

Optička vlakna nove generacije

Milan S. Kovačević, Ljubica Kuzmanović

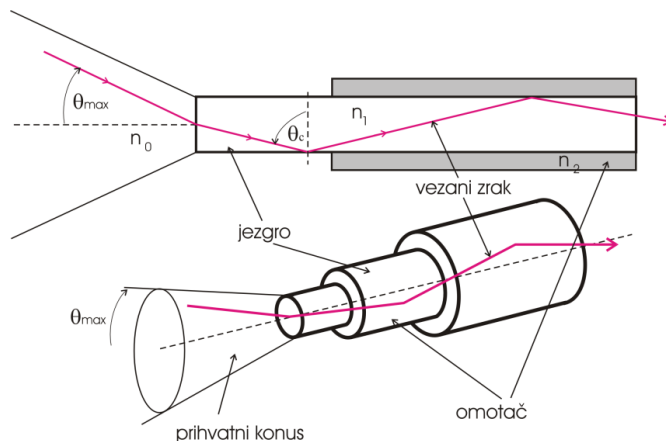
Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, Srbija

Apstrakt. U poslednjih dvadesetak godina svedoci smo intenzivnih izučavanja optičkih vlakana u svetu i kod nas. Komunikacioni sistemi zasnovani na konvencionalnim jednomodnim optičkim vlaknima mogu se suočiti sa „padom kapaciteta“ u bliskoj budućnosti. Godina 2020. se smatra prekretnicom kada će kapacitet optičkih komunikacija jednomodnim optičkim vlaknom dostići fizičko ograničenje koje se naziva „fiber zid“. Ovo je snažan impuls istraživačima širom sveta da razvijaju tehnologije novih optičkih vlakana. Ovaj članak daje pregled polja u kojima će se ubuduće razvijati optičke komunikacije sa fokusom na nova optička vlakna. Tako su razvijena fotonsko kristalna vlakna (eng. *photonic crystal fibers*), vlakna sa više jezgara (eng. *multicore fibers*), šuplja vlakna (eng. *holey fibers*) i mnoga druga. Nove komunikacione tehnike obuhvataju koherentne komunikacije i multipleksiranja.

Ključne reči: optičko vlakno, indeks prelamanja, propusni opseg, disperzija.

OPŠTE NAPOMENE O OPTIČKOM VLAKNU

Optičko vlakno (eng. *optical fiber*) je cilindrična struktura, izgrađena od više slojeva transparentnog dielektričnog materijala, koja vodi svetlost u intervalu talasnih dužina koji odgovara vidljivom i infracrvenom delu elektromagnetnog spektra. Osnovnu strukturu standardnog vlakna čini centralni sloj koji vodi svetlost, i naziva se jezgro (eng. *core*) vlakna. Oko jezgra se nalazi drugi sloj dielektričnog materijala koji se naziva omotač (eng. *cladding*). Na slici 1 prikazano je prostiranje svetlosti kroz optičko vlakno čije jezgro ima indeks prelamanja n_1 i omotač indeksa prelamanja n_2 , pri čemu je $n_1 > n_2$. Svetlost se kroz optičko vlakno prostire po principu totalne unutrašnje refleksije (slika 1).

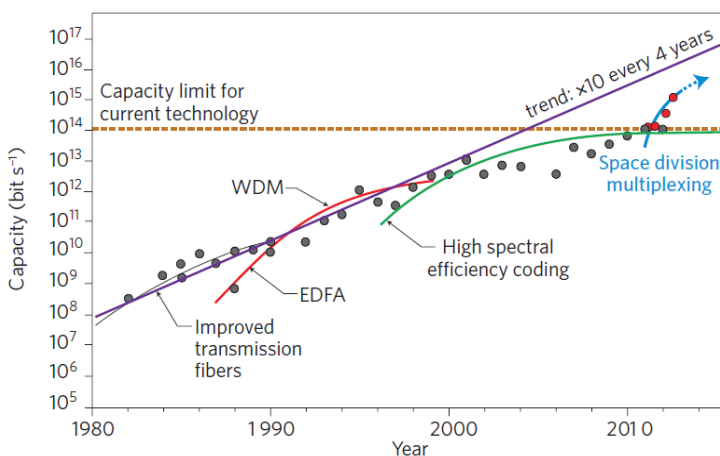


SLIKA 1. Prostiranje svetlosti kroz optičko vlakno.

Prostiranje svetlosti kroz optičko vlakno zavisi od: veličine (prečnika jezgra), konstrukcije i sastava vlakna kao i od talasne dužine svetlosti ubačene u vlakno. Optička vlakna se najčešće dele prema broju modova koji se prostiru kroz jezgro. Na osnovu ove osobine razlikujemo multimodna (višemodna) vlakna (eng. *multimode fiber*) kroz čije jezgro se prostire na stotine čak i hiljade modova, i monomodna (jednomodna) vlakna (eng. *single-mode fiber*) čije jezgro podržava samo jedan talasni mod. Kada je dizajn optičkih vlakana u pitanju, rešenje je u projektovanju indeksa prelamanja. Na osnovu indeksa prelamanja jezgra i omotača, vlakna mogu biti sa stepenastim indeksom prelamanja (konstantan indeks prelamanja po poprečnom preseku jezgra i skokovita promena indeksa prelamanja pri prelasku iz jezgra u omotač), i gradijentna vlakna kod kojih je indeks prelamanja jezgra glatka funkcija radialne koordinate r (promena indeksa prelamanja je postepena, polazeći od centra jezgra, odakle se njegova vrednost postepeno smanjuje radialno, da bi na mestu prelaza u omotač bila jednaka indeksu prelamanja omotača). Pored ovih, postoje vlakna i sa složenijim profilom indeksa prelamanja, kao na primer vlakna sa dva omotača (eng. *double-clad*), u literaturi poznata kao vlakna sa W -indeksom prelamanja, i mnoga druga. Prema vrsti materijala od koga su načinjena, optička vlakna delimo na: staklena, vlakna sa staklenim jezgrom i plastičnim omotačem, i plastična optička vlakna.

EVOLUCIJA OPTIČKIH MREŽA

Prvi test slanja optičkog signala kroz vlakno urađen je 1977. godine. Ubrzo nakon toga, izvršen je prenos telefonskog signala kroz multimodna vlakna (General Telephone and Electronic, GTE sa brzinom 6 Mb/s, American Telephone & Telegraph, AT&T sa brzinom 45 Mb/s, i United Kingdom Post Office sa brzinom 8.4 Mb/s). U zadnjih 40 godina uočavaju se četiri etape u razvoju transmisije signala: era regeneracije (1977-1995), era pojačavača i sistema sa podesivom disperzijom (1995-2008), era pojačanih koherentnih sistema (2008-danas), i era mreža sa prostornim multipleksiranjem i multipleksiranjem po talasnim dužinama (2008- danas). Kapacitet optičkih mreža i dalje raste zapanjujućom brzinom, a prenošenje hiljada gigabita po sekundi više nije san. Na slici 2 prikazna je evolucija prenosnog kapaciteta optičkih vlakana (grafik je preuzet iz rada [6]).

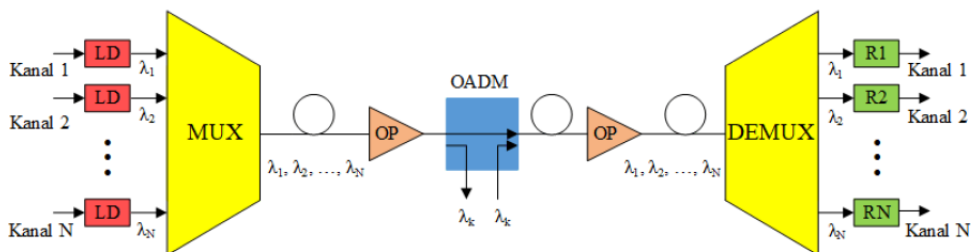


SLIKA 2. Evolucija prenosnog kapaciteta optičkih mreža u prethodnih 30 godina [6].

Ekstrapolacijom trenda razvija optičkih komponenata na pretpostavci da će razvoj kompjuterske tehnologije pratiti stopa rasta od 40% u odnosu na trenutnu tehnologiju, predviđanja su da će 2037 godine zahtev za kapacitetom optičkih mreža biti reda veličine petabita u sekundi (Pb/s).

NOVI HORIZONTI: WDM I SDM OPTIČKE MREŽE

U optičkim komunikacionim sistemima prenos informacija se ostvaruje pomoću optičkih nosilaca. Signal se kodira u obliku intenziteta, frekvencije ili faze optičkog signala. Električni signal se utisne u intenzitet, talasnu dužinu ili fazu optičkog signala. Ovako moduliran optički signal ubacuje se u optičko vlakno i prenosi do željene destinacije. Na mestu prijema fotodetektor konvertuje i regeneriše električni signal poslat optičkim nosiocem. Sa napretkom optoelektronike došlo je do razvoja tehnologije multipleksiranja po talasnim dužinama (eng. *Wavelength Division Multiplexing, WDM*) i prostorno multipleksiranje (eng. *Space Division Multiplexing, SDM*). WDM sistemi se zasnivaju na multipleksiranju signala po talasnim dužinama, čime se postiže prenos više signala istim optičkim vlaknom, ali na različitim talasnim dužinama [7]. Kod WDM sistema razne boje svetlosti (talasne dužine) deluju nezavisno jedna od druge (nose različite informacije), a da se prenose istim optičkim vlaknom, kao što je prikazano na slici 3.



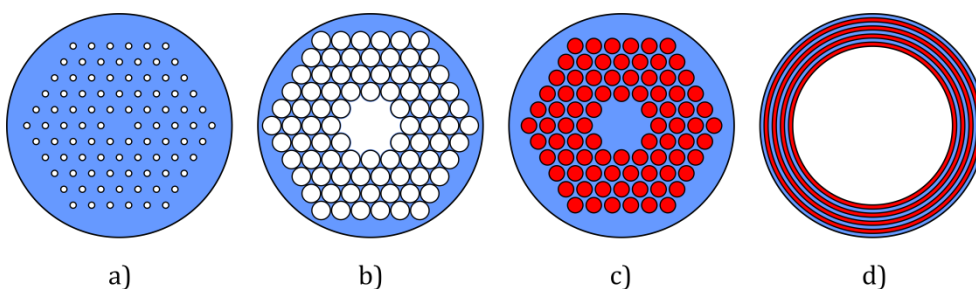
SLIKA 3. WDM optička mreža - osnovna struktura (LD – laserska dioda, OP – optički pojačavač, OADM optički add-drop multiplekser, R – prijemnik) [7].

Optički multiplekser (MUX) prihvata skup optičkih signala na različitim talasnim dužinama i kombinuje ih u jedinstveni optički signal. Dobijeni optički signal se prosleđuje na jedinstveno izlazno optičko vlakno. Optički demultiplekser (DEMUX) vrši upravo suprotnu funkciju. Njegov zadatak je da iz prispelog optičkog signala, koji se sastoji iz više komponenti na različitim učestanostima (talasnim dužinama), izdvoji njegove sastavne komponente i prosledi ih na različita izlazna optička vlakna. U ovim sistemima se obično koristi par optičkih vlakana između multipleksera i demultipleksera, pri čemu se jedno vlakno koristi za predaju, a drugo za prijem signala. Za prenos se koriste NZ-DSF optička vlakna (eng. *non-zero dispersion-shifted fiber*) projektovna specijalno za potrebe WDM sistema. Ideja je bila da se projektuju vlakna sa niskom disperzijom u oblasti 1550 nm, koja bi delovala nasuprot nelinearnih efekata, npr. mešanja četiri talasa. Postoje tri tipa WDM sistema. Prvi tip je tzv. normalni WDM sistem koji prenosi signale na samo dve talasne dužine, 1310 nm i 1550 nm. Sistemi sa „grubim“ multipleksiranjem po talasnim dužinama (CWDM, eng. *coarse wavelength division*

multiplexing) obezbeđuju 18 kanala za prenos podataka koristeći talasne dužine od 1271 nm do 1611 nm sa razmakom od 20 nm. Sistemi sa gustim multipleksiranjem po talasnim dužinama (DWDM, eng. *dense wavelength division multiplexing*) koriste talasne dužine u C (1525-1565 nm) i L (1565-1625 nm) opsegu talasnih dužina i omogućavaju od 40 do 160 kanala u zavisnosti od rastojanja između njih.

NEKA NOVA OPTIČKA VLAKNA

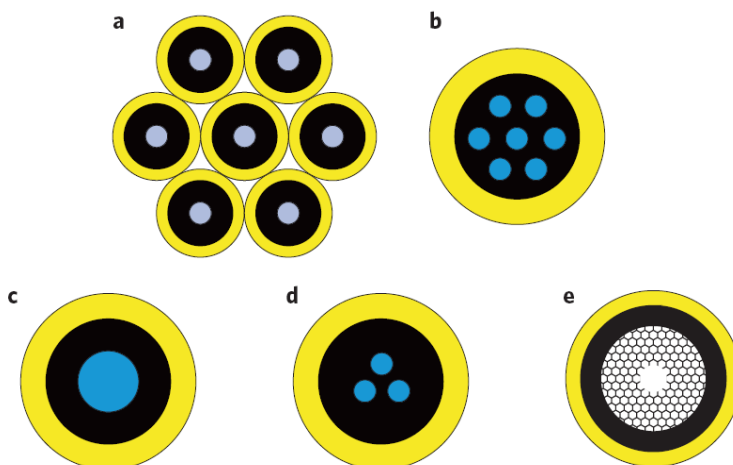
Fotonsko kristalna vlakna (FKV) (eng. *photonic crystal fibers*): Po ugledu na prirodne fotonske kristale, razvojem tehnologije, napravljene su i veštačke fotonske strukture, otvarajući novo polje u oblasti optičkih vlakana. Tipični predstavnik su fotonsko kristalna vlakna koja se nalaze u komercijalnoj upotrebi. Ova vlakna su poznata još i kao rupičava (eng. *holey fibers*) ili mikrostrukturirana vlakna (eng. *microstructured fibers*) [8-13]. Za proizvodnju FKV vlakana koriste se različiti optički materijali kao što su čist silicijum, dopiran silicijum, vazduh, razne druge vrste stakala, tečnosti, pa čak i gasovi. Na slici 4 dat je šematski prikaz osnovnih tipova fotonsko kristalnih vlakana. Jezgro fotonsko kristalnog vlakna može biti od stakla (čistog i/ili dopiranog stakla), ili šuplje (vazduh, ili neki drugi fluid). Omotač vlakna je fotonsko kristalna rešetka sastavljena od staklo-vazduh strukture, a često i od dopiranog stakla.



SLIKA 4. Različiti tipovi fotonsko kristalnih vlakana: a) fotonsko kristalno vlakno sa punim jezgrom i fotonskim kristalom kao omotačem čiji je indeks prelamanja redukovana vazдушnim šupljinama. Svetlost se prostire kroz puno jezgro; b) fotonsko kristalno vlakno sa šupljim jezgrom i omotačem koji predstavlja vazduh-staklo fotonski kristal. Svetlost se prostire kroz šuplje jezgro (vazduh); c) fotonsko kristalno vlakno sa punim jezgrom manjeg indeksa prelamanja od efektivnog indeksa prelamanja omotača, kod koga su vazdušne šupljine ispunjene materijalom većeg indeksa prelamanja u odnosu na silicijum; d) šuplje vlakno sa omotačem koji se sastoji iz više koncentrično raspoređenih cilindričnih slojeva koji čine periodičnu strukturu. Na ovim slikama su belom bojom označene vazdušne šupljine, plava boja označava silicijum, a crvena boja materijal većeg indeksa prelamanja od indeksa prelamanja čistog silicijuma, silicijum dopiran sa germanijumom [8-13].

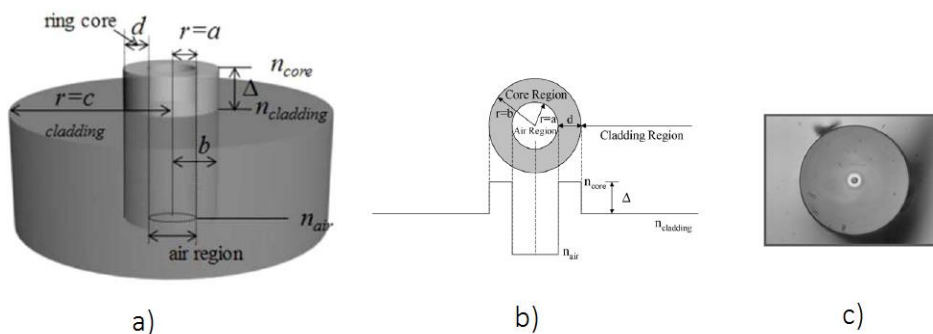
Optička vlakna sa više jezgara (eng. *multicore fibers*) [14]: Pored tehnike multipleksiranja po talasnim dužinama koja se uspešno koristi kako bi se optimizovale performanse optičkih vlakana, i dalje postoje ograničenja postojećih tehnologija, i uz stalno povećanje zahteva za količinom podataka, potrebne su nove tehnike multipleksiranja. Jedan od načina jeste prostorno multipleksiranje (eng. *Space Division Multiplexing*), tehnologija koja koristi prostornu dimenziju za istovremeno slanje različitih tokova podataka pomoću paralelnih prostorno odvojenih kanala. Prostornim multipleksiranjem koje koristi vlakna sa više jezgara i/ili multimodna vlakna, može se postići velika prenosna udaljenost i velike brzine prenosa informacija. U slučaju optičkih vlakana sa više jezgara, kod kojih prostorno razdvojene kanale

čine nizovi fizički razdvojenih jednomodnih jezgara (slika 5), najjednostavniji način da se limitira mešanje informacija između susjednih kanala se postiže dobrim razdvajanjem jezgara. Na slici 8 su prikazani različito dizajnirana optička vlakna koja se koriste kod prostornog multipleksiranja.



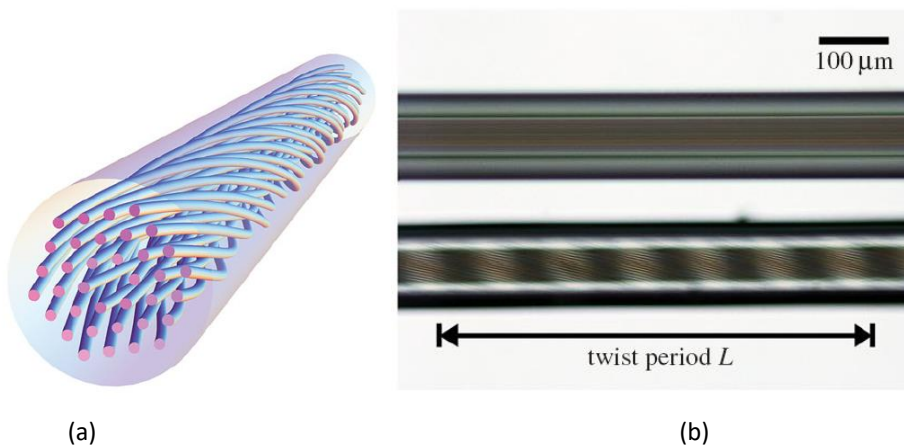
SLIKA 5. Različiti pristupi realizacije prostornog multipleksiranja. a) snopovi vlakana koji se sastoje od fizički nezavisnih jednomodnih optičkih vlakana sa nešto redukovanom debljinom omotača čime se postiže bolje pakovanje u poređenju sa optičkim kablovima; b) višejezgarana vlakna koja sadrže veći broj nezavisnih jezgara koja su dovoljno razdvojena tako da nema mešanja signala koji se prostiru kroz susjedna jezgra; c) vlakna koja podržavaju nekoliko modova (eng. *few mod fibers*) sa pogodno izabranim odnosom prečnik/numerička apertura tako da se kroz vlakno može prostirati ograničen, mali broj modova (tipično 6 – 12 nezavisnih modova, uključujući degeneraciju i polarizaciju). d) vlakna sa kuplovanim jezgrima koja podržavaju supermodove što omogućava visoku prostornu gustinu modova u poređenju sa vlaknom sa razdvojenim jezgrima; e) fotonska vlakna sa šupljim, vazdušnim jezgrom sa ultra malim nelinearnostima i potencijalno nižim gubicima u poređenju sa fotonskim vlaknom koje ima puno jezgro [6].

Šuplja vlakna (eng. *hollow fibers*): šuplje vlakno se sastoji od centralne vazdušne šupljine, $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ prstenastog jezgra, i SiO_2 omotača. Na slici 6 je prikazana struktura šupljeg vlakna sa profilom indeksa prelamanja [15].



SLIKA 6. Šuplje vlakno: a) struktura, b) indeks prelamanja, c) poprečni presek [15].

Upletena fotonsko kristalna vlakna (eng. *twisted single-solid-core PCF*) [16,17]: Ponašanje svetlosti u hiralnim strukturama je predmet velikog interesovanja i mnoge aplikacije se nalaze u različitim podpoljima fotonike. Jedna interesantna primena jeste upravo kod upletenih fotonsko kristalnih vlakana. Upleteno fotonsko vlakno se sastoji od jedne jednoosne hiralne jedinice, koja sadrži jedno ili više jezgara za vođenje svetlosti, koja se prostiru (zavrću) duž vlakna oko njegove ose (slika 7).



SLIKA 7. (a) skica upletenog fotonskog vlakna, (b) poprečni presek sa periodom L uvrtanja [16].

U svom najčešćem obliku upleteno fotonsko vlakno se sastoji od heksagonalnog niza šupljina koje se prostiru duž cele dužine vlakna debljine $100\ \mu\text{m}$. Kada je vlakno podvrgnuto uvrtnju duž celokupne svoje dužine, dobija se izgled "multiheliksa". Ova vlakna naleže primenu kao senzori istezanja i uvrtnja, strujni i magnetni senzori, telekomunikacije bazirane na orbitalnom angularnom momentu, optička pinceta, spektralni i modalni filtri i dr.

ZAKLJUČAK

Razvoj optičkih komponenti, poluprovodničkih lasera, optičkih pojačavača, optičkih vlakana, fotodetektora, multipleksera po talasnim dužinama, optičkih *add-drop* multipleksera, omogućio je novu evoluciju u optičkim komunikacijama. Dizajnirane su optičke mreše sa daleko većim kapacitetima i brzinama. Kod WDM mreža umrežavanje se svodi na optičko rutiranje po talasnim dužinama. Tokovi podataka se sastoje od mnogo kanala multipleksiranih u vremenu i pridruženih određenim talasnim dužinama koji se rutiraju kroz optičko vlakno. Transmisija svetlosti kroz optičko vlakno nosi nekoliko izazova a to su: slabljenje, hromatska i polarizaciona disperzija i nelinearnosti. Za WDM mreže koriste se jendomodna optička vlakna u trećem C (oko 1550 nm) i četvrtom L (oko 1600 nm) prozoru gde je najmanje slabljenje svetlosti. Specijalnim konstrukcijama vlakana moguće je pomeriti tačku nulte disperzije na željenu talasnu dužinu. Problemi hromatske i polarizacione disperzije rešivi su korišćenjem specijalne konstrukcije vlakana i primenom kompezacionih metoda. Veći broj korišćenih kanala može dovesti do povećanja intenziteta svetlosti a time i pojavu nelinearnih efekata. Ovi efekti se javljaju kao posledica stimulisanog Brillouinovog ili Ramanovog rasejanja, ili fluktuacije indeksa prelamanja. Mogu se pojaviti efekti sopstvene modulacije, ukrštene modulacije ili mešanja četiri talasa (eng. *four wave mixing*). Svi ovi efekti dovode do degradacije korisnog

signala. Problem stimulisanog Brillouinovog rasejanja se može ublažiti, dok stimulirano Ramanovo rasejanje nije još rešivo i može predstavljati fundamentalni ograničavajući faktor za kapacitet budućih optičkih sistema. Takođe treba napomenuti da problem preslušavanja optičkih kanala kao posledica mešanje četiri talasa, se može smanjiti smanjivanjem hromatske disperzije u celom opsegu. Upravo zbog toga su relazovana optička vlakna sa smanjenim nagibom disperzione krive u celom opsegu talasnih dužina koji je od interesa. Nelinearni efekti se mogu dodatno smanjiti dizajniranjem optičkih vlakana sa velikom efektivnom površinom, kao na primer okruženjem jezgra vlakna prstenom od materijala sa velikim indeksom prelamanja čime se smanjuje ukupna snaga optičkog signala kroz monomodna vlakna pri čemu disperzija treba da ostane i dalje kontrolisana.

LITERATURA

1. K. C. Kao and G. A. Hockhman, Dielectric-Fibre Surface Waveguides for optical frequencies, *Proc. IEE* 133, 1151-1158 (1966).
2. M. S. Kovacevic, Lj. Kuzmanovic, A. Djordjevich, Estimation of Rayleigh scattering loss in a double-clad photonic crystal fiber, *Opt. Quant. Electron* 50, 3-10 (2018).
3. W. A. Gambling, H. Matsumura, and C. M. Ragdale, Mode disperison, materila dispersion and profile dispersion in graded-index single mode fibers, *Mocrowaves, Optics and Acoustics* 3 (6) 239-246 (1979).
4. D. Glode, Dispersion in weakly guiding fibers, *Appl Optics* 10 2442-2445 (1971).
5. O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, W. Daum, POF Handbook, Sprinegr-Verlag Berlin 2008 pp.55-64.
6. D. J. Richardson, J. M. Fini, L. E. Nelson, Space-Division multiplexing in optical fibers, *Nature Photonics* 7, 354-362 (2013).
7. S. V. Kartalopoulos, DWDM Topologies, in Introduction to DWDM Technology: Data in a Rainbow, New York, USA: Wiley-IEEE Press, 2000, pp. 197-207.
8. Philip St. J. Russell, Photonic crystal fibers, *Science* 299, 258-362 (2003).
9. Jonathan C. Knight, Photonic crystal fibers, *Nature* 424, 847-851 (2003).
10. Philip St. J. Russell, Photonic-crystal fibers, *Journal of Lightwave Technology* 24, 4729-4749 (2006).
11. Arismar Cerqueira S. Jr, Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers, *Reports of progress in Physics* 73, 1-20 (2010).
12. J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, P. St. J. Russell, Photonic Band Gap Guidance in Optical Fibers, *Science* 282, 1476-2478 (1998).
13. J. C. Knight, P. St. J. Russell, New ways to guide light, *Science* 296, 276-277 (2002).
14. T. Hayashi, T. Nakanishi, Multicore optical fibers for the next generation communications, *Sei Technical Review*, 86, 23-27 (2018).
15. Kyunghwan Oh, S. Choi, Y. Jung, J. W. Lee, Novel Hollow optical fibers and their applications in photonic devices for optical communications, *J Lightwave Technology* 23 (2) 524-532 (2005).
16. P. ST. J. Russel, R. Beravat, and G. K. L. Wong, Helically twisted photonic crystal fibers, *Phil. Trans. R. Soc. A375* (2017) 20150440. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0440>
17. Y. Liu, Z. F. Zhang, H. Y. Tam, X. Tao, Multifunctional smart optical fibers: materials, fabrication, and sensing applications, *Photonics* 6, 1-24 (2019).