

POZNÁMKY K POPISU OPTICKÝCH VLÁKIEN Z FOTONICKÝCH KRYŠTÁLOV

REMARKS TO DESCRIPTION OF INDEX GUIDING

PHOTONIC-CRYSTAL FIBRES

Daniel Káčik, Ivan Turek, Ivan Martinček, Dušan Pudíš

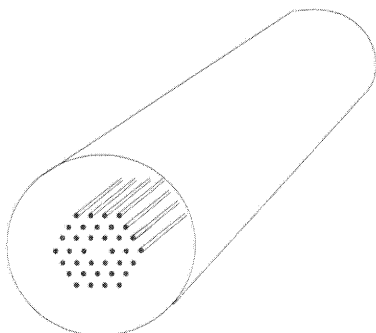
Katedra fyziky, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina

Abstrakt: V príspevku dokumentujeme, že niektoré vlastnosti fotonických kryštálových vlákien vodiacich prostredníctvom indexulomu (index guiding fibres) neodpovedajú ich názvu. Svedčí o tom pozorovaný vplyv mechanického ohybu na ich prenosovú funkciu, ako i tvar modálnych polí takýchto vlákien získaných fotografickým snímaním modálneho poľa, alebo metódou rastovania blízkeho poľa pomocou skenovacieho mikroskopu.

Summary: Some properties of "index guiding photonic crystal fibres" do not correspond to this name. As it is shown in this paper, the influence of mechanical bending on the transfer function as well as the shape of their modal field documents it. The modal field was taken by a photograph and using near-field scanning optical microscopy.

1. ÚVOD

Realizácia klasických optických vlnovodov (optických vlákien) je založená na úplnom odraze svetelných vln na rozhraní opticky hustejšieho prostredia, ktorým je jadro vlákna a plášť ako opticky redšieho prostredia. Keď rozdiel indexu lomu jadra a plášťa nadobudne istú hodnotu, k úplnému odrazu dochádza pri dostatočne širokom intervale uhla dopadu vln na toto rozhranie. V dôsledku toho pri osvetlení čela vlákna, vlny, ktorých smer šírenia spadá do uhla vymedzeného numerickou apertúrou (závislou od indexov lomu jadra a plášťa) budú tieto vlny vláknom „vedené“, t. j. budú sa jadrom vlákna šíriť bez toho, aby dochádzalo k ich vyžiareniu do okolitého prostredia.



Obr.1 Rez štruktúrou vlákna s dutinami
Fig. 1 Cross-section of fiber with air-hollows

Pred niekoľkými rokmi boli publikované [1] optické vlákna, v ktorých je vedenie svetelných vln dosiahnuté nie úplným odrazom na rozhraní dvoch prostredí, ale odrazom na periodicky uložených „poruchách“ ktoré obklopujú jadro vlákna. Tieto poruchy sú spravidla tvorené malými pozdĺžnymi dutinami s vhodnými vzdialenosťami a sú periodicky uložené rovnobežne s osou optického vlákna (obr.1).

Odraz svetelných vln na týchto poruchách je analogický Braggovskému odrazu na priestorovo periodickej mriežke. Pre takýto odraz je charakteristické, že pre každú štruktúru existujú oblasti vlnových dĺžok, ktoré sa pod istými uhlami dopadu touto štruktúrou nemôžu šíriť. To znamená, že takéto vlny sa pri dopade od tejto štruktúry odrážajú. Ak taká štruktúra obklopuje „jadro vlákna“ je šírenie sa týchto vln obmedzené na jadro vlákna.

Existencia oblastí vlnových dĺžok (energií fotónov), ktoré sa nemôžu periodickou štruktúrou šíriť je analógiou k oblasti energií, ktoré nemôžu mať voľné elektróny v kryštáloch. Táto oblasť energií sa nazýva zakázané pásmo, anglicky „gap“ [2] Vďaka tejto analógii sa pre vlákna s periodicky rozmiestnenými dutinami zaužíval názov „fotonické kryštálové vlákna“ (photonic crystal fibers – PCF).

Keďže odraz na periodickej štruktúre nie je založený na odraze vln pri prechode rozhraním s odlišnými indexmi lomu, môžu existovať PCF, v ktorých sa svetelná vlna šíri prostredím s malým indexom lomu (vzduch, resp. vákuum), ale i s indexom lomu rovným, alebo väčším než je priemerný index lomu „plášťa“, t. j. obklopujúceho prostredia s vytvorenými poruchami. Vlákna oboch typov boli pripravené a pre prvý typ sa zaužíval názov „Band-gap guiding photonic crystal fibres“ [3] a druhý typ vlákien sa označuje ako „index guiding photonic crystal fibres“.

Názov index guiding photonic crystal fibres súvisí s tým, že oblasť vlákna s dutinami je možné v prvom priblížení považovať za prostredie s menším indexom lomu, ako je index lomu v ostatných oblastiach vlákna. Toto je spôsobené vzduchom vyplnenými dutinami s menším indexom lomu, ako je index lomu materiálu, z ktorého je vlákno. Pokiaľ je vzdialenosť dutín malá v porovnaní s vlnovou dĺžkou svetla ktoré sa vláknom šíri, je takáto aproximácia prirodzená. Je prekvapujúce, že i pri vzájomných vzdialenostiach dutín porovnateľných,

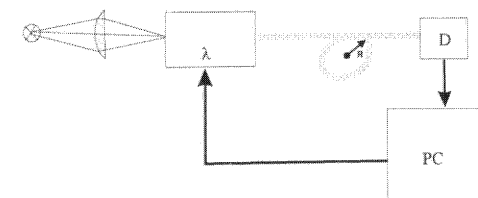
a dokonca i väčších ako je vlnová dĺžka, uvedená aproximácia dobre popisuje niektoré vlastnosti týchto vlákien.

Pri vyšetrení fotonických kryštálových vlákien firmy *CENTAURUS Technologies*, Sydney sme však videli, že niektoré ich vlastnosti sa nedajú uvedenou aproximáciou popísať. Takéto rozdiely sa prejavili pri sledovaní vplyvu ohybu vlákna na jeho prenosovú funkciu a pri vyšetrení rozloženia vidového poľa vlákna.

2. VPLYV OHYBU PCF NA ICH PRENOSOVÚ FUNKCIU

Vplyv ohybu vlákna na jeho prenosovú funkciu sme vyšetřovali v experimentálnom usporiadaní, ktorého schéma je uvedená na obr.2.

Použitie zariadenie pozostáva zo zdroja svetla (halogenová žiarovka), monochromátora a detektora signálu. Na výstupnej štrbine monochromátora je

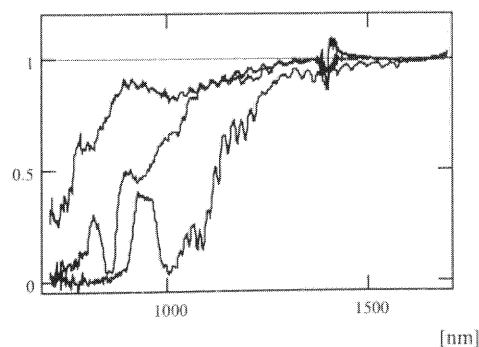


Obr. 2 Schematické usporiadanie merania (λ - monochromátor, D - detektor, PC - počítač)

Fig.2 Schematic of experimental setup (λ - monochromator, D - detector, PC - computer)

umiestnené vyšetřované vlákno. Signál na konci vlákna je snímaný detektorom. Monochromátor je riadený počítačom a výstup z detektora je cez A/D prevodník zaznamenávaný v počítači.

Porovnaním spektrálnych závislostí signálov nameraných po prechode vláknom, ktorého časť je zakrivená so signálom po prechode rovným vláknom získame krivky charakterizujúce zmenu prenosovej funkcie vlákna. Takéto krivky namerané pre rôzne polomery krivosti sú uvedené na obr.3. Je pre ne charakteristické, že ohyb vlákna sa na prenosovej

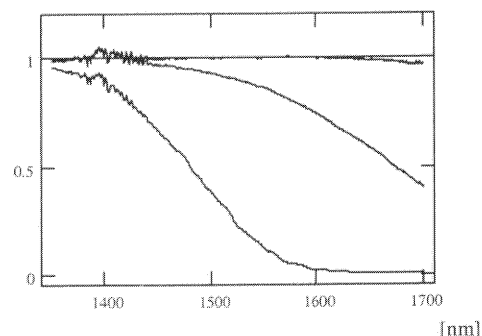


Obr.3 Prenosové funkcie PCF pri rôznych ohyboch vlákna v rozsahu 700-1700nm

Fig.3 Transmission functions of the PCF with different curvatures in the range 700-1700nm

funkcii prejavuje najmä v krátkovlnnej oblasti a iba nepatrne v dlhovlnnej oblasti.

Pre porovnanie sú na obr.4 uvedené analogické krivky, avšak získané pri ohybe klasického step-indexového vlákna. Je vidieť, že na klasických step-indexových vláknach sa ich ohyb na prenosovej funkcii prejavuje stratou prenosu najmä v dlhovlnnej oblasti, zatiaľ čo v krátkovlnnej oblasti sa prenosová funkcia ohybom vôbec nemení. Vysvetlenie



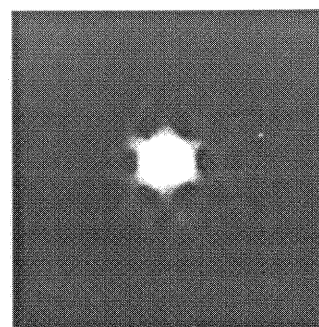
Obr.4 Prenosové funkcie step-indexového vlákna pri jeho rôznych ohyboch v rozsahu 1350-1700nm

Fig.4 Transmission functions of step-index fibre with different curvatures in the range 1350-1700nm

uvedeného správania je možné uvažovaním vplyvu ohybu na prenosovú funkciu ako dôsledok zmeny podmienok pri Braggovskom odraze na ohybom pozmenenej periodickej štruktúre a to i v prípade, že sa jedná o „index-guiding fibre“.

3. TVAR MODÁLNYCH POLÍ

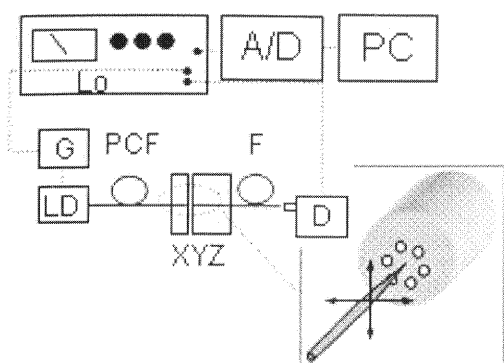
Tvar modálnych polí možno určiť v podstate dvojakým spôsobom – fotografovaním poľa na výstupe optického vlákna po vhodnom zväčšení, alebo rastrovaním poľa pomocou skenovacieho optického mikroskopu. Výsledky oboch týchto postupov sú uvedené na nasledujúcich obrázkoch. Na obr.5 je uvedená fotografia optického poľa na výstupe PCF pri budení vlákna bielym svetlom.



Obr.5 Fotografia profilu intenzity PCF pri budení bielym svetlom

Fig.5 Picture of intensity profile PCF at excited by white light

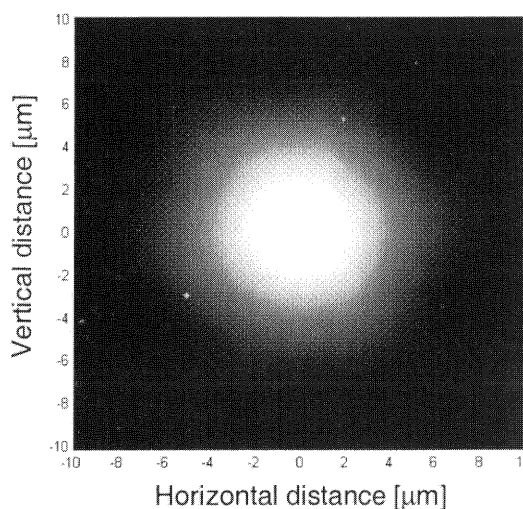
Na obr.6 je uvedená schéma usporiadania experimentu a na obr.7 je znázornený výsledok



Obr.6 Schématické usporiadanie experimentu rastrovania blízkeho poľa PCF (G-impulzný generátor, LD-laserová dióda, PCF- vyšetřované fotonické kryštálové vlákno, XYZ-3D mechanický posuv, F-zahrotené vlákno, D-detektor, Lo-lock-in zosilňovač, A/D-prevodník, PC-počítač)

Fig. 6 Schematic of PCF near-field scanning experiment setup (G-pulse generator, LD-laser diode, PCF-photonic crystal fibre, XYZ-3D micromechanical stage, F-tapered fibre, D-detector, Lo-lock-in amplifier, A/D-converter, PC-computer)

skenovania poľa na výstupe toho istého vlákna, ktoré bolo použité pri fotografickej metóde. Uvedené záznamy sú vytvorené pri rôznom budení a to tak, že v jednom prípade bolo zobrazené pole základného módu (obr.7a) a na obr.7b je pole odpovedajúce superpozícii prvého a druhého módu.

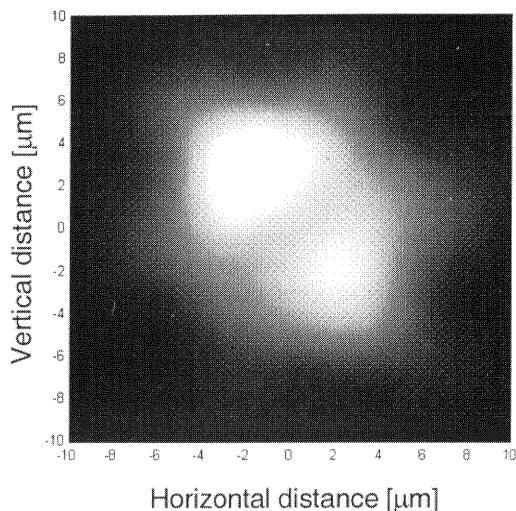


Obr.7a Obrázok základného módu získaný metódou rastrovania blízkeho poľa PCF

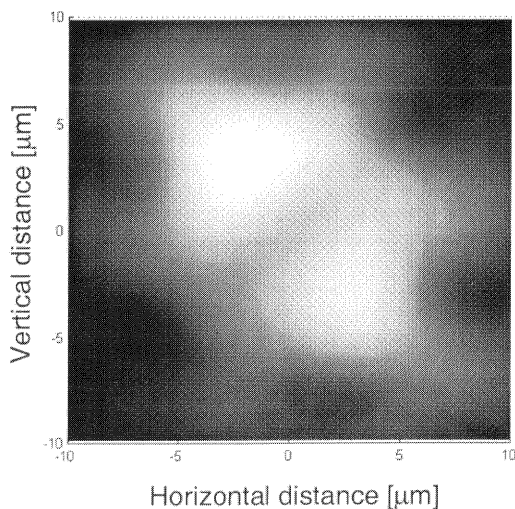
Fig. 7a Image of fundamental mode in PCF recorded by near-field scanning optical microscopy

Numerickým spracovaním bolo porovnaním týchto priebehov získaný obraz druhého módu (obr.8).

Na obrazoch rozloženia modálnych polí získaných obidvoma spôsobmi je vidieť, že sa nejedná o polia



Obr. 7b Obrázok superpozície prvého a druhého módu
Fig. 7b Image of superposition both of fundamental and first higher order mode



Obr. 8 Vypočítaný obraz druhého módu z rozdielu superpozície prvého a druhého módu (obr. 7b) a prvého módu (obr. 7a)

Fig. 8 The second mode radial intensity distribution calculated numerically by subtracting Fig.7a from Fig. 7b

s cylindrickou symetriou. Rozloženie poľa je zjavne ovplyvnené trigonálnym usporiadaním valcových dutinových porúch tvoriacich štruktúru PCF. Súvis štruktúry vlákna a rozloženia modového poľa je vidieť na obr.8, kde tmavé kruhy, umiestnené vo vrcholoch pravidelného šesťuholníka, odpovedajú k jadru najbližším dutinám vytvárajúcim Braggovskú štruktúru vlákna.

4. ZÁVER

Uvedené výsledky vyšetovania PCF dokumentujú, že i v prípade index guiding fibres sa jedná o vlákna, ktorých vlastnosti určujú parametre „fotonického kryštálu“, na ktorom sa vytvára odraz svetelných vln šíriacich sa príslušným PCF.

Táto práca vznikla čiastočne za podpory grantovej agentúry Slovenskej republiky VEGA, grant č. 1/2048/05 a Agentúry pre podporu vedy a techniky APVT 20-013504.

LITERATÚRA

- [1] J.C. Knight, T.A. Birks, P.S.J. Russell, D.M. Atkin: All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding”, *Opt.Lett.*, **21** (1996) 1547.
- [2] E. Yablonovitch: Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics, *Phys.Rev.Lett.* **58** (1987) 2059
- [3] J.C. Knight, J. Broeng, T.A. Birks, P.S.J. Russell, *Science* **282** (1998) 1476