo na konci (v jeho bezprostřední blízkosti) optického vlákna a následný numerický výpočet MFD přímo z výstupního profilu této intenzity [21]. Jelikož se jedná o blízké pole, měření tohoto výstupu musí probíhat ve vzdálenosti, která nepřekračuje vlnovou délku vstupního záření. Na Obr. 21 je znázorněn tento princip.



Obr. 21 Znázornění blízkého pole [29]

Je velmi podobný používanému v klasických optických mikroskopech, kde se prosvěcuje malá apertura. Aperturou je v tomto případě konec optického vlákna. Pokud by byla vzdálenost měření vyšší, nebylo by možné dobře změřit výstupní pole, jelikož se záření při určité vzdálenosti začne značně rozptylovat do okolí [29].



Obr. 22 Princip měření MFD v blízkém poli NF [21]

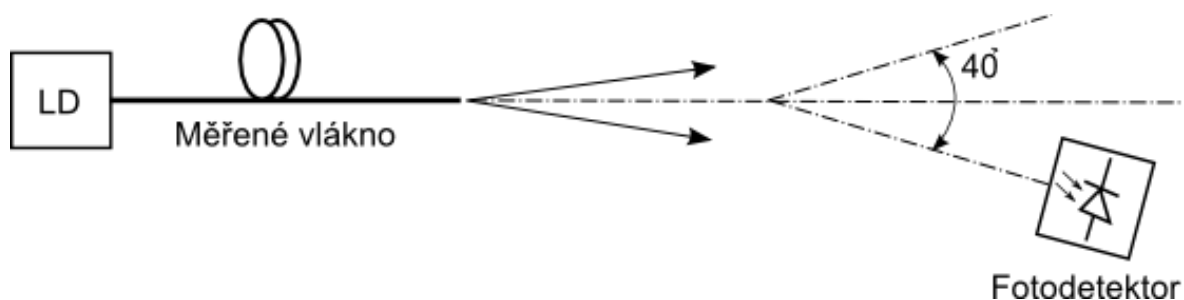
Jedná se o způsob, kdy je na vstupu vlákna zapojen zdroj záření, většinou LD či LED, který slouží k navázání záření o požadované vlnové délce λ do měřeného optického vlákna. Konec vlákna musí být zbaven sekundární ochrany a patřičně upevněn, aby se co nejvíce zamezilo otřesům. Na výstupu vlákna je v blízkém poli umístěn objektiv, který slouží ke zvětšení samotné stopy pole. Vzdálenost objektivu od konce vlákna se pohybuje zhruba kolem hodnoty $1 \mu\text{m}$. Je tedy zapotřebí velkého citu a přesnosti při nastavování konce vlákna před objektiv a zároveň tak vyžaduje použití velmi přesných zařízení pro nastavení této polohy. Vyzářená stopa pole na výstupu vlákna je následně přijata například malým plošným detektorem (Obr. 22) [21].

V praktické části této práce, kde se měří MFD s využitím metody NF je jako detektor použita infračervená kamera, která snímá celou stopu pole. U objektivu hraje důležitou roli kvalita jednotlivých optických komponent uvnitř a také jeho numerická apertura NA , která by měla být co nejvyšší.

Přesnost polohy vlákna je tak hlavní nevýhodou této metody, pomocí které není možné přesněji měřit velmi nízké MFD. Dalším problémem může být velikost přiblížení samotným objektivem a také omezená plocha detektoru. Pokud jsou všechny tyto faktory vzaty v úvahu, lze tvrdit, že MFD u klasických optických vláken lze touto metodou stanovit s maximální chybou $\pm 0,2 \mu\text{m}$ [21]. Pro měření optických vláken s MFD kolem $10 \mu\text{m}$ tedy postačuje.

4.2 Metoda Far-Field

Metoda měření ve vzdáleném poli je nejrozšířenějším způsobem získání intenzity výstupní stopy pole a následného získání MFD. Experimentální sestava je zčásti podobná té pro měření v blízké vzdálenosti (Obr. 23). Hlavním rozdílem je charakter detektoru, který je v tomto případě fotodioda umístěna na pohyblivém rotačním podstavci. Výstupem z detektoru je fotoproud, který je následně zesílen a vyhodnocen. Slouží ke změření úhlové závislosti profilu intenzity výstupní stopy pole [21]. Intenzita záření bude nejvyšší při nastavení úhlu 0° . Při postupném pohybu detektoru směrem od středu vlákna bude intenzita logicky klesat směrem k nižším hodnotám. Celkově se tedy opět dosáhne Gaussovského tvaru profilu intenzity. Aby byla stopa pole vhodně proměřena, musí být dostatečně široký rozsah úhlu otáčení detektoru, a to nejméně $\pm 20^\circ$. V tomto případě stačí vzdálenost od konce vlákna rovna několika cm. Není tedy potřeba mikrometrové přesnosti jako u metody NF. Proto se také namísto LED zdroje používá zejména LD zdroj, který do vlákna naváže záření s vyšší intenzitou, aby byla možná detekce ve větší vzdálenosti. Z naměřeného rozložení intenzity stopy pole se pak pomocí vztahů z úvodu této kapitoly stanoví MFD. Přesnost této metody je vyšší než u metody NF. Přesným nastavením a měřením lze dosáhnout maximální chybu až $\pm 0,05 \mu\text{m}$ [21].



Obr. 23 Princip měření ve vzdáleném poli FF [21]

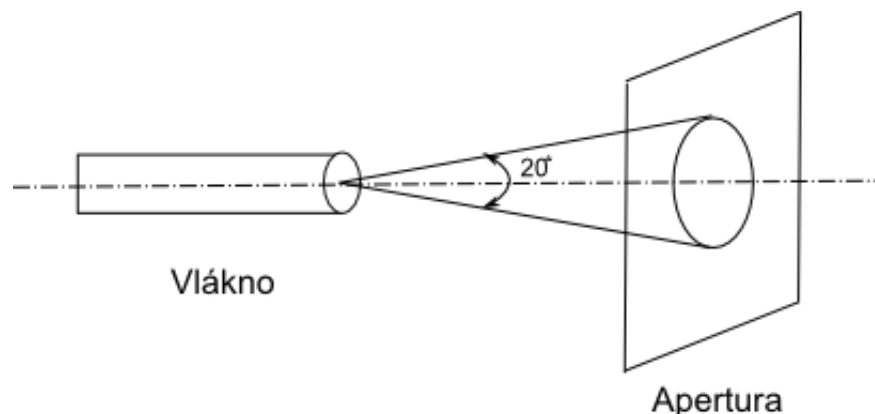
4.3 Nepřímé metody měření MFD

Jak už bylo zmíněno na začátku kapitoly, existují i nepřímé metody měření MFD, u kterých není detekována samotná stopa pole na výstupu vlákna. Tou nejpoužívanější je metoda offsetu dvou vláken TO (Transverse Offset), kde je měřen výstupní výkon mezi dvěma stejnými vlákny, jejichž konce jsou mírně odchýlené v příčném směru (Obr. 24). Velikost odchýlení je ovládána mikroposuvem. MFD je pak vypočten na základě účinnosti navázání. Jako zdroj záření se v tomto případě většinou používá halogenová lampa s monochromátorem nebo standardní LED zdroj. Pomocí této metody nelze přesně měřit rotačně nesymetrická vlákna. MFD lze stanovit s přesností $\pm 0,3 \mu\text{m}$, tedy podobně jako u metody NF [21].



Obr. 24 Metoda TO [21]

Další nepřímou metodou je metoda variabilní apertury. Spočívá v měření optického výkonu SM vlákna, jehož výstupní svazek prochází přes aperturu ve tvaru kruhu, která má nastavitelný průměr. Tato apertura je umístěna ve vzdáleném poli podobně jako u metody FF. Důležitá je osová souměrnost konce vlákna a středu apertury (Obr. 25). Oproti metodě TO je možné dobře měřit i nesymetrická vlákna [21].



Obr. 25 Metoda variabilní apertury [21]

5 Praktická část

Praktická část této práce se zabývá vytvořením pracoviště pro navazování a detekci optických paprsků do optických vláken. Jeho ověření je pak dáno propojením teoretických poznatky o mikrostrukturních vláknech s jejich simulacemi v programu BeamPROPTM a praktických měření. Hlavním cílem bylo vytvořit měřicí sestavu, pomocí které by bylo možné detekovat stopu pole optických vláken (standardních i mikrostrukturních). Pro detekci stopy pole byla vybrána metoda měření v blízkém poli NF (Near-Field), jednak z hlediska dostupnosti měřicích přístrojů, ale také kvůli relativně jednoduchému uspořádání jednotlivých prvků. Vhodnost této metody byla také díky možnému zobrazení skutečné stopy pole na výstupu vlákna, oproti metodě far field, u které se měří intenzita záření ve vzdálené zóně, avšak nedochází k přímému zobrazení stopy pole [21].

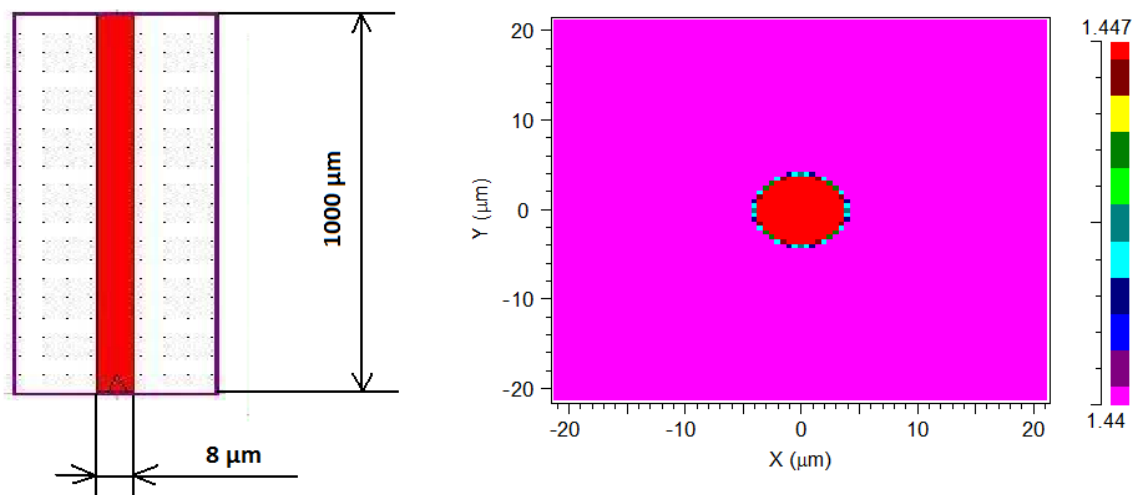
Zpočátku bylo zapotřebí provést teoretický rozbor mikrostrukturních vláken k porozumění jednotlivých principů šíření světla v těchto novějších typech vláken. Následně byly vybrány vhodné typy vláken k praktické analýze. Jako klasické optické vlákno bylo zvoleno standardní jednovidové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu. Jako nejvíce vyhovující mikrostrukturní vlákno bylo vybráno nekonečně jednovidové PCF vlákno ESM-12B, které je typu Solid-Core, tedy s plným jádrem. Hlavní důvod výběru byla snadnější možnost simulací, jelikož program BeamPROPTM používá k výpočtům a následnému modelování metody založené na odrazech světla na rozhraních prostředí [11]. Simulace je tak podstatně jednodušší pro Solid-Core vlákno, ve kterém se světlo šíří na principu modifikovaného totálního odrazu na rozhraní prostředí s různou velikostí indexu lomu. U Hollow-core vláken je však světlo vázáno k jádru na principu zakázaného pásma PBG, kdy je možné šíření světla díky defektu v periodicitě struktury (vzduchovému otvoru uprostřed) a světlo se tak šíří pouze na izolované vlnové délce uprostřed zakázaného pásma (podrobněji popsáno v kapitolách 2.2 a 3.3). Díky těmto jevům tak nelze tento typ vláken simulovat v BeamPROPTM, jelikož při simulacích nepočítá s principy PBG. V simulacích se tedy používalo hlavně Solid-Core vlákno a pak klasické SM vlákno. Na simulace pak navazuje sestavení měřicího pracoviště k praktickému měření stopy pole výstupního záření těchto simulovaných typů vláken. Postup jejího sestavení, kalibrace a samotného měření je popsán v dílčí kapitole 5.2. Dále byl vypracován skript v programu Matlab, pomocí kterého byl z naměřených dat a obrazů stopy pole v závěru stanoven parametr MFD a jeho závislost na vstupní vlnové délce a výkonové úrovni (kapitola 5.3).

5.1 Simulace optických vláken v BeamPROP™

Veškeré simulace v této části jsou prováděny v programu BeamPROP™ od společnosti Synopsys® [11]. Tento program využívá numerické metody BPM (Beam Propagation Method) pro simulaci dynamického šíření světelného záření libovolnou 2D či 3D strukturou a prostředím jako jsou optická vlákna, vlnovody nebo jiné optické obvody [11]. Simulace slouží zejména k ověření metod šíření světla v optických vláknech a k vytvoření představy o možných výstupech z měření daného vlákna.

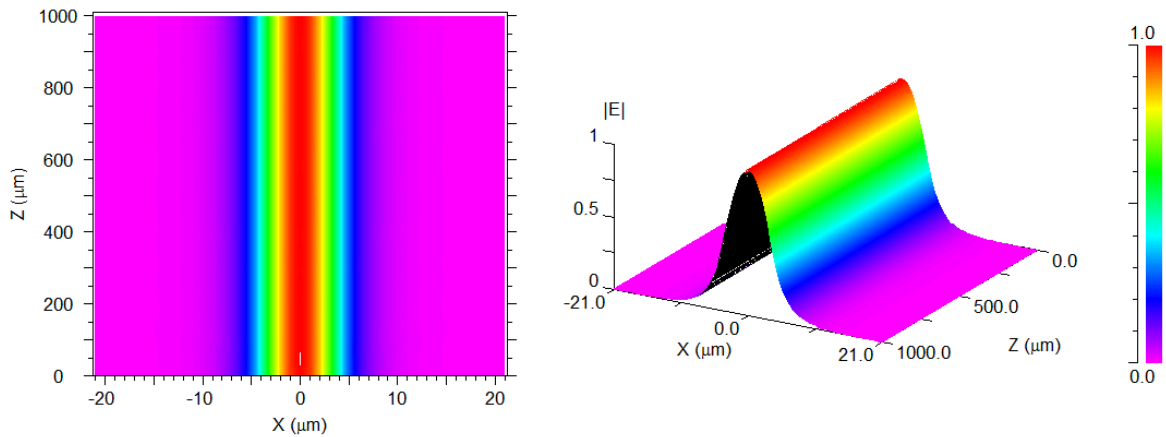
5.1.1 Simulace klasického SM optického vlákna

Jako první byl simulován úsek standardního step-indexového optického vlákna, kde je skokový rozdíl mezi indexem lomu jádra a pláště. Nejprve bylo zapotřebí vytvořit strukturu, která odpovídá geometrickým i materiálovým rozměrům reálného optického vlákna. Index lomu jádra n_1 byl zvolen 1,44, což je standardní index lomu křemene [2]. Index pláště n_2 byl nastaven s odstupem 0,007 od n_1 a odpovídá hodnotě 1,433. Průměr jádra byl zvolen 8 μm . Délka vlákna je 1000 μm . Tento rozměr postačí pro demonstraci šíření světla ve vlákne v jednovidovém i vícevidovém režimu. Dalším důležitým parametrem je GridSize, který byl nastaven na 0,3 μm , a určuje nám rozlišení simulace. Tento rozměr by vždy měl být nižší než vlnová délka λ vstupního záření. Průměr pláště je v našem případě zanedbatelný, jelikož je světlo vedeno pouze v jádře. Znázornění geometrické struktury a rozložení indexu lomu je uvedeno na Obr. 26.



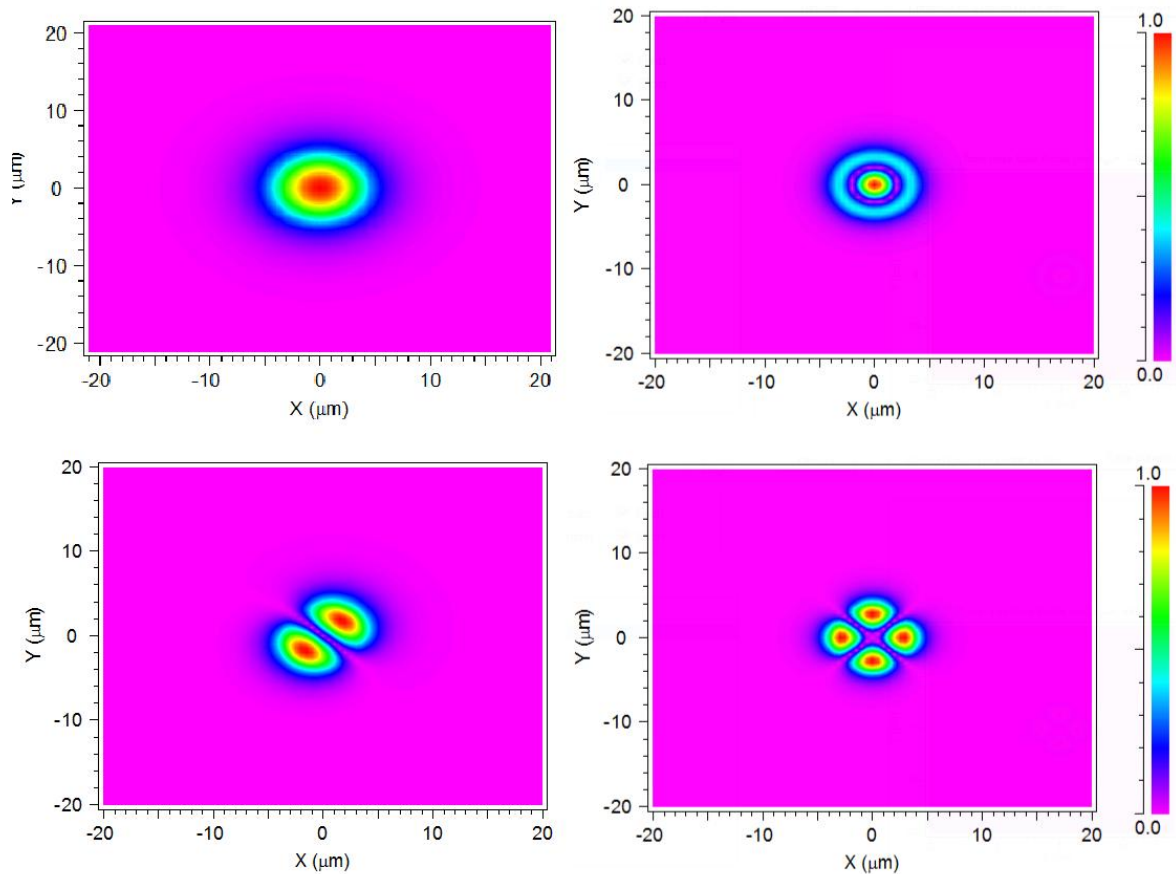
Obr. 26 Znázornění geometrie vlákna a rozložení indexu lomu

Standardní simulace byla provedena na vlnové délce 1550 nm na ukázkou šíření základního vidu optickým vláknem. Amplituda a rozložení energie se u tohoto vidu při šíření vláknem výrazně nemění u takto krátké vzdálenosti. Samozřejmě u reálného vlákna a na delších vzdálenostech se projeví útlum a disperze, které ovlivní výstupní svazek.



Obr. 27 Šíření základního vidu a rozložení jeho energie

Dále byla provedena simulace a rozbor dílčích vidů. Vidy v optickém vlákně se nazývají lineárně polarizované vidy (LP vidy). Jsou to takzvané hybridní vidy, jelikož jsou určitou kombinací TE a TM vidů a mají konečný počet [3] [6]. Jedná se o takzvané vedené vidy, pomocí kterých se energie šíří vláknem uvnitř jádra. Každý vid lze popsat vlastními parametry a může tedy být aproximován a rozložen do dvou lineárně polarizovaných složek. Rozložení pole je pak dáno lineární kombinací těchto složek. Šíření jednotlivých vidů závisí na způsobu navázání energie do jádra, tedy hlavně na vstupním úhlu θ a numerické apertuře NA a také vstupní vlnové délce λ . Rozložení energie do jednotlivých vidů se postupně mění s narůstající vzdáleností. Šíření vidů lze také ovlivnit ohyby vlákna do menšího poloměru než je určitá kritická hodnota R_{max} . Vidy pak již nejsou vedené a dochází k jejich vyvázání ven z jádra do pláště [34]. Nejnižší lineárně polarizovaný vid se nazývá LP_{01} a jeho profil intenzity nabývá tvaru Gaussovského svazku a je dále symetrický ve dvou osách. Další dílčí vidy vznikají podle podílu jedné ze dvou složek elektrického a pole, tedy lineární kombinací TE a TM vidů [35].

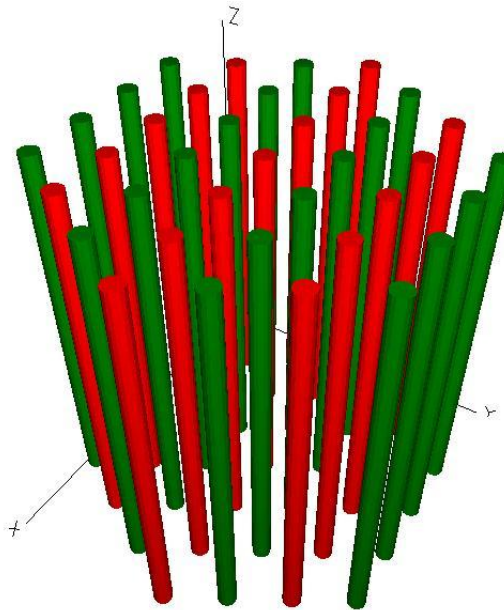


Obr. 28 Vidy LP_{01} , LP_{02} , LP_{11} a LP_{21}

Při nastavení vlnové délky vstupního záření na 1550 nm se vláknem šíří pouze nejnižší lineárně polarizovaný vid LP_{01} , u kterého je většina energie soustředěna uprostřed. Při postupném simulování tohoto vlákna se při snižování vlnové délky λ již začínají objevovat i vyšší LP vidy. Okolo vlnové délky 850 nm se začíná šířit vid LP_{11} , u kterého se změnilo rozložení energie do dvou oblastí, podobně tak i vid LP_{21} , který začíná být veden při nastavení vlnové délky 650 nm. Na Obr. 28 jsou jednotlivé nasimulované vidy zobrazeny.

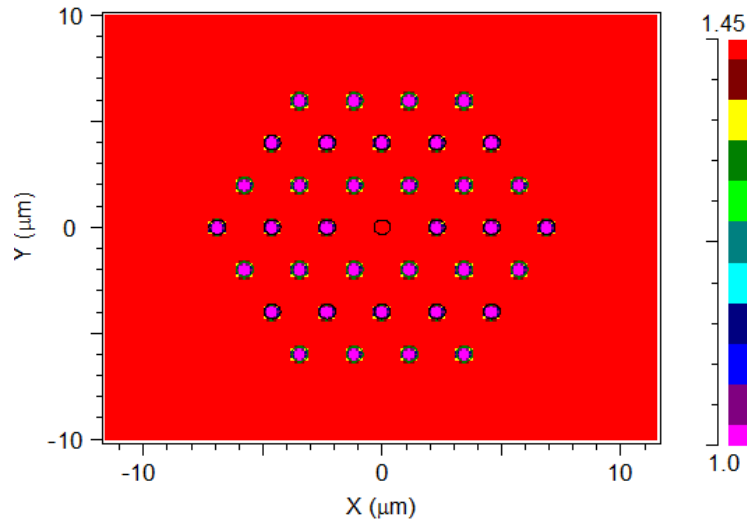
5.1.2 Simulace obecného Solid-Core PCF vlákna

Jako první byla simulována klasická struktura dvojdimenzionálního fotonického krystalu s hexagonálním rozložením vzduchových otvorů, která je periodická ve směru XY [3], přičemž se jedná o Solid-Core vlákno, tedy vlákno s plným jádrem. Sestavení struktury probíhalo tak, že byl zvolen okolní index lomu, který odpovídal indexu lomu křemene $n=1,44$ a následně vloženy vzduchové otvory s indexem lomu $n=1$ ve formě jakýchsi kapilár, které vedou celou délkou vlákna. Aby bylo možné vlákno simulovat jako Solid-Core, musel být navíc index lomu vnitřního otvoru nastaven na stejnou hodnotu jako okolní prostředí, tedy $n=1,44$. Náhled této struktury je na Obr. 29.



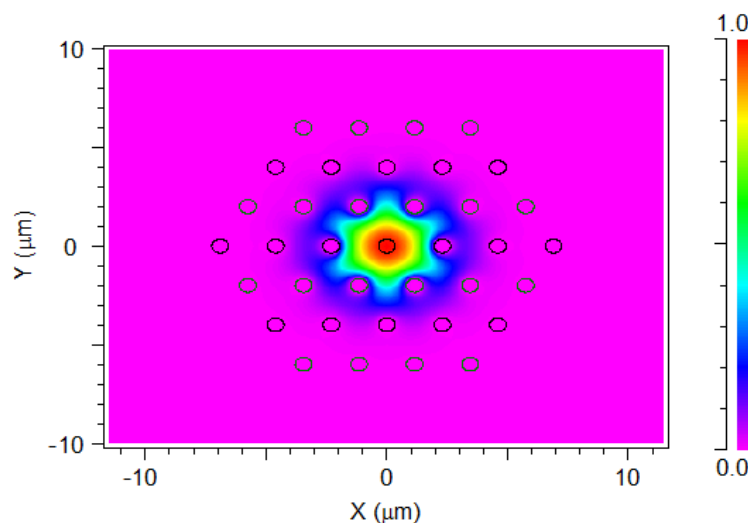
Obr. 29 Znárodnění simulované struktury

Byla zvolena standardní hexagonální struktura s roztečí vzduchových otvorů $A=2,5 \mu\text{m}$ průměrem otvorů $d=0,3 \mu\text{m}$ a počtem vrstev vzduchových otvorů $N_r=3$. Délka struktury byla opět zvolena přibližně $1000 \mu\text{m}$, což podobně jako u simulace klasického SMF vlákna postačuje na dostatečné znázornění šíření energie uvnitř vlákna. Rozměry a rozložení indexů lomu jednotlivých částí jsou zobrazeny na Obr. 30. Simulace probíhala na standardní vlnové délce 1550 nm a následně postupně nastavována na nižší vlnové délky, přičemž se energie držela v jádře pouze do hodnoty zhruba $0,85 \mu\text{m}$. Pod tuto hodnotu na vyšších vlnových délkách docházelo k výraznému vyvazování energie ven z jádra. Tento problém byl vyřešen přidáním čtyř vrstev vzduchových otvorů do hexagonální struktury, konkrétně na celkem sedm vrstev. Snížil se tím efektivní index lomu pláště vůči jádru. Bylo možné pak navázat záření v širším spektru vlnových délek, aniž by docházelo k vyvazování výrazné části energie do pláště.

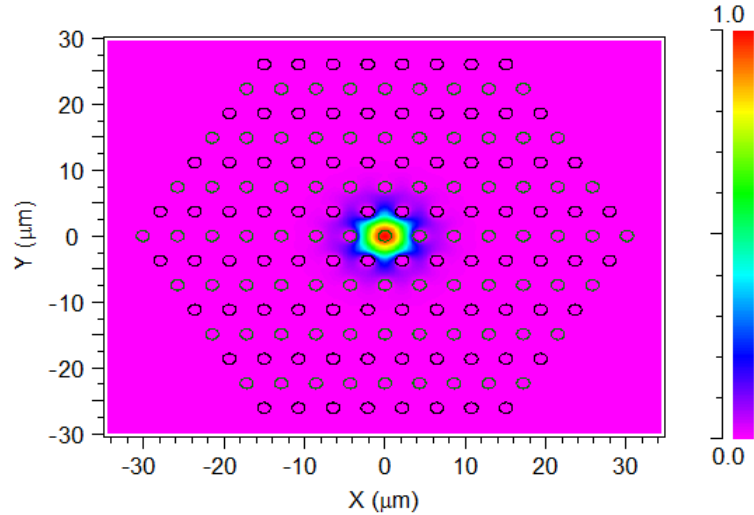


Obr. 30 Rozložení indexu lomu a rozměry simulované hexagonální struktury

Výsledný graf rozložení vidového pole je znázorněn na obr. 31. Je patrné, že značná část energie je vázána k jádru, avšak určité množství přece jenom uniká do pláště mezi jednotlivé otvory. Oproti tomu na Obr. 32, kde byly do struktury přidány další vrstvy, je energie téměř dokonale uvězněna v prostoru jádra. Pokud bychom přidávali další vrstvy vzduchových otvorů, byl by výsledek samozřejmě lepší. Přidáváním vrstev se ale také zvětšuje celkový průměr vlákna a nebylo tedy vhodné překročit určitou mez. V praxi se běžně používá počtu vrstev 7,9 či 12 [1]. U nelineárních PCF vláken či jiných speciálních PCF vláken je tento počet trochu odlišný a závisí spíše na konkrétních požadavcích na vlastnosti a aplikace daného vlákna. Na rozložení energie v menší míře vliv také průměr samotných otvorů. Při změně jejich velikosti se opět mění poměr efektivního indexu lomu pláště. Čím jsou otvory menší, tím je opět umožněno snadnějšímu prosakování energie do pláště.



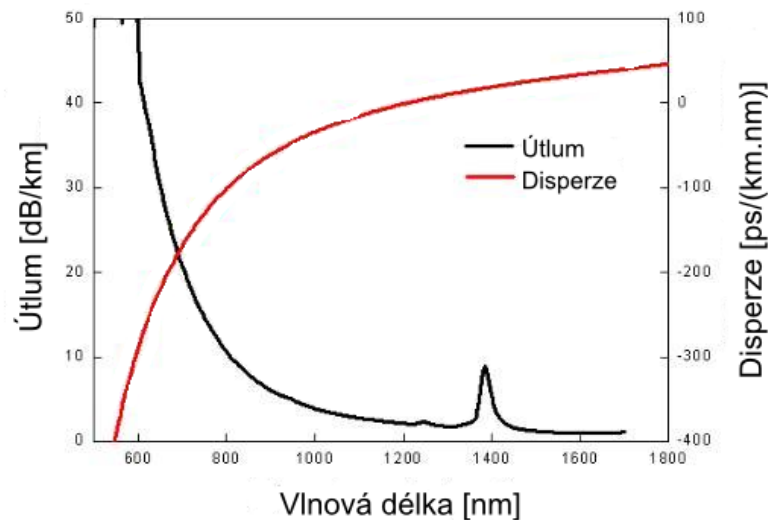
Obr. 31 Rozložení vidového pole pro obecnou třívrstvou hexa-strukturu



Obr. 32 Rozložení vidového pole pro obecnou sedmivrstvou hexa-strukturu

5.1.3 Simulace reálného Solid-Core vlákna ESM-12B

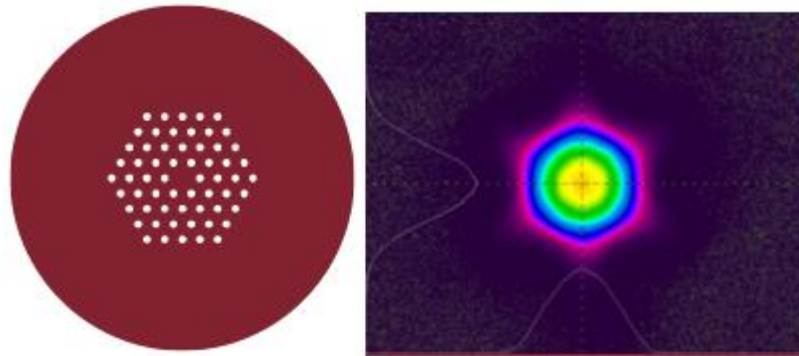
Hlavním vláknem, které bylo použito pro navazování a detekci optických paprsků v další kapitole praktické části je neustále jednovidové mikrostrukturní vlákno ESM-12B od společnosti NKT Photonics [13]. Vyznačuje se hlavně tím, že pracuje v jednovidovém režimu napříč širokým spektrem vlnových délek. Na rozsahu λ od 700 nm do 1700 nm vykazuje relativně nízký útlum (Obr. 33). Oproti klasickému jednovidovému optickému vláknu má navíc výhodu většího jádra [13].



Obr. 33 Katalogové údaje útlumu a disperze pro vlákno ESM-12B [13]

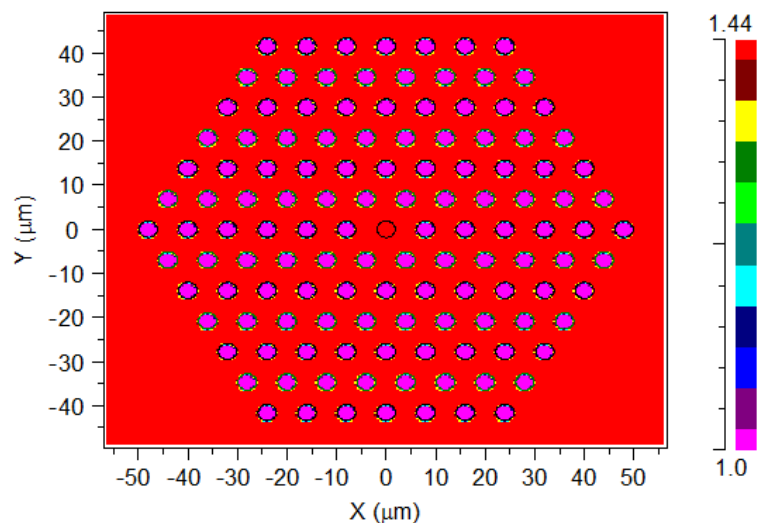
Struktura tohoto vlákna je velmi podobná těm, které byly simulovány v předchozí části. Znovu se jedná o hexagonální uspořádání vzduchových otvorů, tentokrát se šesti vrstvami.

Díky společnosti NKT Photonics byly poskytnuty i geometrické parametry samotné mikrostruktury, které jsou nedílnou součástí při nastavování simulace. Rozteč otvorů $A=8 \mu\text{m}$ a průměr otvorů je v rozmezí $3,5 \mu\text{m}$ až $4 \mu\text{m}$. Výchozí hodnota byla tedy zvolena $3,7 \mu\text{m}$. Průměr jádra $d=12,3 \mu\text{m}$ a vnější průměr pláště je $125 \mu\text{m}$. Hlavním úkolem bylo porovnat rozložení vidového pole tohoto vlákna s katalogovými údaji. Znázornění předpokládaného rozložení vidového pole z katalogu NKT Photonics pro vlákna ESM-12B je na Obr. 34.

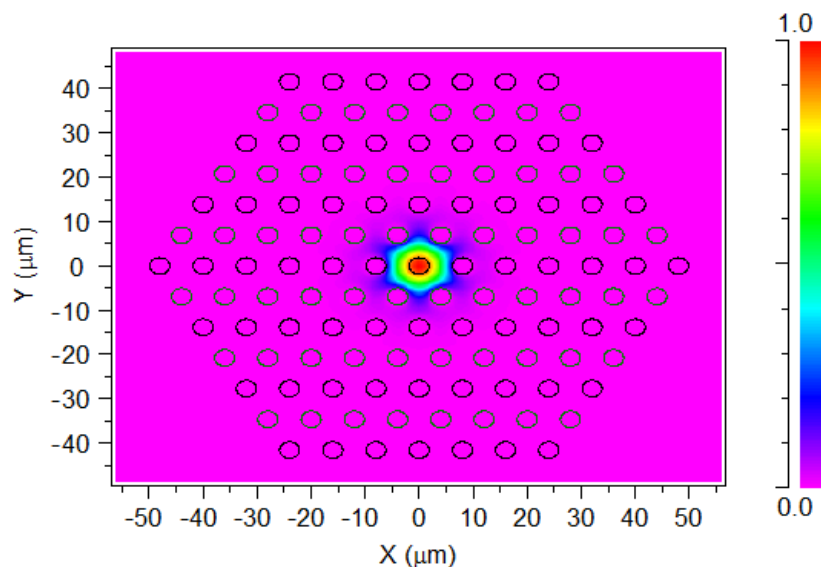


Obr. 34 Katalogové znázornění struktury a rozložení vidového pole pro ESM-12B [13]

Z výsledného rozložení vidového pole na Obr. 35 vidíme, že dochází jen k nepatrnému úniku energie ven z vlákna.

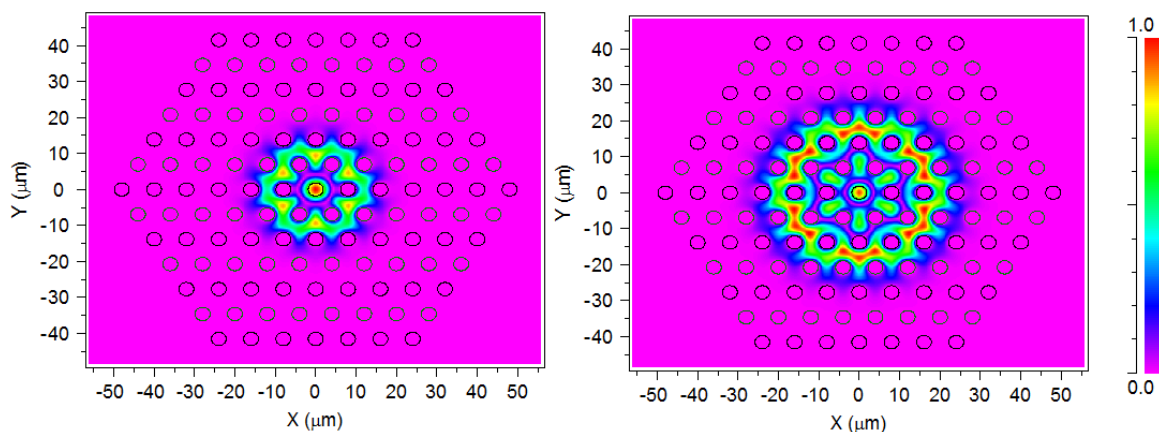


Obr. 35 Struktura a rozložení indexu lomu vlákna ESM-12B

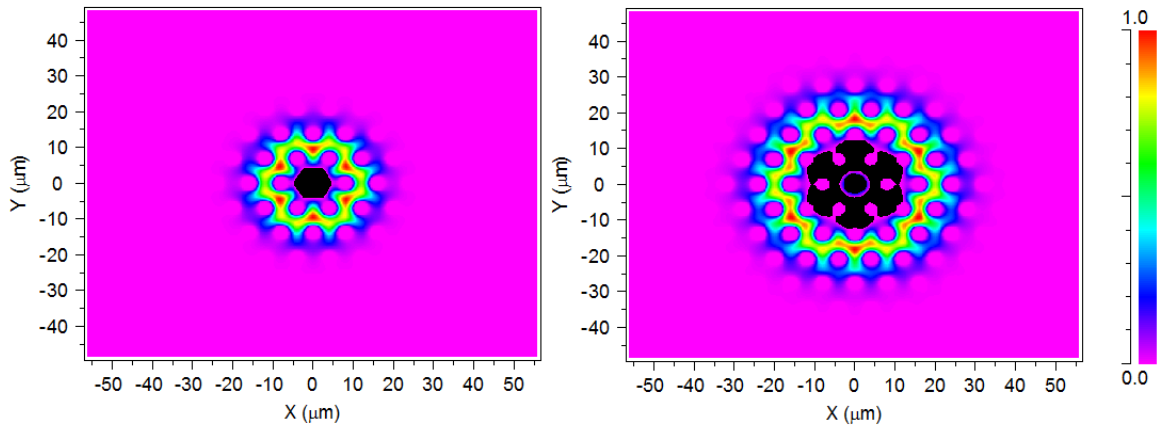


Obr. 36 Rozložení vidového pole u vlákna ESM-12B

V dalším postupu simulace vlákna ESM-12B byly také ověřeny hraniční vlnové délky, na kterých by podle katalogu mělo vlákno pracovat v jednovidovém režimu, tzn., měl by se jím šířit pouze základní vid. Postupně byly nastavovány různé vlnové délky a během simulace pozorováno jakým způsobem se energie šíří uvnitř vlákna. Rozsah těchto vlnových délek byl od zhruba 500 nm až po 2000 nm. Na vlnové délce 500 nm nepracuje vlákno v jednovidovém režimu, jelikož vede až 5 vidů. Ukázka některých vyšších vidů je na Obr. 37. Tyto vidy vypadají trochu odlišně od základních LP vidů šířících se ve standardním optickém vlákně a mají atypický tvar, který se přizpůsobuje prvkům mikrostruktury. Vid je považován za vedený, pokud je větší část jeho energie vázána k jádru. Pokud se však ve výsledku simulace objeví uprostřed struktury prázdná oblast, není pak vid považován za vedený, jelikož je značně rozptýlen do oblasti pláště mezi jednotlivé vzduchové otvory (Obr. 38).



Obr. 37 Vyšší vedené vidy ve vlákně ESM-12B



Obr. 38 Nevedené vidy u vlákna ESM-12B

Při zvyšování λ postupně ubývají vyšší vidy. V Tab. 1 je znázorněno, jaké konkrétní vidy jsou považovány za vedené při daném nastavení λ . Dále lze určit hraniční λ pro jednotlivé vidy. Hlavním výsledkem je však ověření, zdali je vlákno jednovidové od hraniční $\lambda = 700$ nm. Z tabulky je zřejmé, že tomu tak opravdu je, jelikož na $\lambda = 690$ nm stále vede vlákno dva vidy, ale při $\lambda = 700$ nm je již veden pouze základní vid. Katalogová dolní hraniční hodnota 700 nm by tedy měla být správná. Horní hraniční hodnota 1700 nm není z hlediska přesnosti až tak důležitá. Vlákno je na těchto vyšších λ stále jednovidové. Hlavní podíl na tom má vliv absorpce v infračervené oblasti, která se začíná u optických vláken projevovat od 1600 nm výš [2].

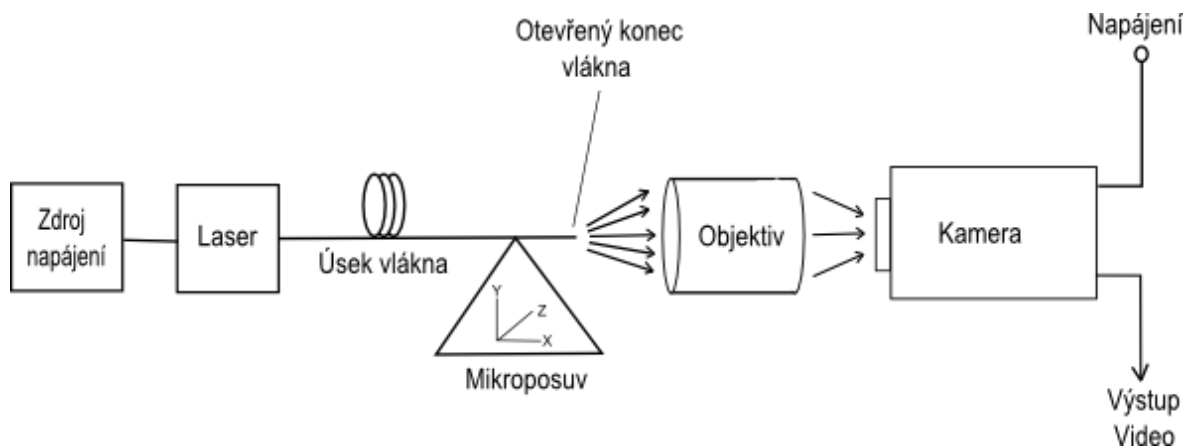
č. modu	λ [μm]										
	0,5	0,6	0,63	0,65	0,69	0,7	0,8	0,9	1	1,7	2
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-
3	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
4	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

x mod je veden
- mod není veden

Tab. 1 Výskyt dílčích módů na jednotlivých λ

5.2 Detekce záření z optického vlákna

Hlavním cílem celé práce bylo sestavit a ověřit měřicí pracoviště pro analýzu mikrostrukturních vláken, konkrétně tedy navazováním a detekcí optických svazků v těchto vláknech. Slouží k měření jak běžných typů optických vláken, tak i speciálních mikrostrukturních vláken. Pracuje na základě metody měření v blízkém poli NF (Near-Field), která je detailněji popsána v kapitole 4. Rozložení stopy pole na výstupu je detekováno v bezprostřední blízkosti konce vlákna, řádově v jednotkách μm . Bylo tedy realizováno pracoviště pro detekci stopy pole přímo na výstupu optického vlákna. Na Obr. 39 je uvedeno principiální schéma této sestavy.



Obr. 39 Blokové schéma měřicí sestavy

Jako zdroj záření byl zvolen standardní laditelný LD zdroj ID Photonics CoBrite DX4, který byl již k dispozici ve vybavení laboratoře. Jelikož metoda měření v blízkém poli NF vyžaduje velmi přesné nastavení výstupní apertury (konce vlákna), musel být navržen systém pro upevnění konce vlákna, který by byl současně laditelný. K tomuto účelu byl pořízen mikroposuvný stolek Thorlabs NanomaxTM 3-axis [30]. Tato mikroposuvná soustava obsahuje další upevňovací prvky, které slouží k zafixování vlákna do jednotné osy s ostatními prvky soustavy. Stolek obsahuje pevnou a pohyblivou část. Na pevné části je umístěna obruba se závitem, který slouží k upevnění objektivu. Na pohyblivé části jsou umístěny upevňovací prvky spolu s vláknem. Pohyblivou část je možné ladit ve třech osách. Ladění lze provádět ručně pomocí tří otočných částí. Ručně lze posuv ladit přibližně s přesností na jednotky μm . Ladit lze také elektronicky na principu piezoposuvu. Přivedením řídicího napětí na tři vstupy lze doladit posuv jednotlivých os až v řádech desítek nm [30]. Mikroposuvná sestava je zobrazena na Obr. 40.



Obr. 40 Mikroposuvný stolek Thorlabs Nanomax™ 3-axis [30]

K mikroposuvnému stolku byl dále pořízen objektiv vhodný jednak pro upevnění do patřičné obruby na mikroposuvném stolku, a také pro splnění přesnosti při měření v blízkém poli NF. Vybrán byl objektiv Olympus RMS 100X-O, který dosáhne až stonásobného přiblížení [31]. Objektiv je imerzního typu, což znamená, že musí být na první čočce (sklíčku) opatřen speciální imerzní tekutinou, která má index lomu větší než 1 (v našem případě imerzní olej). Zvětší se tím NA objektivu pro snadnější navázání paprsku do objektivu a zároveň zmírňuje rozptyl tohoto paprsku do okolí [31].

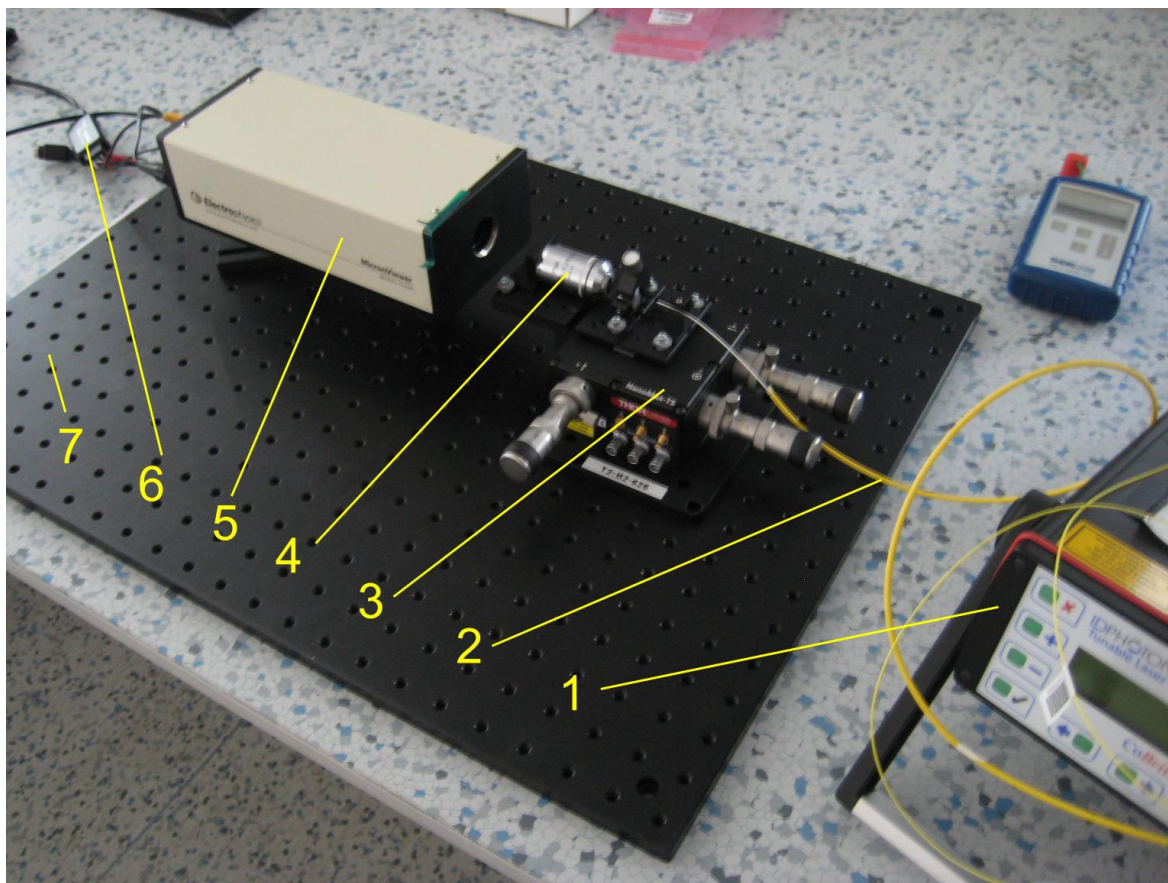
Velmi důležitým úkolem bylo vybrat vhodné zařízení k detekci výstupní stopy pole. Jelikož bylo požadováno, aby byl snímán skutečný obraz stopy pole (nikoliv pouze rozložení intenzity), bylo zapotřebí vybrat zařízení, které měří i neviditelnou část světelného spektra a je možné jej připojit k PC. Pořízena byla infračervená kamera MicronViewer 7290A, která má vysoké rozlišení a snímá záření v rozsahu 400 nm až 1900 nm. Má přitom výbornou odezvu na 1500 nm [32]. Kamera je napájena ze sítě a je možné ji připojit k PC. Pro připojení k PC je však nutné zařadit na výstup kamery A/D převodní kartu, která snímá analogový obraz převádí na digitální pro zobrazení na PC. Pořízena tak byla i A/D karta AverMedia DVD Ezmaker 7, která se připojí k USB portu PC.

Veškeré pořízené komponenty sestavy (kromě zdroje záření) byly upevněny na optické měřicí desce od společnosti Thorlabs o rozměrech 600 mm x 900 mm x 12.7 mm. Povrch desky je matně černý a navíc podrobený eloxaci (chemicko-tepelná úprava povrchu zabraňující oxidaci) [33]. Tyto vlastnosti zabraňují různým odleskům a rozptylům, které by mohly ovlivnit samotné měření.

Popis zapojení

Pomocí LD zdroje bylo do vlákna navázáno záření s požadovanou λ . Pro měření klasického vlákna bylo využito jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu. Na vstupu bylo opatřeno konektorem FC. Výstup vlákna byl zbaven sekundární ochrany a dále zalomen a patřičně očištěn. Konektor byl též očištěn pomocí čistící kazety. Čištění spojů u jednotlivých vláken bylo standardní procedurou před každým měřením. Konec měřeného vlákna byl upevněn na mikroposuvném stolku. Mezi koncem vlákna a samotnou detekční kamerou byl v blízkém poli zařazen imerzní objektiv upevněný v obrubě na pevné části stolku. Konec vlákna byl nastaven do ohniskové vzdálenosti objektivu pro co nejpřesnější navázání paprsku do objektivu. Jednotlivé vzdálenosti a polohy vlákna a infrakamery vůči objektivu bylo při každém měření nutné jemně přednastavit. Za objektivem byla ve vzdálenosti zhruba 5 cm umístěna infračervená kamera napájená ze sítě. Ta snímá stopu pole výstupního záření. Tento obraz je následně zobrazen na monitoru PC, ke kterému je kamera připojena přes A/D převodní kartu (video výstup). Při měření byl v PC vytvořen snímací proces (video) v programu MovieMakerTM, ze kterého byly pak pořízeny jednotlivé snímky určené k dalšímu zpracování.

Při prvotní kalibraci byl jako zdroj záření využíván modul s laserovou diodou Hitachi HL8325C na vlnové délce 980 nm. Na této nižší vlnové délce bylo předpokládáno, že budou snadněji detekovatelné vyšší vidy ve vláknech. Při dalších měřeních se už pak využíval laditelný laserový zdroj, pomocí kterého bylo možné měřit na různých výkonech a vlnových délkách a prověřovat tak závislost stopy pole a MFD vlákna právě na těchto laditelných parametrech. Zapojení je také méně citlivé na různé otřesy a vhodnější na samotné měření oproti tomu s modulem LD, který v podstatě není nijak upevněn a sloužil tedy spíše k prvotní kalibraci měřicího pracoviště. Na fotce (Obr. 41) je uvedeno standardní zapojení této sestavy s laditelným laserovým zdrojem a veškerými komponenty na měřicí desce.



Obr. 41 Foto sestavy

Seznam použitých přístrojů a komponent:

1 - Laditelný laserový zdroj - ID Photonics CoBrite DX4

2 - Měřené vlákno: a) 1 m úsek standardního SM vlákna 1550 nm

b) 10 m [sek PCF vlákna ESM-12B

3 - Mikroposuvný stolek - Thorlabs Nanomax 3-axis

4 - Objektiv – imerzní 100x zoom/1,25 oil

5 - Infrakamera – MicronViewer 7290A

6 - A/D Video karta – AverMedia DVD Ezmaker 7 USB

7 - Deska - Thorlabs Solid Aluminium Breadboard

Kalibrační LD zdroj SM LD s diodou Hitachi HL8325C na 980 nm

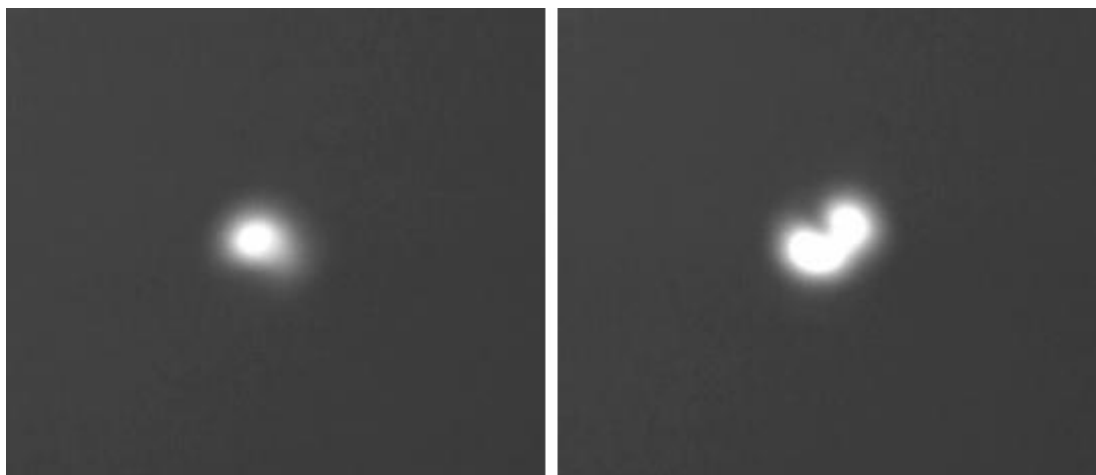
Zdroj napájení kalibračního LD zdroje - Statron laboratorní zdroj, 0-30 V

5.2.1 Standardní SM optické vlákno

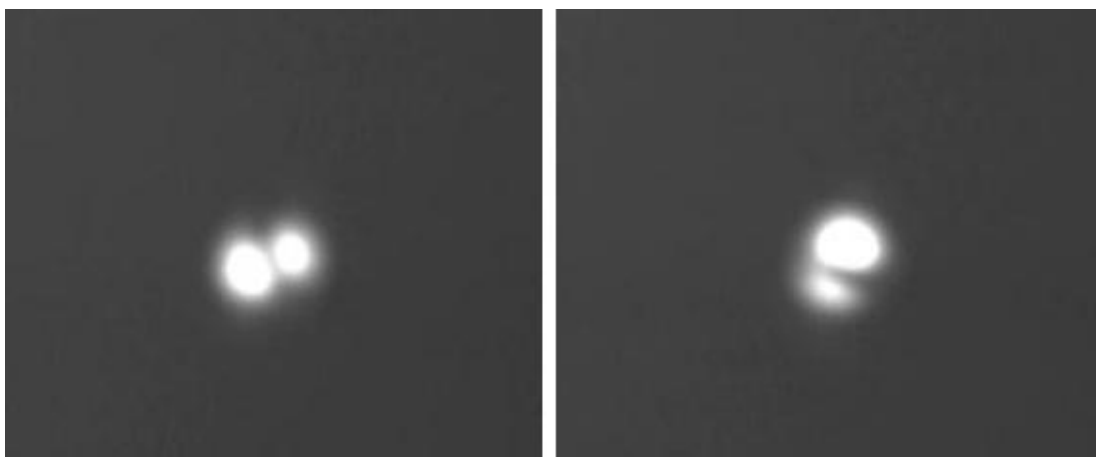
Popis měření

Laserová dioda Hitachi HL8325C dle přiloženého manuálu emituje záření při vstupním napětí 8-12 V. Na laboratorním zdroji bylo tedy nastaveno napětí 10 V. Jelikož je kamera zatížitelná pouze zářením s výkonem $1\text{mW}/\text{cm}^2$ [32], byl nejprve zařazen měřič výkonu na výstup vlákna pro zjištění konkrétní hodnoty výstupního výkonu a zdali nepřekračuje povolenou mez. Pokud nebyl u vlákna zařazen atenuátor, činil výstupní výkon $-5,11\text{ dBm}$, tedy v povolené mezi. Pro jistotu jsme však zařadili dva atenuátory a následný vstupní výkon tak činil $-9,65\text{ dBm}$.

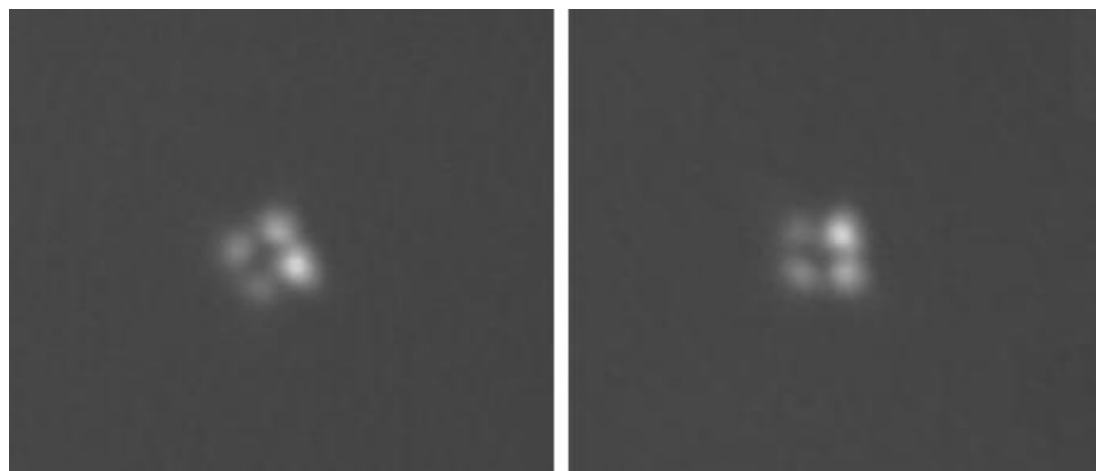
Po zapojení všech přístrojů a nastavení výstupu z kamery na obrazovku PC bylo zapotřebí najít stopu pole samotného vlákna snímané kamerou. Musel tedy být nastaven mikroposuvný stolek upevňující vlákno do správné polohy vůči objektivu, na který se nanasla malá vrstva imerzního oleje. Nastavení konce vlákna muselo být co nejbližší k objektivu, aniž by se ale objektivu přímo dotýkalo nebo by mohlo dojít k jeho poškození. Po nalezení stopy pole na obrazovce (velmi světlá oblast) muselo dojít k jejímu nacentrování co nejbližší středu obrazovky a s co nejlepším rozlišením. Tento postup doladování byl extrémně citlivý na nastavení mikroposuvného stolku a také vzdálenosti a úhlu snímání infrakamery od výstupu objektivu. Správného rozlišení a velikosti stopy pole bylo dosaženo při vzdálenosti kamery zhruba 5 cm od objektivu. Při správném nastavení a zobrazení stopy pole bylo pak zapotřebí se pokusit identifikovat jednotlivé vyšší vidy vlákna, které reprezentují určitá rozložení amplitud elektrického pole. Tyto vidy, blíže popsané v kapitole 5.1.1, závisí na kombinaci optické frekvence, osy vstupního záření a pozice zaostření. Změnou například osy vstupního záření (mírným ohybem měřeného vlákna) se tvar jednotlivých vidů na obrazovce měnil. Podařilo se tedy identifikovat některé vidy v SMF vlákně. Pokud nebylo s vláknem nijak manipulováno, byl na obrazovce celkem dobře rozpoznatelný základní lineárně polarizovaný vid LP_{01} (Obr. 42). Při ohybu vlákna však docházelo k vyvazování energie do pláště a při správném ohybu vlákna se podařilo identifikovat i vyšší vidy LP_{11} a LP_{21} . Každý LP vid má dva směry polarizace, které se na jeho tvaru projeví natočením. Na Obr. 43 je tedy vidět vid LP_{11} v obou směrech polarizace a na Obr. 44 velmi znatelný tvar vidu LP_{21} . Tyto obrazy byly následně uloženy pro pozdější zpracování. Nejdůležitějším byl obraz vidu LP_{01} , ze kterého je v kapitole 5.3 stanoven, Mode Field Diameter MFD.



Obr. 42 Vid LP_{01} a přelévání jeho energie při ohybu vlákna



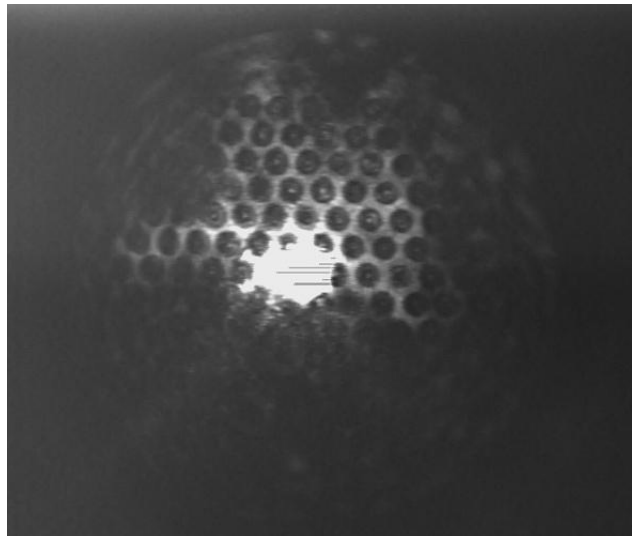
Obr. 43 Vid LP_{11} pro oba směry polarizace



Obr. 44 Vid LP_{21}

5.2.2 Mikrostrukturní vlákno ESM-12B

Jedním z hlavních cílů celé práce bylo změřit stopu pole na výstupu mikrostrukturního vlákna. Bylo vybráno neustále jednovidové vlákno ESM-12B s hexagonální strukturou, které bylo nejprve analyzováno v programu BeamPROP. Měření na tomto vlákne probíhalo obdobným způsobem jako u klasického vlákna v předchozí kapitole. Měřen byl tentokrát 10 m dlouhý úsek tohoto vlákna, který byl navinut na válcí. Vstup byl opatřen FC konektorem pro snadnější připojení k laserovému zdroji. Opačný konec byl opět zbaven sekundární ochrany, očištěn a upevněn na mikroposuvném stolku. Po zapojení a zapnutí všech přístrojů byl nastaven vstupní výkon svazku na $P = -40,2$ dBm, který byl opět přeměřen měřičem výkonu, a frekvence zdroje nastavena na 191,5 THz odpovídající vlnové délce 1564,5 nm. Po dostatečném seřízení vzdálenosti infrakamery a vzdálenosti konce vlákna od objektivu byla znovu nalezena stopa pole měřeného vlákna. Při prvním zobrazení byla však stopa pole příliš přesvícená a nebylo tak možné dostatečně identifikovat vedený vid. Tato přesvícená struktura je zobrazena na Obr. 45. Přesvícení obrazu nám však poskytuje zajímavý pohled na samotnou strukturu, jelikož se světlo dostává mezi jednotlivé otvory a je tak vidět celé její rozložení. Je možné se tedy přesvědčit, že struktura má skutečně šest vrstev.



Obr. 45 Přesvícená struktura mikrostrukturního vlákna ESM-12B

Snížení vstupního výkonu (zařazením atenuátoru 10 dBm) se problém s přesvícením částečně zmírnil. Dále bylo zapotřebí znovu měnit pozici a vzdálenost infrakamery od výstupu objektivu a zároveň jemného doladění pozice vlákna před objektivem pomocí mikroposuvu. Správně změřená stopa pole mikrostrukturního vlákna, která je vhodná pro analýzu jejího MFD je zobrazena na Obr. 46.



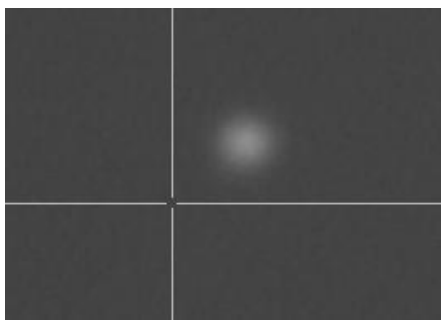
Obr. 46 Správně změřená stopa pole mikrostrukturního vlákna ESM-12B

5.3 Stanovení parametru MFD

Dále byl v rámci diplomové práce vytvořen skript na výpočet MFD ze snímků infrakamery. Základní princip tohoto získání spočívá rozložení stopy pole jako přechod různé velikosti intenzity, kdy tmavá barva má nejnižší intenzitu a bílá naopak nejvyšší. Nejvyšší intenzita by měla být ve středu stopy pole, kde je zároveň nejvyšší podíl vyzářené energie na výstupu vlákna. Obraz z infrakamery je dále zpracován v PC, kde je nejprve nutné získat samotný profil rozložení intenzity stopy pole a z něj poté určit MFD při poklesu o 3 dB vůči maximální hodnotě intenzity.

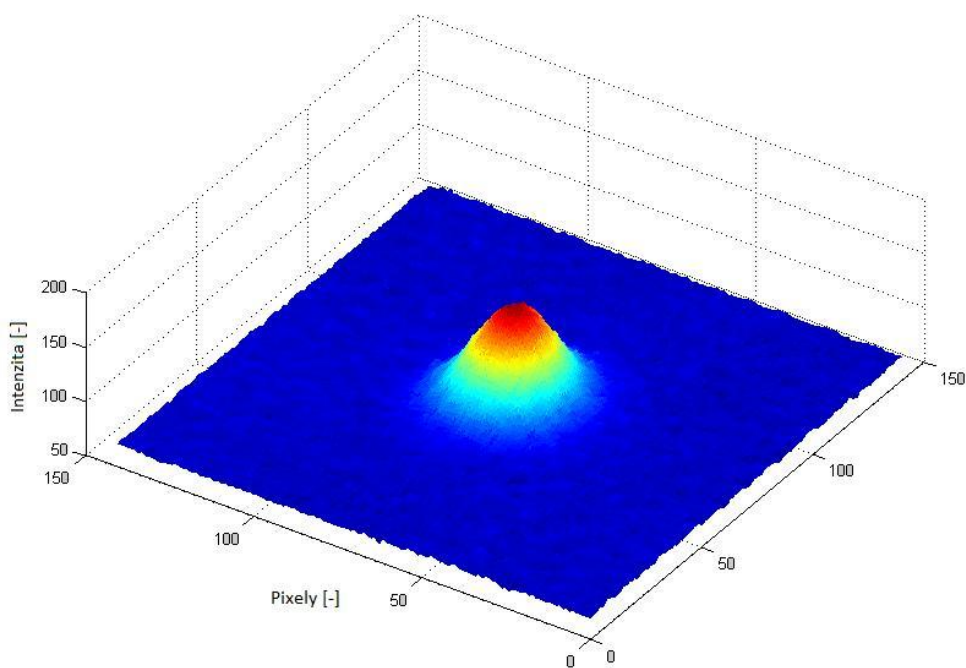
Získání profilu intenzity

Veškeré zpracování tohoto obrazu intenzity probíhalo v programu MatlabTM, který obsahuje množství funkcí pro práci s profily intenzity. MFD je dle teorie definován jako šířka tohoto profilu, který má tvar Gaussovského svazku, při poklesu maxima optické intenzity o $1/e^2$ ve výkonovém měřítku. Obraz detekovaný infrakamerou byl tedy uložen do PC a následně načten do programu pomocí funkce *imread*. Bylo zapotřebí mít stejné velikosti načítaných obrazů. Po načtení obrazu se zavolá funkce *ginput*, která načítá informace z obrazu na základě určení výchozího bodu uživatelem pomocí stisku levého tlačítka myši. Obraz je pak oříznut na jednotnou velikost kolem tohoto vybraného bodu (znázorněno na Obr. 47).

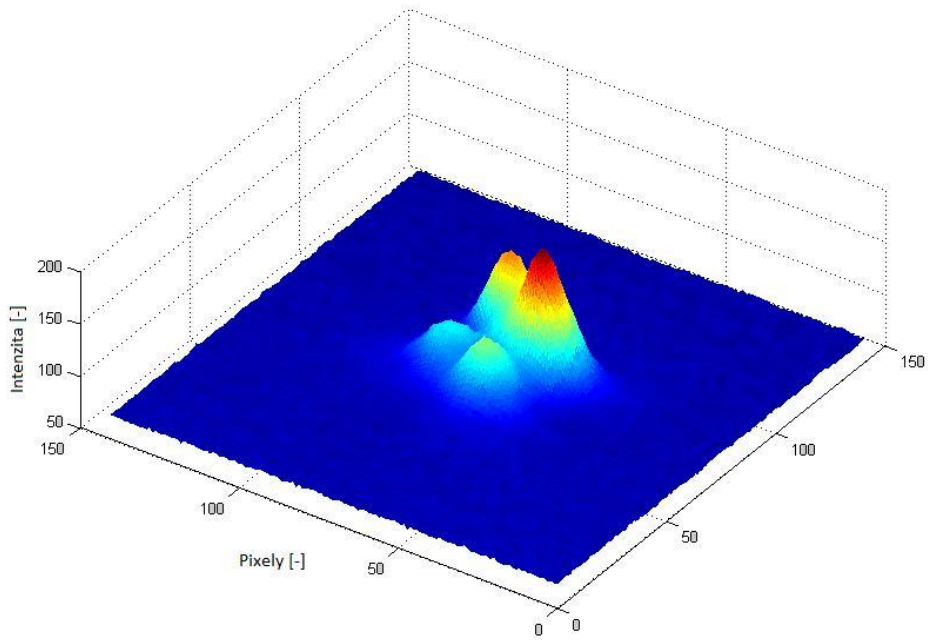


Obr. 47 Načtený obraz s kurzory myši

Zároveň je vykreslen 3D obraz pomocí funkce *mesh* znázorněný na Obr. 48 a Obr. 49. Pokud se do programu načte stopa pole základního vidu, je v 3D obrazu vykreslen pouze jeden vrchol. Pokud však načteme například obraz vidu LP_{21} , vidíme, jak se energie rozkládá mezi jednotlivé složky vyššího vidu. Jelikož bylo zobrazení vyššího vidu extrémně citlivé na nastavení sestavy, není možné vid LP_{21} zobrazit tak, aby bylo zcela rovnoměrně rozložení energie do dílčích složek.

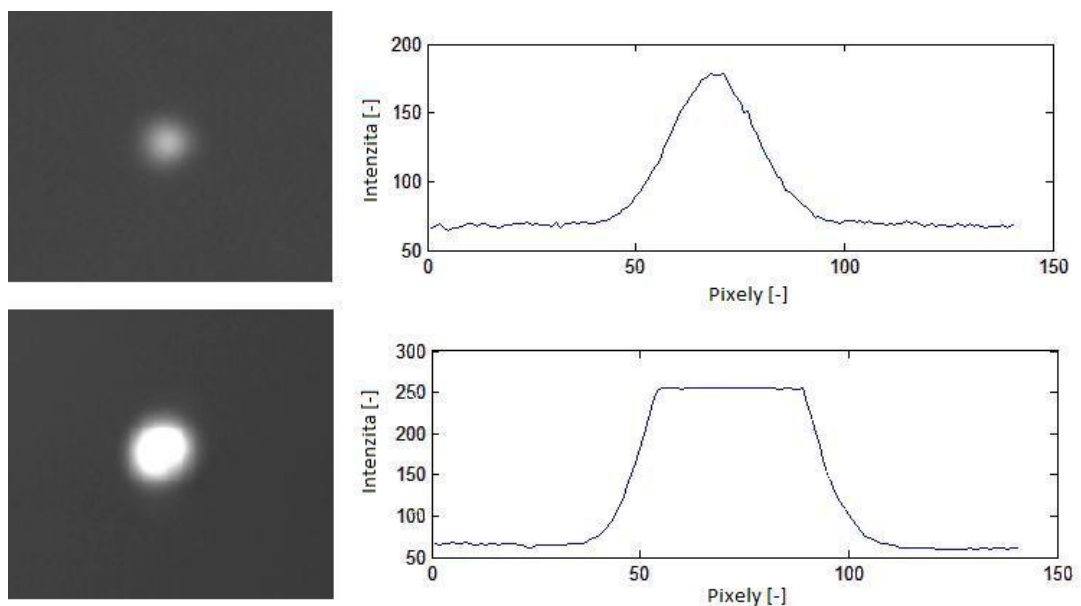


Obr. 48 3D obraz vidu LP_{01} vytvořený ze snímku infrakamery



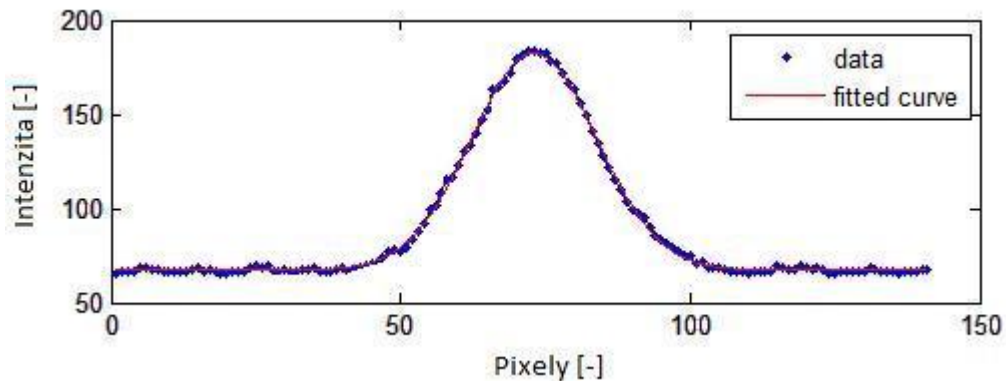
Obr. 49 3D obraz vidu LP₂₁

Po vykreslení 3D grafu je provedeno získání profilu intenzity za pomoci funkce *improfile*. Ta načte a vykreslí průběh intenzity v řezu osy x a y dle vybraného výchozího bodu. Vykreslený profil by pak měl mít tvar Gaussovského svazku. Největším problémem bylo získání správného tvaru profilu. Pokud byl totiž při měření obraz špatně naladěný nebo byl do vlákna poslán svazek o příliš vysokém výkonu, byl výsledný obraz přesvícený. Profil intenzity tak měl Gaussovský tvar, avšak s uříznutým (plochým vrcholem). Zde byla nutná další korekce. Maximální hodnota byla pak velmi zkreslená a nepřesná a nešlo tak korektně určit MFD při poklesu tohoto maxima. Ukázka správně změřené stopy pole spolu s přesvícenou stopou a jejich vlivu na tvar profilu intenzity jsou znázorněny na Obr. 50.



Obr. 50 Porovnání správně změřené a přesvícené stopy pole s profily intenzity

Jednotlivé profily intenzity bylo nutné proložit Gaussovskou funkcí s parametrem *gauss2*, jelikož byly hodnoty prvotně vykresleného profilu trochu odchýlené od ideálního tvaru pro výpočet (Obr. 51).



Obr. 51 Proložení dat profilu intenzity Gaussovskou křivkou

Maximum, které bylo při prvotním vykreslení kvůli malému rozlišení reprezentováno pouze jednou či dvěma hodnotami, bylo tím pádem nepřesné. Dalším aspektem byla hladina intenzity okolní černé barvy, na které vykreslení profilu začíná. Tmavá barva obrazů totiž není na stupnici absolutní, tedy maximální, a ani její odpovídající hodnota intenzity není vykreslena od nuly. Profil tedy musel být korigován, aby došlo ke správnému určení MFD. Hladina poklesu o 3 dB vůči maximu, na které je MFD definován byla následně určena podílem maxima optické intenzity a e^2 [21]. Samotný MFD byl pak určen počtem pixelů, které leží nad touto hladinou pomocí funkce *find*. Jelikož číselné hodnoty odpovídají rozměrům v jednotkách pixelů, bylo navíc zapotřebí je převést na vhodnější jednotky. Z rozlišení kamery bylo zjištěno, že 1 pixel na obrazu výstupní stopy pole odpovídá rozměru 0,262 μm . MFD určený z profilu intenzity byl pak vždy násoben touto konstantou. Tato konstanta zároveň udává maximální rozlišení a přesnost určení MFD. Nelze tedy určit MFD s přesností menší než $\pm 0,262$. Například MFD = 41 pixelů vychází po převodu 10,74 μm a MFD = 42 pixelů pak vychází 11 μm . Mezi tyto hodnoty tedy nelze vklínit přesnější výsledek kvůli této omezené velikosti obrazových bodů.

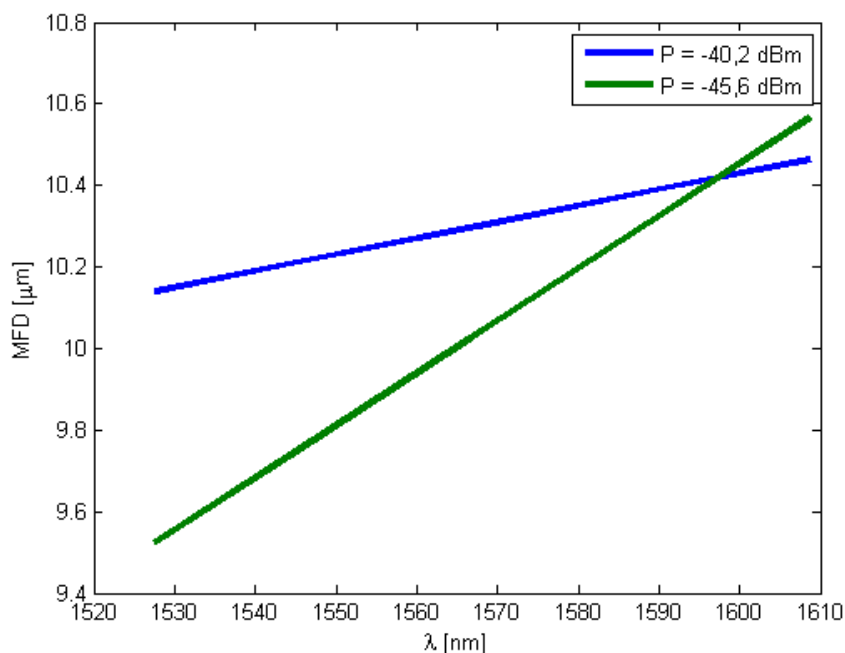
U standardních jednovidových optických vláken by se velikost MFD měla pohybovat okolo 10 μm . V našem případě je na vlnové délce 1565 nm MFD = 9,7 μm . U mikrostrukturního vlákna by MFD měl být zhruba 10,5 μm na 1550 nm [13]. Po získání profilu intenzity a následném výpočtu je u mikrostrukturního vlákna MFD = 10,48. Lze tedy tvrdit, že tato metoda měření a výpočtu je poměrně přesná i přes relativně malé rozlišení infrakamery.

U SMF vlákna byla také změřena závislost MFD na vlnové délce a vstupním výkonu. Měřeno bylo v rozsahu vlnových délek 1527,6 nm až 1608,7 nm (na vstupním LD zdroji nastavována frekvence 196,25 THz až 186,35 THz). Měřeno bylo dále na dvou výkonových úrovních $P=-40,2$ dBm a $P=-45,6$ dBm vstupního laditelného laseru. Znázornění těchto hodnot a odpovídající vypočtené MFD jsou uvedeny v Tab. 2.

λ [nm]	P = -40,2 dBm	P = -45,6 dBm
	MFD [μm]	
1527,6	10,21	9,69
1545,3	10,21	9,69
1565,4	10,21	9,69
1568,7	10,21	10,21
1590,4	10,48	10,21
1608,7	10,48	10,74

Tab. 2 Nastavené vstupní parametry a odpovídající vypočtené MFD

Z výsledků je patrný rozdíl velikosti MFD při měření na různých výkonech. Jelikož laserový zdroj nelze nastavit ve větším rozsahu λ , nebylo možné změřit charakter MFD v natolik širokém spektru. Navíc kvůli rozlišení obrazu z infrakamery nelze vypočítat MFD s přesností vyšší než s již zmiňovanými 0,262 μm , což je patrné i ve výše uvedených tabulkách, kdy na různých λ vychází stejná hodnota MFD. Toto je tedy jedna z nevýhod použité metody měření v blízkém poli. Z naměřených výsledků je ale patrné, že se MFD zvyšuje se zvyšující se λ .



Obr. 52 Závislost MFD na vlnové délce a vstupním výkonu

6 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo sestavení měřicího pracoviště pro navazování a detekci optických svazků ve speciálních optických vláknech. Nejprve byl proveden teoretický rozbor problematiky mikrostrukturních vláken. V praktické části byly analyzovány různé struktury optických vláken, a to jak klasických SM vláken, tak i vláken mikrostrukturních s plným jádrem v programu BeamPROPTM. Zjistilo se, že při určitém nastavení šířky vzduchových otvorů, počtu jejich vrstev nebo jejich rozteče lze modifikovat, na kterých vlnových délkách je vlákno jednovidové a dobře váže záření uvnitř jádra. Simulováno bylo i skutečné mikrostrukturní vlákno ESM-12B s reálnými parametry. Výstupní stopa pole simulace zcela odpovídá katalogovým údajům. Dále bylo otestováno šíření dílčích LP vidů v závislosti na nastavené λ . Zjistilo se, že vlákno ESM-12B opravdu pracuje v jednovidovém režimu v rozsahu λ 700nm až 1700 nm, jak je uvedeno v katalogu. Díky simulacím tohoto vlákna bylo možné očekávat, jaký by měla mít stopa pole tvar. V tomto případě byl základní vid skutečně vázán k jádru s takřka nepatrným únikem jeho energie do pláště mezi okolní vzduchové otvory.

Dalším úkolem bylo navrhnout a ověřit měřicí pracoviště pro navazování a detekci záření v optických vláknech. Při návrhu byly zváženy jednotlivé metody měření stopy pole vláken. Jako nejpraktičtější byla zvolena metoda měření v blízkém poli z důvodů dostupnosti a případné možnosti pořízení jednotlivých přístrojů a komponent a dále také kvůli možnosti pozorování skutečné stopy pole měřeného vlákna (u metody měření ve vzdáleném poli se měří pouze profil výstupní intenzity záření). Navržené a sestavené zapojení využívá co nejmenšího počtu komponent k docílení požadovaného výstupu. Pomocí infrakamery byly úspěšně detekovány některé vyšší vidy šířící se klasickým jednovidovým vláknem. Dobře patrný byl zejména základní lineárně polarizovaný vid LP₀₁. Vlivem ohybu vlákna bylo pozorováno, jakým způsobem se stávají vyšší vidy vedenými a jak se mění rozložení energie například z vidu LP₀₁ na vid LP₁₁. Velmi jemným naladěním sestavy se také podařilo identifikovat vid LP₂₁. Úspěšně byla změřena také stopa pole mikrostrukturního vlákna ESM-12B. Zapojení je tedy vhodné k měření jak standardních vláken, tak i speciálních. Díky zvolené metodě je však velmi citlivé na korektní nastavení polohy měřeného vlákna vůči objektivu a také na nepatrné ořesy. Dalším faktorem je vliv okolního záření. Měření pomocí této sestavy je lepší provádět spíše v temnějším prostoru.

U klasického SMF vlákna byla dále změřena stopa pole v závislosti na vlnové délce vstupního záření λ a vstupním výkonu P . Vstupní λ byla na laditelném LD zdroji nastavena v rozsahu 1527,6 nm až 1608,7 nm, což je maximální rozsah tohoto přístroje. Výkonové úrovně byly nastaveny dvě, a to $P = -40,2$ dBm a $P = -45,6$ dBm. Z jednotlivých naměřených stop pole byl následně stanoven parametr MFD. Na $\lambda = 1565$ nm je $MFD = 10,21$ μm , což takřka odpovídá katalogovým údajům. Z důvodů zvolené metody měření a také kvůli rozlišení použité infrakamery je možné MFD stanovit s maximální odchylkou $\pm 0,262$ μm , což je konstanta odpovídající rozměru jednoho pixelu z nasnímaného obrazu výstupní stopy pole. Díky této odchylce a také relativně nízkému rozsahu laditelného LD zdroje není možné stanovit MFD v širším spektru λ . Z výsledků je však patrné, že se MFD zvyšuje s narůstající λ , což je v souladu s teoretickým průběhem MFD. Pro přesnější stanovení MFD by teoreticky bylo možné použít metodu měření ve vzdáleném poli. U této metody by však mohla vzniknout chyba zejména při kalibraci fotodetektoru a není tak jisté, zdali by se její přesnost zlepšila oproti použité metodě měření v blízkém poli.

Práce poskytuje praktickou metodu jak měřit běžné i nové druhy speciálních optických vláken. Nabízí možnost analýzy skutečné výstupní stopy pole vláken a udává způsob, jakým lze z této naměřené stopy poměrně přesně stanovit některé parametry optických vláken, zejména MFD.

Literatura

- [1] F. Zolla, G. Renversez, A. Nicolet, B. Kuhlmeiy, S. Guenneau, D. Felbacq, "Foundations of Photonic Crystal Fibres" (*Imperial College Press*, London, 2005). ISBN: 1-86094-507-4.
- [2] Agrawal, G.P.: "Fiber-Optic Communication Systems," Wiley-Interscience, 2002. ISBN: 978-0-470-50511-3
- [3] Joannopoulos, J.; Johnson, S.; Winn, J.; Meade, R.: Photonic Crystals: "Molding the flow of light", *Princeton University Press*, 2nd edition, 2008
- [4] Yeh, P.; Yariv, A.; Marom, E.: "Theory of Bragg fiber.", *Optical Society of America* Vol. 68, Issue 9, pp. 1196-1201 (1978).
- [5] Yablonovitch, E.: "Photonic band-gap structures", *Optical Society of America*, Vol. 10, Issue 2, pp. 283-295 (1993)
- [6] Russell, P. St. J., "Photonic-Crystal Fibers," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 24, no. 12, pp. 4729,4749, Dec. 2006
- [7] Baba, T.: "Photonic Crystals – An introduction", [online], *Yokohama National University*, [cit. 2014-4-4], Dostupné z: http://www.jsps.go.jp/j-bilat/fos_ja/data/jishi_06/abst08.pdf
- [8] "Braggs law with derivation and applications", [online], [cit. 2014-4-4], Dostupné z: <http://www.analyticalchemistrygsu.com/2013/03/braggs-law-with-applications-and.html>
- [9] Tadaszak, R.; Ludian, K.; Olszewski, J.; Ryznar, T., "Photonic Crystals in Nature," *Photonics and Microsystems, 2006 International Students and Young Scientists Workshop*, vol., no., pp. 61,62, June 30 2006 – July 2 2006
- [10] Paschotta, R.: "Photonic Crystal Fibers, " [online], *RP Photonics Encyclopedia*, [cit. 2014-4-4], Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/photonic_crystal_fibers.html
- [11] "*BeamPROP product overview*, " [online] [cit. 2014-4-4], Dostupné z: <http://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-passive-device-beamprop.html>
- [12] "Microstructured fibers HN-PCF", [online], *FORC-Photonics* [cit. 2014-4-4], Dostupné z: http://www.forcphotonics.ru/en/fibers_and_cables/Microstructured_fibers/1/160
- [13] "ESM-12-02 fiber" [online], *NKT Photonics* [cit. 2014-4-4], Dostupné z: <http://nktphotonics.com/files/files/ESM-12-02.pdf>
- [14] "Endlessly Single Mode, Large-Mode-Area-Fiber," [online] *Thorlabs* [cit. 2014-4-4], Dostupné z: <http://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/1052.PDF>

- [15] Du, H.: "Fiber-optic sensing" [online], *Stevens Institute of Technology* [cit. 2014-4-4], Dostupné z: <http://research.stevens.edu/fiber-optic-sensing-pcf-spie>
- [16] Witkowska, A.; Marciniak, M., "Nonlinear PCF as dispersion compensator in high-bitrate fiber links," *Transparent Optical Networks, 2004. Proceedings of 2004 6th International Conference on*, vol. 2, no., pp. 234,237 vol. 2, 4-8 July 2004
- [17] "Highly Nonlinear Fibers" [online], *NKT Photonics* [cit. 2014-4-4], Dostupné z: <http://www.nktphotonics.com/nonlinearfibers>
- [18] Englich, F.V.; Schartner, E.P.; Murphy, D.F.; Ebendorff-Heidepriem, H.; Monro, T.M., "Fusion splicing soft-glass suspended core fibers to solid silica fibers for optical fiber sensing," *Optical Fibre Technology (ACOFT), 2010 35th Australian Conference on* , vol., no., pp.1,4, 5-9 Dec. 2010
- [19] M. Grabka, B. Wajnchold, S. Pustelny, W. Gawlik, K. Skorupski, and P. Mergo, "Experimental and theoretical study of light propagation in suspended-core optical fiber," *Acta Phys. Pol.* A118, 1127–1132 (2010).
- [20] Shavrin, I.; Tvarozek, P.; Koys, M.; Schuster, K.; Novotny, S.; Ludvigsen, H., "Extremely white supercontinuum generation in three-hole suspended-core fiber," *Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO EUROPE/EQEC), 2011 Conference on and 12th European Quantum Electronics Conference* , vol., no., pp.1,1, 22-26 May 2011
- [21] Artiglia, M.; Coppa, G.; Di Vita, P.; Potenza, M.; Sharma, A., "Mode field diameter measurements in single-mode optical fibers," *Lightwave Technology, Journal of*, vol.7, no.8, pp.1139, 1152, Aug 1989
- [22] Namihira, Y.; Miyagi, K.; Abdur Razzak, S.M., "Relationship between effective area and mode field diameter for photonic crystal fibers," *OptoElectronics and Communications Conference, 2009. OECC 2009. 14th* , vol., no., pp. 1,2, 13-17 July 2009
- [23] Miao Ye; Yuanhong Yang; Weiqian Duan; Mingwei Yang, "Measure and redress of mode field diameter of polarization maintaining photonic crystal fibers," *Instrumentation and Control Technology (ISICT), 2012 8th IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.101, 104, 11-13 July 2012
- [24] "As-S suspended core MOFs", [online], *Optics* [cit. 2014-4-4], Dostupné z: <http://ioptic.wordpress.com/2010/11/11/146/>

- [25] Viale, P.; Fevrier, S.; Humbert, G.; Yan, M.; Shum, P.; Auguste, J.; Roy, P.; Blondy, J. -M, "Identification of Guidance Regimes in Filled-Core Photonic Crystal Fibres," *Optical Communications, 2006. ECOC 2006. European Conference on*, vol., no., pp. 1,2, 24-28 Sept. 2006
- [26] Wolinski, T.R.; Budaszewski, D.; Chychłowski, M.; Czaplą, A.; Ertman, S.; Lesiak, P.; Rutkowska, K.; Sierakowski, M.; Tefelska, M.; Domański, A.W., "Photonic liquid crystal fibers: Towards highly tunable photonic devices," *Photonics (ICP), 2010 International Conference on*, vol., no., pp.1,5, 5-7 July 2010
- [27] Sanghera, J. S., Shaw, L. B., & Aggarwal, I. D. (2002). "Applications of chalcogenide glass optical fibers". *Comptes Rendus Chimie*, 5(12), 873-883.
- [28] [10] Paschotta, R.: "Fluoride Fibers," [online], *RP Photonics Encyclopedia*, [cit. 2014-5-6], Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/fluoride_fibers.html
- [29] "Scanning Near-Field Optical Microscopy", [online], *The Institute of Optics, University of Rochester*, [cit. 2014-5-6], Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/fluoride_fibers.html
- [30] "Fiber Launch Systems: Professional Solutions" [online] *Thorlabs* [cit. 2014-5-6], Dostupné z: http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=810
- [31] "Imaging/Focusing Microscope Objectives" [online] *Thorlabs* [cit. 2014-5-6], Dostupné z: http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1044
- [32] "MicronViewer 7290" [online] *Elektrophysics* [cit. 2014-5-6], Dostupné z: http://www.electrophysics.com/Browse/Brw_ProductLineCategory.asp?CategoryId=14&Area=IS
- [33] "Solid Aluminum Optical Breadboards" [online] *Thorlabs* [cit. 2014-5-6], Dostupné z: http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=159
- [34] Paschotta, R.: "LP modes," [online], *RP Photonics Encyclopedia*, [cit. 2014-5-6], Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/lp_modes.html
- [35] Qian, Jing-Ren; Wei-ping Huang, "LP modes and ideal modes on optical fibers," *Lightwave Technology, Journal of*, vol.4, no.6, pp.626, 630, Jun 1986 doi: 10.1109/JLT.1986.1074759