

Optická vlákna a 40 let jejich výzkumu v České republice

Optical fibers and 40 years of their research in the Czech republic

Ivan Kašík, Vlastimil Matějec, Miloš Hayer, Pavel Peterka, Pavel Honzátko

Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd České republiky, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 – Kobylisy, kasik@ufe.cz

Článek se zabývá optickými vlákny, především z pohledu materiálů a technologií. Připomíná českou stopu v této oblasti, která má v současné době 40letou tradici. V závěru se zabývá aktuálními trendy v oblasti výzkumu optických vláken a jejich aplikacemi ve vláknových laserech a zesilovačích.

The paper deals with optical fibers, primarily from point of view of materials and technologies of their fabrication. It is a commemoration of 40 years of Czech footprint in this field. Current trends of research of optical fibers and of their application in fiber lasers and amplifiers are finally outlined.

Úvod

Optická vlákna lze bezesporu považovat za jeden z nejvýznamnějších vědeckých nebo vědeckotechnických počinů 20. století. Jejich existence je společně s lasery základní podmínkou pro vznik Internetu, jehož uživateli je dnes většina z nás. Rychlé a spolehlivé optické sítě jsou základem moderních komunikací, e-bankovníctví, e-governmentu, e-medicíny, e-learningu, e-shopů atd.; ani příznivci mobilních sítí se bez nich neobejdou. Jejich existence stojí na vědeckých základech položených v polovině šedesátých let. V této době skupina Charlese Kuen Kao a současně nezávisle skupina s českým rodákem z Brna Erichem Spitzem nejprve teoreticky zkoumali a posléze experimentálně poprvé vyzkoušeli přenos informací po jednovidovém vlákně^[1-4]. Kao za svoji práci v tomto oboru získal v roce 2009 polovinu Nobelovy ceny.

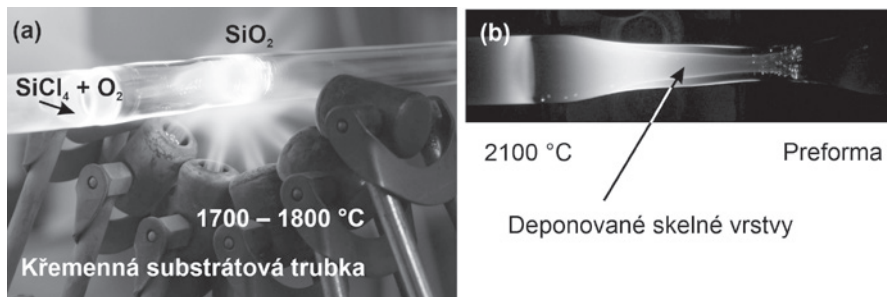
Kao předpověděl, že budoucí telekomunikační přenosy se budou odehrávat pomocí tenkých vláken z křemenného skla s vysokou transparentí v blízké infračervené oblasti. To proto, že křemenné sklo má v této části spektra okolo 1 550 nm nejnižší vlastní (tzv. intrinsické) optické ztráty a zároveň jsou zde dostupné zdroje záření. Hlavní překážkou pro využití optických vláken pro přenos na větší vzdálenosti byla čistota materiálu, tedy křemenné-

ho skla. Každé jednotlivé ppm (parts per milion, tedy 1×10^{-6} , tedy 0,0001 %) nečistot jako jsou ionty železa, mědi, niklu, chromu a také OH^- zvyšuje optické ztráty materiálu nepřijatelným způsobem a zcela degraduje jeho optické vlastnosti. To je velký problém, protože klasicky tavená skla vycházejí z látek v pevném stavu (z kmene), které je velmi obtížné resp. nemožné nebo neekonomické vyčistit na požadovanou úroveň. Proto se dlouhodobě usílí o vyčištění kmene a přípravu optických vláken z multikomponentních skel^[5] nebo nesilikátových skel propustných v infračervené oblasti nesetkalo s velkým úspěchem.

Řešením problému se nakonec ukázala příprava skel z plynné fáze, kde se výchozí suroviny dají efektivně vyčistit pomocí destilace. Jako první tuto metodu představil na 10th International Glass Congress v roce 1974 tým Johna B. McChesneyho a pojmenoval ji MCVD^[6-7] podle anglického Modified Chemical Vapor Deposition – depozice z plynné fáze. Při ní se vychází z destilovaného chloridu křemičitého (SiCl_4), který je zplyňován probubláváním nosným kyslíkem a vzniklá plynná směs je spalována při teplotách okolo 1 700–1 800 °C uvnitř substrátové trubice z křemenného skla. Z par vznikají velmi jemné vločky oxidu křemičitého

SiO_2 , které se usazují na vnitřní stěnu trubice a pohybující se hořák tak postupně protavuje vznikající tenké vrstvy do skelného stavu (obr. 1a). Každým průchodem hořáku podél rotující substrátové trubice tak na jejím vnitřním povrchu vzniká skelná vrstva SiO_2 o tloušťce zhruba 1–20 μm . Po nanese ní dostatečného počtu vrstev se trubka zahřeje na ještě vyšší teplotu okolo 2 100 °C a vlivem povrchového napětí se stáhne do tyčky – preformy pro tažení vlákna (obr. 1b).

Tento postup zajišťuje dosažení vysoké čistoty materiálu okolo osy vlnovodu (jádra budoucího vlákna), vysokou přesností geometrie připravované struktury a možnost tvarování – profilování jejího průběhu indexu lomu. Tvarování profilu indexu lomu se děje pomocí dopování vrstev tzv. dopanty, tedy sklotvornými nebo intermediárními oxidy, které mění index lomu skla. Pro zvyšování indexu lomu vrstev se používá např. oxid germaničitý GeO_2 , generovaný obdobným oxidačním způsobem z výchozího chloridu germaničitého GeCl_4 , nebo oxid fosforečný P_2O_5 generovaný např. z POCl_3 , oxid titaničitý TiO_2 generovaný z chloridu titaničitého TiCl_4 . Naopak pro snižování indexu lomu skelných vrstev se používá dopování oxidem boritým B_2O_3 generovaným z bromidu boritého BBr_3 nebo



Obr. 1 – Metoda MCVD přípravy preformy pro tažení optických vláken: (a) depozice, (b) kolabas

dopování fluorem. Vnitřní struktura (obr. 2) zajišťující vyšší index lomu jádra, což je základní podmínka pro optickou funkci vlnovodu, může mít průběh step-indexový, gradientní, jednovodový nebo jiný.

Pro skláře je to poměrně nestandardní způsob přípravy skla a může být zajímavý z několika hledisek. Umožňuje např. přípravu skel o složení, která lze jen velmi obtížně připravit klasickými způsoby. Příkladem může být binární sklo $P_2O_5-SiO_2$. Dále umožňuje přípravu tenkých vrstev uvnitř substrátu stejně tak jako objemových vzorků skla – preforem, kde se typický průměr deponovaného skla pohybuje v řádu několika milimetrů. Tenké vrstvy vzhledem ke svým rozměrům také podléhají poměrně rychlému zchlazení v řádu okolo stovek °C/s, což má dopad na oblast sklotvornosti připravovaných skel. A v neposlední řadě sklo není připravováno klasickým roztavením výchozí pevné látky, ale postupným slinováním jemných submikronových vloček, což se projevuje mírnou změnou hustoty, chemické odolnosti nebo indexu lomu výsledného materiálu. Modifikování deponovaných vrstev různými dopanty však přináší nejen změnu jejich indexu lomu, ale má dopad i na jejich tepelnou roztažnost. Vzhledem k tomu,

že roztažnost čirého křemenného skla je velmi nízká okolo $0,5 \times 10^{-6} K^{-1}$, jde o poměrně nepříjemnou záležitost, která při vyšším obsahu dopantů nad cca 10 % často vede k popraskání celé preformy. Deponované vrstvy také musí být dobře sklotvorné a mísitelné s křemenným sklem.

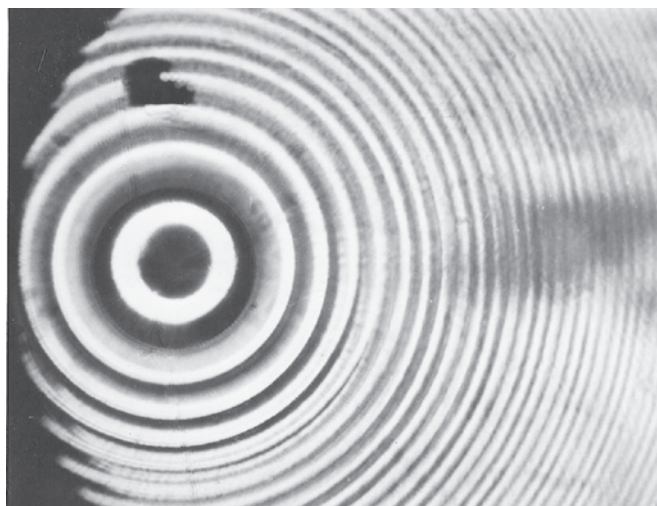
Typickým produktem přípravy MCVD, která trvá obvykle celý den, je preforma o průměru 10–30 mm a o délce 300–1 000 mm. V druhém technologickém kroku se preforma zavěsí do tažicí věže (obr. 3a), zasune do pece a po rozehrátí na teplotu cca 2 000–2 200 °C odkápnou kapky, která vlivem gravitace za sebou táhne tenké vlákno. Po odstřížení kapky se vlákno zavede do navíjecích kladek a zahájí se proces tažení. Při něm je důležité udržovat konstantní průměr vlákna. V případě telekomunikací je standardním průměrem 125 μm; obvykle se průměry optických vláken pohybují od 80 μm do 1000 μm s tolerancí do 1 μm. Průměr se měří bezkontaktně v horní části tažicí věže a hodnota se udržuje pomocí regulace rychlosti navíjení nebo regulace tažné síly. Aby vlákno nezkláhalo, musí být pokryto tenkou polymerní vrstvou, která zabraňuje přístupu vlhkosti k povrchu skla. To se zajistí průchodem vlákna přes

nanášecí trysku s monomerem a následně průchodem skrz vytvrzovací pec. Polysiloxanové nebo polyimidové polymery jsou vytvrzovány tepelně, akrylátové polymery jsou vytvrzovány UV-zářením. Tloušťka měkkých povlaků této tzv. primární ochrany je okolo 50 μm, tloušťka tvrdých povlaků se pohybuje v řádu několika mikrometrů. Důležité je, že skleněné tělo vlákna musí být pokryto rovnoměrně a kocentricky, jinak by to mělo neblahý vliv na jeho pevnost. Ta v případě telekomunikačního standardu 250/125 μm činí okolo 5 GPa, tj. srovnatelně s klasickými měděnými dráty srovnatelného průměru. Na experimentálních zařízeních se rychlost tažení pohybuje okolo 0,3 m/s (1 km/hod.), v průmyslových provozech okolo 16,7 m/s (60 km/hod).

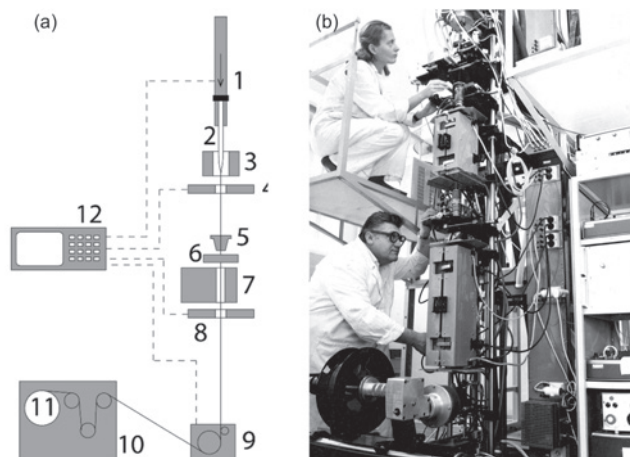
Proces tažení optických vláken má řadu kritických míst. Kromě bezkontaktního měření průměru a jeho přesné regulace je to tavení preformy v úzké horké zóně. Pro dosažení pracovních teplot 2 000–2 200 °C se používá grafitová odporová pec. Její topné elementy jsou chráněny v proudu argonu a tvarovány tak, aby horká zóna tvořila prstenec o výšce jen několika milimetrů. Pec je srdcem celé tažičky a kvalita grafitových elementů významně ovlivňuje pevnost tažených vláken.

Česká stopa

V roce 2019 uplynulo 40 let od zahájení výzkumu křemenných optických vláken v České republice, resp. v tehdejší Československu. Ten byl svěřen Společné laboratoři optických vláken Vysoké školy chemicko-technologické (Praha) a Československé akademie věd



Obr. 2 – Mikrofotografie příčného řezu vrstvenaté struktury preformy o maximálním průměru deponovaných vrstev 4 mm



Obr. 3 – Tažička optických vláken (a) schéma: 1 – podavač, 2 – preforma, 3 – grafitová pec, 4, 8 – měřiče průměru, 5 – tryska pro nanášení povlaku, 6 – monitor koncentricity; (b) Gabriela Kuncová a Rudolf Vogt pracující na tažícím zařízení (1982), Foto ČTK

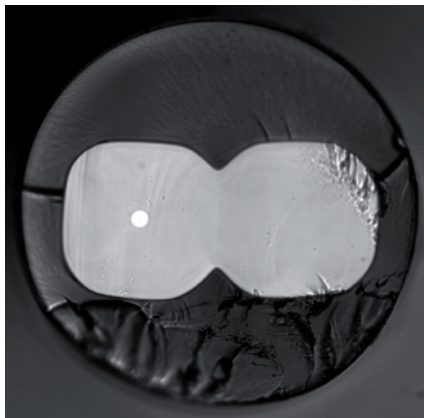
(SLS) [8-9]. Alternativně byla studována také multikomponentní skla typického složení $K_2O-As_2O_3-PbO-SiO_2$ ve Výzkumném ústavu sklářském v Hradci Králové [10]. Vedoucím SLS byl v té době Jaroslav Staněk a hlavními protagonisty vývoje křemenných optických vláken Jiří Götz společně s Milošem Hayemem. Ti přivedli postupně další členy týmu – Jaroslava Kynčla, Vítězslava Havránka, Marii Pospíšilovou, Gabrielu Kuncovou, Jaroslava Veselého a techniky Vlastu Janatkovou, Rudolfa Vogta, Karla Jiráka a Vladimíra Koláře.

Nejprve byla vypracována technologie tažení vláken typu Polymer-Clad-Silica (PCS) z optického křemenného skla pokrývaného polysiloxanovým polymerem [11]. Tažička pro tažení těchto optických vláken byla zkonstruována a vyrobena v laboratoři (obr. 3b) a jedinou součástí zakoupenou ze zahraničí byla grafitová pec Centorr, která je od roku 1982 dodnes v provozu. Technologové a konstruktéři laboratoře potom vyvíjeli vlastní zařízení pro přípravu preforem MCVD i další generace tažiček optických vláken. S jejich pomocí pak byla vyvinuta technologie přípravy gradientních vláken a posléze jednovodičových vláken založených na sklovině $GeO_2-P_2O_5-SiO_2$, jejichž ověřovací série vykazovala vlastnosti plně srovnatelné s tehdejší světovou produkcí. Vlákná byla otestována v provozu např. při veřejném optickém přenosu přes Karlův most v roce 1984 [12] a následně byly všechny technologie transferovány do poloprovozu ve Výzkumném ústavu Sklo Unionu Teplice.

Přestože výsledky poloprovozu dopadly úspěšně, bylo po politických změnách po listopadu 1989 rozhodnuto o ukončení této aktivity v Československu a vyvinutá technologie dodnes funguje ve firmě Hefibel v Turecku. Ústav skelných a keramických materiálů, který se postupně etabloval z části pracovníků SLS byl následně v roce 1993 také zrušen, nicméně částí týmu se podařilo pokračovat ve výzkumu v rámci dnešního Ústavu fotoniky a elektroniky AVČR (ÚFE) [13], Ústavu anorganické chemie AVČR a Ústavu struktury mechaniky hornin AVČR.

Aktuální trendy

V současné době jsou telekomunikační vlákna již mnoho let předmětem velikokapacitních průmyslových provozů s měřítkem stovek tisíc kilometrů vyro-



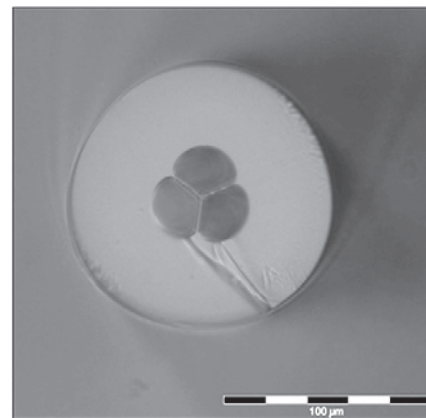
Obr. 4 – Dvouplášťové vlákno typu stadion o rozměrech 120x240 μm aplikované pro efektivní navazování čerpacího výkonu erbium-ysterbiového vláknového laseru

bených ročně a s nízkou přidanou hodnotou, které jsou soustředěné v rukou několika světových výrobců. Z hlediska výzkumu i z hlediska finančního jsou však podstatně zajímavější vlákna speciální [14]. Ta se odlišují různými složeními jádra nebo strukturou specifickými pro daný účel použití vlákná.

První vyvíjená speciální vlákna byla dopovaná ionty erbia a používala se pro optické zesilování na vlnové délce 1,55 μm v telekomunikacích [15]. Při jejich přípravě se však objevila zásadní překážka, kterou je fázová separace křemenného skla dopovaného již pouhými několika stovkami ppm iontů prvků vzácných zemin. Ta zcela degraduje optické vlastnosti vláken a tak bylo nutné najít vhodný, nejlépe sklotvorný, oxid, který by zvýšil rozpustnost těchto iontů v křemenném skle. Pro ysterbiové vláknové lasery, které pracují v oblasti okolo 1.06 μm , se ukázal jako ideální dopant oxid fosforečný P_2O_5 přítomný ve skle v rozmezí cca 5–10 mol%, který má zároveň příznivý vliv na index lomu optického jádra.

Samotná rozpustnost iontů vzácných zemin není však jediným aspektem. Vlákná s jádrem $P_2O_5-SiO_2$ se ukázala jako zcela nevhodná pro dopování ionty thulia nebo holmia, kterým přítomnost P_2O_5 významně zkracuje fluorescenční dobu života emise okolo 1,9–2,1 μm resp. okolo 2,2 μm . Proto jsou thuliová (holmiová) vlákna pro vláknové lasery dopovaná v jádře oxidem hliníťným Al_2O_3 , který nejenže zabraňuje fázové separaci, ale také příznivě zvyšuje index lomu skloviny a prodlužuje fluorescenční dobu života thuliových (holmiových) iontů.

Pro získání všech těchto materiálů bylo zapotřebí soustavně vyvíjet technologické postupy i teoretické mode-



Obr. 5 – Příklad mikrostrukturního křemenného vlákna typu „steering wheel“ o vnějším průměru 125 μm

lování [16]. Postupně byla vypracována technologie dopování preforem z roztoku [17] a metoda dopování pomocí nanočástic, která byla světově poprvé prezentována na konferenci IEEE v roce 2007. Umožňuje dosažení vyšších koncentrací Al_2O_3 a tedy i iontů vzácných zemin v jádře vlákna, vede k prodloužení jejich fluorescenční doby života, celkově pozitivně ovlivňuje vlastnosti thuliových a holmiových vláknových laserů a usnadňuje celý postup přípravy vláken [18–20]. Kromě příslušného dopantu jako zdroje fluorescence je důležitá také struktura vlákna. Pro dosažení velkého výkonu vláknových laserů se používají často tzv. dvouplášťová vlákna, která se vyznačují nekruhovou symetrií, jak je to patrné z obr. 4. Jejich průřezy mívají různý tvar, např. hexagonální, obdélníkový, tvaru písmene D apod. Vláknové lasery založené na těchto speciálních vláknách dnes nacházejí široké možnosti uplatnění od delikátních aplikací s nízkým výkonem v metrologii, diagnostice, spektroskopii, telekomunikacích až po poskytování hrubé síly při řezání, tváření či sváření kovů.

Vedle vláken dopovaných ionty vzácných zemin je aktuálně pozornost věnována ve světě i doma výzkumu vláken pro přenos a případně i generaci světla v infračervené oblasti dále za hranou propustnosti křemenného skla okolo 2,2 μm . Toho lze dosáhnout dvěma způsoby. Jádro vlákna může být vyrobeno z materiálu transparentního v infračervené oblasti, jako např. z As_2S_3 , GeO_2 , chalkogenního nebo fluoridového skla [21]. Nebo je jádro vlákna tvořeno dutinou, ve které se v určité části spektra šíří infračervené záření a která je obklopena „pavučinou“ o přesné geometrii, jejíž geometrické

uspořádání předurčuje optické ztráty a spektrální oblast transparence vlákn. Během posledních dvou dekád byla vyvinuta řada typů takových tzv. mikrostrukturálních vláken (obr. 5) založených na křemenných, silikátových nebo chalkogenních sklech.

V každém katalogu optických komponent lze najít několik stránek nabídky optických vláken. Příkladem mohou být třeba fotosensitivní vlákna dopovaná oxidem antimonitým nebo oxidem cíničitým a řada dalších. Výběr vždy záleží na způsobu a účelu použití optického vlákna a je docela složitou záležitostí. V oblasti telekomunikačních vláken je dnes globální trh zhru-

ba vyvážen a Čína na něm dosáhla své soběstačnosti. Naopak speciální vlákna jsou oblastí natolik pestrá, že jde stále o lákavou příležitost jak k výzkumu, tak k produkci malých obchodně zajímavých sérií.

Závěr

Od doby prvního článku Charlese K. Kao na téma optických vláken, který vedl k udělení Nobelovy ceny autorovi v roce 2009, uběhlo právě 55 let. Neustále se však objevují stále nové nápady, které posunují poznání v této oblasti neustále vpřed do neprobádaných oblastí a aplikací. Jde tedy o záležitost mimořádně

životaschopnou, stále aktuální a perspektivní. Téma v podobě materiálů pro fotoniku dnes tvoří podstatnou část mezinárodních konferencí a kongresů ICG; poněkud nepochopitelně však nedávno zmizelo z klíčových slov panelů grantových agentur v ČR. Výzkum optických vláken je totiž celosvětově jednoznačně prestižní záležitostí poukazující na vyspělost dané ekonomiky a je milé, že v Česká republika z tohoto pohledu stále patří mezi špičku.

Poděkování

Autoři by rádi poděkovali týmu současných i bývalých spolupracovníků za podporu a soustavnou práci pro rozvoji oboru.

LITERATURA

- 1] Kao K.C., Hockham G.A.: Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies, in proc. of the Institution of Electrical Engineers, Part J, Optoelectronics 113 (1966), s. 1151-1158.
- 2] Heff J.: City of Light The Story of Optical Fibres, Oxford University Press, New York (2004).
- 3] Spitz E.: Some original ideas and coherent light experiments during the sixties at the central research laboratory of CSF CO (later Thomson-CSF, today Thales), invited lecture, in proc. Workshop Optical Fiber Technology, SPIE Optics Optoelectronics on 2. 4. 2019, Praha (2019).
- 4] Werts, A.: Propagation de la lumiere coherente dans les fibres optiques (Propagation of coherent light in optical fibers), L'Onde Electrique 46 (1966), s. 967-980.
- 5] Beales K.J., Duncan W.J., Newns G.R.: Sodium borosilicate glass for optical fiber, in proc. 1st ECOC, London (1975), s. 27-29.
- 6] McChesney J.B., O'Connor P.B., Presby H.M.: A new technique for preparation of low-loss and graded index optical fibers, in proc. of the IEEE, 62 (1974), s. 1278-1279.
- 7] Nagel S.R., McChesney J.B., Walker K.L.: An overview on the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) process and performance, IEEE Journal of Quantum Electronics, QE-18 (1982), s. 459-476.
- 8] Gotz J., Od SLS k ÚCHSM - více než 25 let základního výzkumu silikátů v Československé akademii věd, Sklář a keramik, 3 (1989), s.65-67.
- 9] Kašík I., Matějec V., Trkal V., Ležal D.: Dvě desetiletí výzkumu optických křemenných vláken, Sklář a keramik, 45 (8-9) (1995), 185-188.
- 10] Haladej L.: Multicomponent glasses for waveguides of high numerical aperture, Project report SVUS (1990).
- 11] Schatz S., Hayer M., Kuncova G., Matejec V., Hrabalova M.: Influence of drawing proces on tensile strenght of PCS optical fibers, Proc. 4th Optical communications, Prague (1982), s. 33-35.
- 12] Matějec V., Kašík I., Hayer M.: 40 let výzkumu technologie přípravy optických vláken v Československu - počátky 1979-1993, Jemná mechanika a optika 63 (11-12) (2019), s. 377-384.
- 13] Peterka P., Zavadil J.: 60 let světla v Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, Jemná mechanika a optika 60 (5-6) (2015), s. 200-203. Errata - 1. čs. maser, Jemná mechanika a optika 62 (1), 35 (2017).
- 14] Mendez A, Morse T.F.: Specialty optical fibers handbook, Academic Press, 2007.
- 15] Lin J.T., Kaňka J., Dong L., Mc.Stay D., Rogers A.J.: A simultaneously Q-switched and mode-locked fibre laser, in proc. Tech. Digest of the European Quantum Electronics Conference on 27-30. 8. 1991, Edinburgh (1991).
- 16] Peterka P., Kašík I., Dhar A., Dussardier B., Blanc W.: Theoretical modeling of fiber laser at 810 nm based on thulium-doped silica fibers with enhanced 3H4 level lifetime, Optics Express 19 (2011), s. 2773-2781.
- 17] Sysala O., Kasík I., Spejtkova I.: Preparation of preforms and optical fibres containing aluminum by the solution-doping method, Ceramics-Silikaty, 35 (4) (1991), s. 363-367.
- 18] Podrazký O., Kašík I., Pospíšilová M., Matějec V.: Use of alumina nanoparticles for preparation of erbium-doped fibers, 2007 IEEE Leos Annual Meeting Conference Proceedings 1-2 (2007), s. 246-247.
- 19] Podrazký O., Kašík I., Pospíšilová M., Matějec V.: Use of nanoparticles for preparation of rare-earth doped silica fibers, Physica Status Solidi C - Current Topics In Solid State Physics 6 (2009), s. 2228-2230.
- 20] Kamrádek M., Kašík I., Aubrecht J., Mrázek J., Podrazký O., Cajzl J., Vařák P., Kubeček V.: Ceramic nanoparticle-doping implementation into MCVD method for fabrication of holmium-doped fibers for fiber lasers, IEEE Photonics Journal 11 (5) (2019), s. 1-10.
- 21] Kasík I., Matejec V., Hayer M., Kamradek M., Podrazky O., Mrazek J., Peterka P., Honzatkó P.: Glass materials for optical fibers, Ceramics-Silikaty 64 (1) (2020), s. 29-354.

Lektor: Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.