

4

2010

JMO

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA
FINE MECHANICS AND OPTICS

ÚSTAV FOTONIKY A ELEKTRONIKY AKADEMIE VĚD ČR, v.v.i.
INSTITUTE OF PHOTONICS AND ELECTRONICS AS CR, v.v.i.



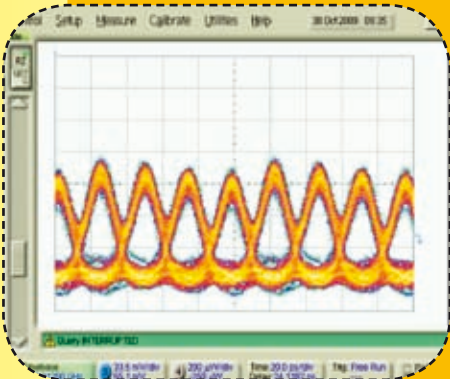
www.uře.cz

CHABERSKÁ 57, 182 51 PRAHA 8 - KOBYLISY



Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i.

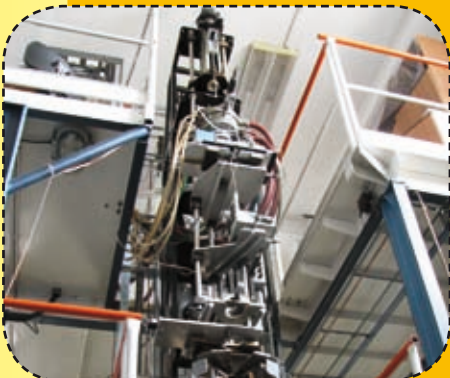
Institute of Photonics
and Electronics AS CR, v.v.i.



ELEKTRONICKÉ SIGNÁLY A SYSTÉMY

Analýza a syntéza řeči

Státní etalon času a frekvence



FOTONIKA

Vlnovodná fotonika

plně optické zpracování informace v optických vláknech

vláknové ramanovské a parametrické zesilovače

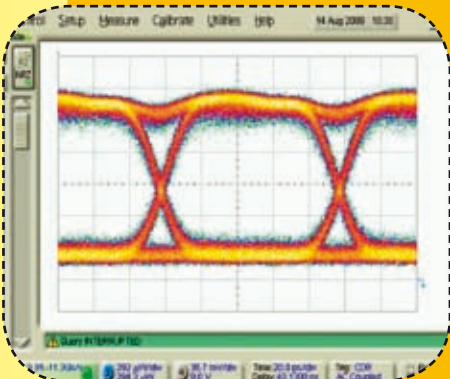
vláknové lasery

integrovaná fotonika

Optické senzory

senzory založené na povrchové plasmonové rezonanci

vláknové senzory založené na evanescentní vlně



Technologie optických vláken

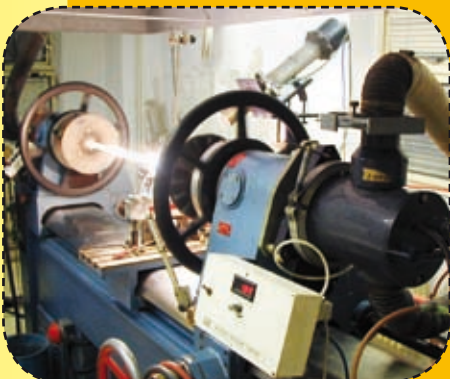
materiálový výzkum přípravy preforem

depozice z plynné fáze

sol-gel metody

tažení vláken z oxidických a neoxidických skel

mikrostrukturální vlákna



OPTOELEKTRONICKÉ MATERIÁLY

Technologie

Charakterizace



REDAKČNÍ RADA

Předseda: RNDr. Miloslav VYCHODIL, CSc., Meopta-optika, s.r.o., Přerov

Členové: RNDr. Ing. Ján BARTL, CSc., ÚM SAV, Bratislava, prof. RNDr. Dr. Zdeněk BOUCHAL, UP, Olomouc, Ing. Igor BREZINA, Bratislava, prof. Ing. Pavol HORŇÁK, DrSc., STU, Bratislava, prof. RNDr. Miroslav HRABOVSKÝ, DrSc., SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, RNDr. Vladimír CHLUP, Olomouc, RNDr. Lubomír JASTRABÍK, CSc., FZÚ AV ČR, v.v.i., Praha, RNDr. Pavel KLENOVSKÝ, Český metrologický institut, Brno, Ing. Jiří KRŠEK, VUT, Brno, doc. RNDr. Vojtěch KŘESÁLEK, CSc., UTB, Zlín, Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno, prof. RNDr. Bohumila LENCOVÁ, CSc., ÚPT AV ČR, v.v.i., Brno, prof. Ing. Martin LIBRA, CSc., ČZU, PRAHA, prof. RNDr. Miroslav LIŠKA, DrSc., VUT, Brno, RNDr. Zdeněk LOŠŤÁK, Meopta-optika, s.r.o., Přerov, prof. Ing. Petr LOUDA, CSc., TU, Liberec, RNDr. František MÁČA, CSc., FZÚ AV ČR, v.v.i., Praha, doc. RNDr. Miroslav MILER, DrSc., ÚFE AV ČR, v.v.i., Praha, prof. RNDr. Jan PEŘINA, DrSc., UP, Olomouc, prof. Ing. Jaromír PIŠTORA, CSc., VŠB - TU, Ostrava, prof. RNDr. Ing. Jaroslav POSPÍŠIL, DrSc., UP, Olomouc, RNDr. Dagmar SENDERÁKOVÁ, Ph.D., UK, Bratislava, RNDr. Petr SCHOVÁNEK, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, prof. Ing. Karel STUDENOVSKÝ, DrSc., ČVUT, Praha, prof. RNDr. Anton ŠTRBA, CSc., UK, Bratislava

Gerd HÄUSLER, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen - Nürnberg, Erlangen (Germany), Michael J. LALOR, Liverpool John Moores University, U. K.; Paul RAUSNITZ, TCI New York, U. S. A.; Rodney J. SOUKUP, University of Nebraska-Lincoln, U. S. A.; M. C. TEICH, Boston University, U. S. A.; Emil WOLF, University of Rochester, U. S. A.

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

Vydává Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, v.v.i. za spoluúčasti The International Society for Optical Engineering (SPIE/CS) v Nakladatelství Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, v.v.i.

Ředitel FZÚ AV ČR, v.v.i.: doc. Jan ŘÍDKÝ, CSc.

Odpovědný zástupce vydavatele: prof. RNDr. Miroslav HRABOVSKÝ, DrSc.

Šéfredaktor: dipl. tech. Jaroslav NEVŘALA

Adresa redakce v Olomouci (předplatné, nakladatelské služby):

SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 631 576, fax: 585 631 531, e-mail: eva.pelcova@upol.cz

Adresa redakce v Přerově (šéfredaktor): Kabelíkova 1, 750 02 Přerov, tel.: 581 242 151, mobil: 776 011 925, fax: 581 242 222.

Otisk povolen se svolením redakce a se zachováním autorských práv. Nevyžádané materiály se nevrací. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři.

Vychází: 10x ročně (z toho 2 čísla jako dvojčísla)

Předplatné: Celoroční 420,- Kč/rok. Ceny jsou jednotné pro Československou republiku. Do všech ostatních zemí je časopis JMO distribuován za jednotnou cenu 10 EUR/ks. Pro členy SPIE/CS činí předplatné 120,- Kč/rok. Předplatné pro studenty Bc., Mgr., Ph.D. a studenty středních škol při osobním odběru činí 120 Kč/rok; v případě zaslání poštou 300,- Kč/rok.

Rozšiřuje vydavatel a Podniková prodejna Meopta-optika, s.r.o., Přerov, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov.

V Slovenské republice je kontaktní místo: prof. RNDr. Anton Štrba, CSc., katedra experimentální fyziky FMFI UK, Mlynská dolina F2/148, SK - 842 48 Bratislava, tel.: 00421 2 65 426 706, e-mail: Strba@fmph.uniba.sk

V Slovenské republice rozšiřuje a objednávky přijímá:

prof. Ing. Ivo Čáp, CSc., Žilinská univerzita - FPV, Hurbanova 15, SK - 010 26 Žilina, tel.: +421 415 136 350, e-mail: ivo.cap@fpv.utc.sk

Tiskne TYPOservis Holešov, Masarykova 650, 769 01 Holešov, tel.: 573 398 746, e-mail: dtp@typoservis.cz

Inzerce: redakce, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov, tel.: 581 242 151, mobil: 776 011 925, fax: 581 242 222.

Odborné články jsou lektorovány.

© JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA 2010

JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS
ROČNÍK 55 4/2010

OBSAH

Na úvod tohoto čísla (M. Miler).....	95
Amper 2010	95
Nobelova cena za fyziku za rok 2009 (M. Miler, P. Honzátko).....	96
Vláknová optika v Ústavu fotoniky a elektroniky (V. Matějec).....	99
Nové trendy v přípravě preforem metodou MCVD (I. Kašík, V. Matějec, O. Podrazký, P. Peterka, J. Mrázek).....	102
Tažení optických vláken v Ústavu fotoniky a elektroniky (V. Matějec, O. Podrazký, J. Mrázek, P. Peterka, M. Hayer).....	107
Zúžená optická vlákna (T. Martan)	111
Vláknové lasery – principy a aplikace (P. Peterka, P. Honzátko, M. Karásek, J. Kaňka, I. Kašík, V. Matějec)	115
Plně optické zpracování datových toků P. Honzátko, M. Karásek).....	121
Historie, stav a perspektivy optického sdělování v České republice (A. Kuchar)	124
LASER World of PHOTONICS CHINA 2010	128
Rozhovor s jubilem doc. RNDr. Miroslavem Milerem, DrSc.	129
Z technické knihovny (P. Novák).....	131
AUTOMATICA	131

Bližší informace o poslání časopisu, pokyny pro autory, obsah časopisu apod. je uveden na internetu: <http://jmo.fzu.cz/>

Informace o předplatném podá, objednávky přijímá, objednávky do zahraničí vyřizuje: SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 223 936, fax: 585 631 531.

Cena čísla 40 Kč včetně DPH

ADVISORY BOARD

Chairman: Miloslav VYCHODIL - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.)

Members: Ján BARTL - Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Zdeněk BOUCHAL - Palacky Univ. (Czech Rep.), Igor BREZINA - Bratislava (Slovak Rep.), Pavol HORNÁK - Slovak Tech. Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav HRABOVSKÝ - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Vladimír CHLUP - Olomouc (Czech Rep.), Lubomír JASTRABÍK - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Pavel KLENOVSKÝ - Czech Metrology Inst., Brno (Czech Rep.), Jiří KRŠEK - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Vojtěch KŘESÁLEK - Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno (Czech Rep.), Bohumila LENCOVÁ - Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Science, Brno (Czech Rep.), Martin LIBRA - Czech Univ. of Agric. Praha (Czech Rep.), Miroslav LIŠKA - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Zdeněk LOŠŤÁK - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Petr LOUDA - Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), František MÁČA, Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Miroslav MILER - Inst. of Photonics and Electronics of Academy of Sciences, v.v.i., Praha (Czech Rep.) Jan PEŘINA - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Jaromír PIŠTORA - Tech. Univ., Ostrava (Czech Rep.), Jaroslav POSPÍŠIL - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Dagmar SENDERÁKOVÁ - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Petr SCHOVÁNEK - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Karel STUĐENOVSKÝ - Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Anton ŠTRBA - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.),

Gerd HÄUSLER, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen - Nürnberg, Erlangen (Germany), Michael J. LALOR, Liverpool John Moores University, U. K.; Paul RAUSNITZ, TCI New York, U. S. A.; Rodney J. SOUKUP, University of Nebraska-Lincoln, U. S. A.; M. C. TEICH, Boston University, U. S. A.; Emil WOLF, University of Rochester, U. S. A.

FINE MECHANICS AND OPTICS

Published by Institute of Physics Academy of Sciences of the Czech Republic under participation of The International Society for Optical Engineering (SPIE/CS) in the Publishing House of the Institute of Physics of the Academy of Sciences of the Czech Republic.

Director of Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic: Jan ŘÍDKÝ

Editor: Miroslav HRABOVSKÝ

Managing Editor: Jaroslav NEVŘALA

Address of the Editor's office in Olomouc (subscription, publisher services): SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, Czech Republic, phone: ++420 585 631 576, fax: ++420 585 631 531, e-mail: eva.pelclova@upol.cz

Address of the Editor's office in Přerov (Managing Editor): Kabelíkova 1, 750 02 Přerov, Czech Republic.

Reproduction only with permission of the Editor and under observing the copyright. Unasked manuscripts are not sent back. The authors are responsible for originality and correctness of their contributions.

Subscription fee: Annual fee is 420,- CZK. This price of subscription is the same for both Czech and Slovak Republics. Fine Mechanics and Optics journal is distributed into other countries for uniform price 10 EUR/Pcs. For members of SPIE/CS the annual subscription fee is 120,- CZK. For Bc., Mgr., Ph.D. and secondary school students the subscription fee is 120,- CZK per year, annual subscription including postage is 300,- CZK.

Distribution: by the Publisher, Company Sales shop of Meopta-optika, s.r.o., Přerov, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov, Czech Republic.

Contact place for the Slovak Republic: Anton Štrba, Department of Experimental Physics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Mlynská dolina F2/148, SK - 842 15 Bratislava, phone: 00421 2 65 426 706, e-mail: strba@fmph.uniba.sk

Printing: TYPOServis Holešov, Masarykova 650, CZ-769 01 Holešov, phone: 573 398 746 (from abroad: ++420 573 398 746). e-mail: dtp@typoservis.cz

Advertising: editor's office, Kabelíkova 1, CZ-750 02 Přerov, fax: 581 242 222.

Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2010

FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL

VOLUME 55

4/2010

CONTENTS

Introduction to this issue (M. Miler).....	95
Amper 2010	95
The Nobel Prize in Physics 2009 (M. Miler, P. Honzátko).....	96
Fiber optics at the Institute of Photonics and Electronics (V. Matějec)	99
New trends in preparation of preforms by the MCVD method (I. Kašík, V. Matějec, O. Podrazký, P. Peterka, J. Mrázek).....	102
Drawing of optical fibers at the Institute of Photonics and Electronics (V. Matějec, O. Podrazký, J. Mrázek, P. Peterka, M. Hayer).....	107
Tapered optical fibres (T. Martan).....	111
Fibre lasers - principles and applications (P. Peterka, P. Honzátko, M. Karásek, J. Kaňka, I. Kašík, V. Matějec)	115
All optical processing of data streams P. Honzátko, M. Karásek).....	121
Past, present of and prospects for optical communications in the Czech Republic (A. Kuchar)	124
LASER World of PHOTONICS CHINA 2010	128
Interview with doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc.	129
From technical library (P. Novák)	131
AUTOMATICA	131

For further information about the journal intention, instructions for authors, contents etc. please refer to <http://jmo.fzu.cz/>

Information on subscription rate and on ordering gives the SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 223 936, fax: 585 631 531.

Price for single copy: 40 Kč incl. VAT

Na úvod tohoto čísla

Na zasedání redakční rady časopisu *Jemná mechanika a optika* na podzim loňského roku byl jako obvykle na program výhled zaměřen obsah v některých nejbližších číslech. V té době byla už známa jména nových laureátů Nobelovy ceny za fyziku. Protože tito laureáti dostali cenu za práce související s optikou, byla hledána cesta, jak toho využít v časopise. Musel jsem se hlásit k tomu, že Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd České republiky, ve kterém jsem strávil valnou část svého života (většinu této doby nesl v názvu místo slova fotonika slovo radiotechnika), má vztah k druhé polovině ceny, kterou dostal Charles Kuen Kao za průkopnické práce při vzniku oboru sdělování pomocí optických vláken. V ústavu se značná část pracovníků zabývá a zabývala úkoly těsně souvisejícími s touto problematikou. Bylo rozhodnuto věnovat jedno číslo časopisu tomuto ústavu právě v této souvislosti a za nejbližší možné číslo bylo zvoleno číslo dubnové 2010.

První úvodní článek se soustřeďuje právě na udělení Nobelovy ceny Ch. K. Kaovi za průlomové práce týkající se přenosu světla ve vláknech pro optické sdělování. Je charakterizována jeho publikace, která stála v základech vláknového optického sdělování, dále je naznačen stručný běh života laureáta a největší část článku je zaměřena na vědecké zdůvodnění udělení Nobelovy ceny. Tato poslední část je z velké části převzata z elaborátu, který vydala Nobelova nadace, a jsou v ní podány základní údaje z teorie sdělovacích vláken.

V druhém úvodním článku je dáno slovo řediteli ústavu Ing. Vlastimilu Matějčovi, CSc., který je dlouholetým pracovníkem oboru a vedl oddělení zabývající se problematikou přípravy a charakterizace sdělovacích a jiných vláken. V tomto článku o vláknové optice ředitel shrnuje práce ve třicetiletém výzkumu přípravy a charakterizace optických vláken jednak v Ústavu chemie skelných a keramických materiálů ČSAV a jednak v Ústavu radiotechniky a elektroniky ČSAV a později AV ČR, který dnes nese název Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR. Je nutno poznamenat, že podíl radiotechniky na zaměření ústavu se během let neustále snižoval. Na její úkor se zvětšoval podíl optických a fotonických problematik, jako byl výzkum a postavení plynových a pevnolátkových laserů, laserové optické sdělování ve volném prostoru, holografie a její různé aplikace jako byla holografická interferometrie a difrakční mřížky, planární vlnovodná optika a integrovaná optika, zmíněné vláknové optické sdělování a vývoj metod měření pro tento obor, optická senzorka atd. V článku autor rozděluje období na první část v předchozím ústavu, kdy v okruhu zájmu byla sdělovací vlákna, a druhou část v dnešním ústavu, kdy se práce týkají různých typů speciálních vláken.

Následují další odborné články, které souvisejí s mimořádným zaměřením tohoto čísla.

Miroslav Miler

Kontakt: doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc., Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8-Kobylisy, tel.: 266 773 454, e-mail: miler@ufe.cz

AMPER 2010

Terinvest představil 18. mezinárodní ročník AMPER 2010, který se uskutečnil od 13. do 16. 4. 2010 v areálu PVA Letňany Praha. Na veletrhu se představilo na 670 firem z 21 zemí celého světa na čisté výstavní ploše přesahující 15 000 m².

Novinkou byl vznik nových suplementů, veletrhu **COMTEC** – 1. ročníku veletrhu komunikačních technologií, a veletrhu **OPTONIKA** – 1. ročníku veletrhu optických technologií a aplikací.



Nobelova cena za fyziku za rok 2009

Nobelova cena za fyziku byla v minulém roce 2009 udělena z jedné poloviny Charlesi K. Kaovi a z druhé poloviny Willardu S. Boylemu a Georgovi E. Smithovi. Je to po pouhých čtyřech letech další Nobelova cena udělená za činnost spojenou s optikou. Připomeňme si, že to v r. 2005 byli Roy J. Glauber, John L. Hall a Theodor W. Hänsch. Jedna polovina ceny byla tehdy udělena prvnímu z nich za příspěvek ke kvantové teorii optické koherence a druhá polovina zbylým dvěma za jejich příspěvky k vývoji přesné spektroskopie založené na laserovém záření, včetně metody optického kmitočtového hřebenu.

Profesor Charles Kuen Kao obdržel cenu za průlomové úspěchy týkající se přenosu světla ve vláknech pro optické sdělování. Druhá polovina ceny byla udělena za vynález zobrazovacího polovodičového obvodu - snímače CCD. Jeden i druhý předmět ceny se staly základy obrovských průmyslových odvětví, která se nebývale rychle rozvíjela a jejich produkty dnes tvoří neodmyslitelnou součást života.

1. PUBLIKACE ZAHAJUJÍCÍ OBOR VLÁKNOVÉHO OPTICKÉHO SDĚLOVÁNÍ

I když obě poloviny ceny mají své místo v optice, budeme se na těchto stránkách věnovat pouze první části ceny. Ch. Kao je nejmladší ze všech tří laureátů, ale práce, na kterých je jeho Nobelova cena založena, jsou naopak o něco starší, než zbylých dvou. Všechny prameny související s udělením této Nobelovy ceny se odvolávají na publikaci „Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies - Dielektrické vláknové optické povrchové vlnovody pro optické kmitočty“, kterou nositel publikoval spolu s Georgem A. Hockhamem v časopise Proceedings IEE v r. 1966 str. 1151-8 za svého působení ve výzkumu Standard Telecommunication Laboratories Ltd. (nyní je vlastníkem Nortel) ve Velké Británii. Je vidět, že i takový „nenápadný“ časopis může ukrývat převratné myšlenky, což je zvláště dnes hodno pozornosti, kdy se jen publikacím ve „vysoce prestižních“ časopisech, jako je např. Nature, přikládá vysoké hodnocení.

V uvedeném publikaci autoři uvádějí, že dielektrické vlákno představuje možné prostředí pro vedení přenosu energie pro optické kmitočty. Vhodný typ dielektrického vláknového vlnovodu má kruhový průřez. Jádru má nepatrně (asi o 1 %) vyšší index lomu než okolní plášť. Průměr jádra má být srovnatelný s vlnovou délkou přenášeného světla, průměr pláště má být stonásobkem vlnové délky. Tento druh vlnovodu má operovat s jednoduchým HE_{11} videm a jeho přenosová kapacita má být větší než 1 GHz. Má být ohebný a dovolovat výrobní tolerance kolem 10 %. Až o takových „detailech“ uvažoval tehdy dnešní laureát. Autoři dále uvedli, že při vysoké přenosové kapacitě je diskutovaný typ vlnovodu ekonomicky výhodnější než koaxiální kabely a radiové systémy. Kao vytipoval jako vhodný materiál tavený křemen. Z uvedeného přehledu článku je zřejmé, že už v něm bylo poukázáno na většinu charakteristik vláknových vlnovodů a pozdější práce „pouze“ prohlubovaly poznání o nich.

Realizace úspěšného vláknového vlnovodu tehdy ovšem závisela na dostupnosti vhodného nízkoztrátového dielektrického materiálu. Autoři v článku rozebírají spektrální útlum ve skle, v taveném křemenu a polymethylmetakrylátu v rozsahu vlnových délek mezi 500 nm a 1100 nm. U skla se útlum pohyboval mezi 4-8 dB/m, u polymethylmetakrylátu kolem 3 dB/m a u taveného křemene byl hrubý odhad mezi 0,2-1,2 dB/m pro vlnové délky do 800 nm. Zkoumají také vazební ztráty mezi dvěma vlákny s imerzní kapičkou mezi nimi.



Obr. 1 Profesor Charles Kuen Kao dnes

2. STRUČNÝ BĚH ŽIVOTA PROF. CH. K. KAOA

Charles Kuen Kao se narodil 4. 11. 1933 v Šanghaji. Vystudoval elektroniku na britské Wolwich Polytechnic a doktorský titul získal na University of London v r. 1965. Ve Standard Telecommunication Laboratories pracoval již souběžně při doktorském studiu a pak až do r. 1970. V r. 1970 nastoupil na místo prvního profesora elektroniky na The Chinese University of Hong Kong - CUHK, kde se pro něj ustavilo oddělení elektronického inženýrství. V r. 1985 mu tato univerzita udělila hodnost doctor honoris causa. V letech 1987-96 vedl univerzitu jako vicekancléř. Bylo to období velkého rozmachu.

Na internetových stránkách hongkongské univerzity je laureátovi věnován velký prostor. Je tam také umístěno jeho 17 medailí získaných z různých končin světa. V r. 1985 obdržel Marconioho cenu (Marconi International Scientist Award), která je široce chápána jako „Nobelova cena“ za elektroinženýrství. Spojené království mu udělilo Faradayovu medaili. Od Japonska dostal v r. 1996 tzv. Dvanáctou japonskou cenu (12th Japan Prize). Laureát je v materiálech univerzity titulován jako „Otec vláknové optiky“, protože je tak znám po celém světě. Podle jeho slov byl velmi překvapen, že Nobelova nadace udělila cenu aplikovanému oboru, což je zcela výjimečné.

Čínská akademie věd ho zvolila v r. 1996 svým akademikem. V témž roce byla pojmenována na základě návrhu observatoře ČAV v Nanjingu (Purple Mountain Observatory) jedna z planetek názvem Kaokuen.

V r. 1980 zakládal Ralf Th. Kersten evropský časopis Journal of Optical Communications, jako první vědecký časopis s touto tematikou. Zakladatel se dnes pyšní tím, že do redakční rady tehdy povolal také Ch. K. Kaoa, jak uvedl v letošním třetím čísle tohoto časopisu. Tehdy mezi léty 1974 a 1987 Kao působil ve Spojených státech jako vedoucí vědecký pracovník a posléze i vice-president a technický ředitel v Electro-Optical Products Division ITT v Roanoke (stát Virginia). V 1983-7 byl výkonným vědeckým pracovníkem a ředitelem výzkumu v Advanced Tech Center ITT v Sheltonu (stát Connecticut).

Nejlépe jsou údaje o jeho profesní kariéře shromážděny na stránkách The Science and Technology Foundation of Japan (http://www.japanprize.jp/en/prize_prof_1996_kao.html). Odtud je také zřejmé, že Kao nebyl z těch, kteří publikují stovky prací. V uvedených stránkách je shromážděno pouze 12 titulů jako „Major Books and Academic Papers“. Z toho 4 jsou z období těsně po jeho základní práci. Pozdější publikace jsou většinou více méně shrnujícího typu. V IEE Proceedings publikoval znova až po 20 letech, v r. 1986.

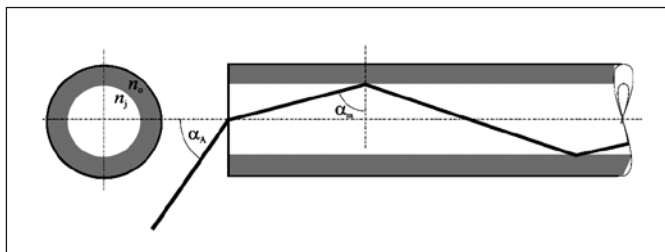
Kao má také britské a americké občanství. V současné době na něho doléhá Alzheimerova choroba, proto jeho nobelovskou přednášku četla jeho žena.

3. VĚDECKÉ ZDŮVODNĚNÍ UDĚLENÍ NOBELOVY CENY

Při každém udělování Nobelovy ceny uvádí Nobelova nadace tzv. Scientific Background jako zdůvodnění pro výběr. Uvedme zde několik bodů tohoto elaborátu.

Vedení světla v pevném prostředí využitím úplného vnitřního odrazu bylo prvně diskutováno již během 19. století. V r. 1841 D. Colladon na Univerzitě v Ženevě demonstroval vedení světla ve vodním paprsku, zatím co J. Babinet ve Francii následně tuto

ideu rovněž rozšířil na vedení v ohnuté skleněné tyči. Tento jev je často připisován J. Tyndalovi, který demonstroval v r. 1854 vedení světla ve vodním paprsku na zasedání Royal Society v Londýně podle vzpomínek M. Faradaye na dřívější Colladonovo londýnské předvádění. Je ale možno uvést, že tento jev byl znám již ze starých dob jako dekorace malými kousky skla v Egyptě či Mezopotámii. Vedení světla ve velkých vodních proudech bylo rovněž využíváno pro zábavní účely jako osvětlení fontán předváděné na Světové výstavě v Paříži v r. 1889.



Obr. 2 Průchod paprsku vláknem s jádrem a pláštěm. Indexy lomu jádra a pláště jsou postupně n_j , n_p , úhel mezního dopadu je α_m a aperturní úhel α_A

První aplikace vedení světla ve skleněných vlákních (nebo spíše v krátkých tenkých tyčinkách) je datováno od r. 1920. Bylo to přenášení obrazu svazkem vláken. Motivací byla gastroscopie v medicíně, flexibilní dalekohled a obrazové kódování ve vojenství a rovněž v počátcích televize. Holá skleněná vlákna byla však velmi ztrátová a nepřenášela příliš mnoho světla. Vlákna se navzájem dotýkala a světlo přecházelo z jednoho vlákna do druhého a unikalo ven z vláknového svazku. Průlom nastal začátkem padesátých let, kdy byla demonstrována idea, že k vedení světla se přispěje, bude-li k úplnému vnitřnímu odrazu docházet uvnitř vlákna, na rozhraní jádra a pláště (obr. 2). Jádro má nepatrně větší index lomu. Úplný vnitřní odraz nastává, když paprsek dopadá na rozhraní mezi jádrem a pláštěm pod větším než mezním úhlem. Podle Snellova zákona se paprsek v prostředí s menším indexem lomu láme od kolmice, tj. úhel lomu je větší než úhel dopadu. Mezního úhlu dopadu α_m se dosáhne, bude-li se paprsek lámat pod pravým úhlem

$$n_j \sin \alpha_m = n_p,$$

protože sinus úhlu lomu je jedna.

Aperturní úhel vlákna je poloviční vrcholový úhel sbíhavého kužele paprsků, které mohou vniknout do jádra vlákna. Sinus tohoto úhlu se snadno dostane z geometrie paprsků.

$$\sin \alpha_A = n_j \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_m} = \sqrt{n_j^2 - n_p^2}.$$

V r. 1954 H. H. Hopkins a N. S. Kapany v Imperial College London úspěšně sestavili svazek několika tisíc vláken délky 75 cm a prokázali dobré parametry pro přenášení obrazu. Kombinace technologií vláknových svazků našla u některých aplikací, a to zejména gastroscopie, přímou cestu k průmyslové produkci. Teorie šíření světla ve vlákních byla popsána podrobněji N. S. Kapany a později vylepšena v publikaci z r. 1961 E. Snitzerem.

Optická oblast elektromagnetického spektra odpovídající vlnovým délkám viditelného, blízkého infračerveného a ultrafialového spektra se odedávna považovala za atraktivní pro sdělování. Kmitočet světelného vlnění je vysoký a dovoluje proto modulaci vysokými kmitočty a tudíž vysokou rychlost přenosu. V r. 1880 si patentoval G.A. Bell optický telefon nazvaný fofon sestávající ze zrcadla rozechvívaného zvukem, na něž bylo soustředěno sluneční světlo. Světlo po odraze procházelo volným vzduchem na selenový detektor svázaný se sluchátkem. O něco později byly podobné myšlenky patentovány a jeden patent se také týkal průchodu světla křemenem jako prostředím přenosu. V padesátých letech 20. století ovšem jen velmi málo vědců věřilo optickému sdělování jako schůdnému řešení.

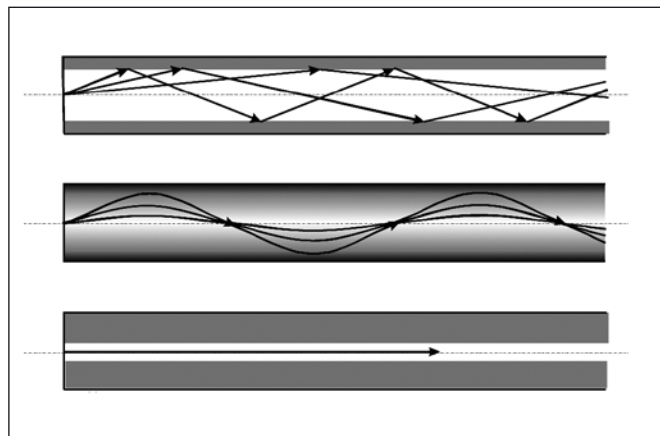
Před sto lety byli G. Marconi a K. F. Braun poctěni Nobelovou cenou za příspěvek k rozvoji bezdrátové telegrafie, před padesáti lety se rychle rozvíjelo elektronické a rádiové sdělování. První transatlantický kabel byl položen v r. 1956 a umělé družice brzy nato ještě vylepšily pokrytí země sdělovacími prostředky. První komunikační družice byla vynesena již v r. 1958. Výzkum ve sdělování byl soustředěn hlavně na kratší rádiové vlny milimetrové oblasti s úmyslem dosáhnout vyšších přenosových rychlostí. Tyto vlny však nemohly procházet tak snadno vzduchem jako delší vlny a výzkum se proto obrátil k návrhu praktických vlnovodů.

Vynález laseru začátkem šedesátých let (Nobelova cena v r. 1964 C. H. Townesovi, N. G. Basovovi a A. M. Prochorovovi) znamenal nový podnět k výzkumu optického sdělování. Brzy nato byl T. H. Maimanem předveden impulzní laser na rubín a A. Javan postavil první laser s kontinuálním provozem se směsí plynů He a Ne. Polovodičové lasery se objevily v témž čase, ale byly zprvu nepřilíh praktické, protože vyžadovaly vysoké proudy a nepracovaly při pokojové teplotě. Teprve o několik let později zavedením heterostruktur (Nobelova cena v r. 2000 Z. I. Alferovovi a H. Kroemerovi) dovolilo práci při pokojové teplotě a tím se staly tyto lasery ideálním zdrojem pro optické sdělování.

Intenzivní výzkum vhodného přenosového prostředí v optické oblasti začal od šedesátého roku. Optické vlákno však bylo tehdy mimo pozornost pro svůj vysoký útlum. Útlum se vyjadřuje v jednotkách dB/m jako součinitel

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P\{0\}}{P\{L\}},$$

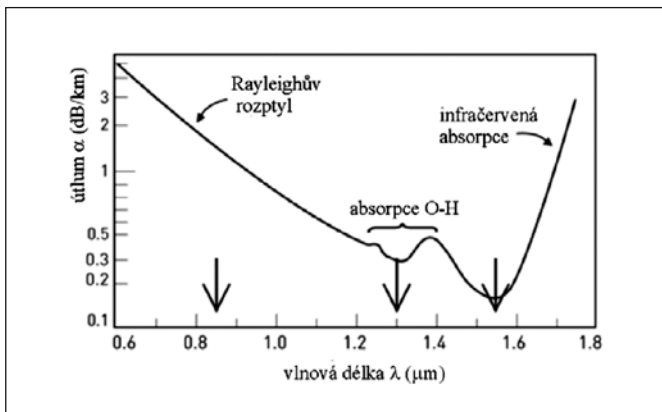
kde $P\{0\}$ a $P\{L\}$ jsou vstupní a výstupní světelný výkon a L je délka vlákna. Útlum prvních optických vláken byl typicky 1000 dB/km, což znamená, že po 20 metrech zůstalo pouze 1% výkonu. Jiné možnosti, jako vedení světla řadou čoček nebo plynovými trubnicemi s radiálním teplotním gradientem pro neustálé soustřeďování světelného svazku, se neosvědčily. A. E. Karbowiak ze Standard Telecommunication Laboratories ve Velké Británii a J. C. Simon společně s E. Spitzem z CSF (Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil) ve Francii ukázali, že pro optické sdělování by bylo vhodné používat vlnovody, v nichž by se šířil jediný vid (např. v tenkých vrstvách), protože by došlo k redukci disperze (E. Spitz byl před opuštěním ČSSR pracovníkem Výzkumného ústavu pro sdělovací techniku A. S. Popova - VÚST v Praze). J. - I. Nishizawa a I. Sasaki v Japonsku jakož i S. A. Miller z Bellových laboratoří ve Spojených státech navrhli optická vlákna s gradientním indexem lomu. V mnohovidových vlákních s radiálním gradientem indexu lomu se redukují ve srovnání se skokovým průběhem indexu lomu



Obr. 3 Šíření paprsků v mnohovidovém, gradientním a jednovidovém vlákně. V důsledku různých optických drah různě skloněných paprsků nastává v mnohovidovém vlákně rozšíření signálu (vidová disperze). V gradientním vlákně s vhodným radiálním gradientem indexu lomu k rozšíření nedochází, ale získání přesného gradientu je v praxi obtížné. Proto je nejvhodnější vlákno jednovidové

disperzní efekty vznikající v důsledku různých rychlostí prostorových vidů (obr. 3). Tato vlákna měla být využita jako první generace optických vláken pracujících při vlnové délce 870 nm. Avšak žádné řešení nenalezlo lék na problém útlumu.

Charles K. Kao byl jako mladý inženýr v STL angažován v optickém sdělování. Začal pod vedením A. E. Karbowiaka a potom dostal na starost malou skupinu, v níž měl zpočátku jen jednoho spolupracovníka - G. A. Hockhama. To byl mladý teoretik, jehož práce na analýze efektu nedokonalostí ve vlnovodech vedla k disertační práci obhájené v r. 1969. Společně podrobně vyšetřovali základní vlastnosti optických vláken vztahené k optickému sdělování. Na rozdíl od většiny kolegů brali v úvahu nejen fyziku vlnovodu, ale také materiální vlastnosti. Jejich závěry Kao prezentoval v Londýně začátkem r. 1966 a publikoval v červnu téhož roku. Nejdůležitějším výsledkem bylo, že ztráty v dielektrickém prostředí jsou většinou způsobeny absorpcí a rozptylem (obr. 4). Absorpce byla převážně způsobena nečistotami, zejména ionty železa. Ostatní ztráty vyvolané ohybem a nedokonalostmi vlnovodu jakož i šířivé a vyzařovací ztráty byly shledány jako malé. Autoři dospěli k závěru, že vlákna ze skla o vyšší čistotě by mohla být vhodná pro optické sdělování a že by mohla mít útlum menší než 20 dB/km, který se považoval za mezní pro životaschopné optické sdělování.



Obr. 4 Útlum křemene v závislosti na vlnové délce. Dominantní složkou útlumu v oblasti kratších vlnových délek je Rayleighův rozptyl se závislostí λ^{-4} a v oblasti delších infračervená absorpce v molekulách. Nečistoty ve formě radikálů O-H je obvykle těžko odstranit. Šipky ukazují vlnové délky využívané pro optické sdělování. Nejmenší útlum se dosahuje pro vlnovou délku 1,55 μm

Kao společně se svými novými spolupracovníky T. W. Daviesem, M. W. Jonesem a C. R. Wrightem pokračovali v práci řadou pečlivých měření spektrálního útlumu světla ve skle a jiných materiálech. Ukázal zejména, že tavený křemen (SiO_2) má čistotu požadovanou pro optické sdělování. Naneštěstí tento materiál má vysokou teplotu tavení. Poté začal celosvětový výzkum s cílem

vyrobit skleněná vlákna s nízkými ztrátami. Čtyři roky po článku Kaoa a Hockhama uspěl výzkumný tým R. D. Mauera z Corning Glass Works ve Spojených státech s důmyslnou metodou zvanou CVD (Chemical Vapor Deposition). Podařilo se jim vytáhnout vlákna z taveného křemene s malými ztrátami. Aby dosáhli malého rozdílu indexů lomu mezi jádrem a pláštěm, dopovali křemenné jádro titanem a plášť ponechali nedopovaný. Později nahradili titan germaniem a dosáhli útlumu 4 dB/km při 850 nm. Několik dalších technologických postupů bylo nalezeno v Japonsku, USA a Velké Británii. J. B. MacChesney a spolupracovníci v Bellových laboratořích vyvinuli modifikovanou CVD (MCVD) technologii dovolující efektivní výrobu optických vláken. V několika letech bylo dosaženo útlumu menšího než 1 dB/km, což je mnohem lepší než hodnota předpovězená Kaoem. Dnes je útlum světla ve vláknech pro vlnovou délku 1,55 μm pod 0,2 dB/km. Moderní optické vlákno je mimořádně transparentní prostředím s více než 95 % zůstávajícího světla po 1 km šíření.

Dnešní optické sdělování dosáhlo současného stavu díky řadě zásadních průlomů. Byly vyvinuty vhodné zdroje světla založené na dvojitých heterostrukturách pro oblast 1550 nm. Optoelektronické opakovací, které se u prvních přenosových systémů používaly pro kompenzaci ztrát, byly nahrazeny optickými zesilovači, zejména erbium dopovanými vláknovými zesilovači. Lineární zkreslení způsobené disperzí se odstraňuje pomocí segmentů tzv. kompenzačních vláken s velkou normální disperzí. Optické sdělování využívá vlnový multiplexing, kdy se jediným vláknem přenáší současně desítky signálů na různých vlnových délkách, čímž se lépe využije přenosová kapacita vlákna. První neexperimentální optické linky byly nainstalovány v r. 1975 ve Velké Británii a brzy nato v USA a Japonsku. První transatlantický vláknový optický kabel byl položen v r. 1988.

Globální sdělování a zejména internet a dálkový telefon jsou dnes založeny primárně na technice optických vláken. Přenosová kapacita moderních jednovidových vláken je 12 terabitů za sekundu. To je milionnásobek přenosové kapacity nejrychlejších radioreléových tras. Zatímco na úsvitu optického věku se optika používala jen na nejrychlejších trasách mezi ústřednami, dnes se už i v Evropě uvažuje o rozvodu optických vláken do každého domu. Tato technologie (anglicky FTTH – Fiber To The Home) je dnes již běžná v Asii a umožňuje domácnostem přístup k vysokorychlostnímu internetu, digitální televizi a VOIP telefonii. Vláknové optické sítě se používají ke sběru a přenosu dat ve velkém hadronovém collideru (LHC) ve švýcarském CERNU nebo v rámci obřího belgického radioastronomického teleskopu LOFAR o průměru 350 km. Naleznete je v nemocnicích v pozitronových emisních tomografech, v moderních Airbusech A350 nebo Boeingech 787, ale i v domácnostech, kde zajišťují rozvod digitálních signálů v HiFi zařízeních.

Miroslav Miler, Pavel Honzátka

Doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc., Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8-Kobylisy, tel.: 266 773 454, e-mail: miler@ufe.cz

Dr. Ing. Pavel Honzátka, Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8-Kobylisy, tel.: 266 773 527, e-mail: honzatkan@ufe.cz

Vláknová optika v Ústavu fotoniky a elektroniky

Článek shrnuje výsledky třicetiletého výzkumu přípravy a charakterizace optických vláken v ČSAV a AV ČR, jmenovitě v Ústavu chemie skelných a keramických materiálů ČSAV a Ústavu radiotechniky a elektroniky ČSAV (AV ČR), dnes Ústavu fotoniky a elektroniky (ÚFE) AV ČR, v.v.i. Tento výzkum lze rozdělit do dvou období. V prvním období do konce roku 1989 byl výzkum zaměřen na telekomunikační typy vláken. V článku jsou uvedeny přenosové vlastnosti připravených vláken ukazující plnou srovnatelnost se světem. Pro druhé období od roku 1990 do současnosti je charakteristický výzkum vláken speciálních pro vláknové lasery a zesilovače a optické vláknové senzory. V článku jsou popsány některé původní struktury speciálních optických vláken navržených a připravených v ÚFE.

Klíčová slova: optické vlákno, telekomunikace, laser, zesilovač, senzor

1. ÚVOD

Udělení části Nobelovy ceny za fyziku v roce 2009 Charlesi K. Kaovi za průlomové myšlenky týkající se vlastností materiálů a jejich uspořádání v optických vláknech pro optické sdělování je jistě vhodným rámcem pro krátký souhrn výsledků základního výzkumu v této oblasti v ČSAV a AV ČR. Hlavní zaměření tohoto výzkumu lze rozdělit do dvou období, jedno do konce roku 1989 a druhé od roku 1990 do současnosti.

2. OBDOBÍ DO KONCE ROKU 1989

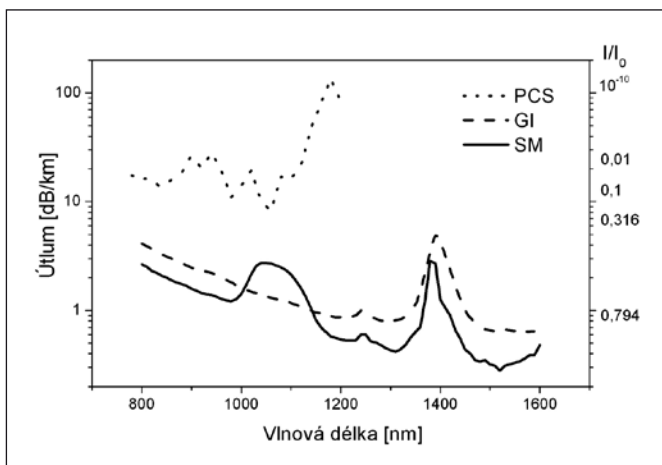
Výzkum optických vláken má v ČR dlouhou tradici, která začala těsně před rokem 1980. V té době bylo v rámci ČSAV rozhodnuto rozvíjet optoelektroniku jako prioritní směr základního výzkumu. Do tohoto rozvoje byly zapojeny tři tehdejší ústavy ČSAV, jmenovitě Ústav radiotechniky a elektroniky ČSAV (ÚRE), přejmenovaný od roku 2007 na Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i. (ÚFE), Společná laboratoř pro chemii a technologii silikátů ČSAV a VŠCHT, která se od roku 1988 konstituovala jako Ústav chemie skelných a keramických materiálů ČSAV (ÚCHSKM) a Fyzikální ústav Slovenskej Akadémie vied (FzÚ SAV) v Bratislavě. Lze říci, že rozvoj tohoto směru výzkumu reagoval na rychlý rozvoj optoelektroniky v tomto období ve světě.

V rámci výzkumu se ÚRE zaměřil zejména na oblast teoretického návrhu a charakterizace optických vláken a na vývoj některých přístrojů pro přípravu a charakterizaci vláken. Technologie, ve smyslu určení metodologických základů přípravy vláken,

byla zkoumána v ÚCHSKM a ve FzÚ SAV. V prvním období asi do roku 1983 byly v ÚCHSKM vypracovány základy postupu tažení vláken křemen-polymer („polymer-clad silica“- PCS vlákna). V ústavu bylo sestaveno první tažící zařízení optických vláken v ČSSR, na němž v roce 1982 bylo připraveno první PCS vlákno. Na výzkumu se podílel i ÚRE, a to v oblasti výzkumu metod pro měření průměru vlákna a regulaci procesu jeho tažení. Postup pro výrobu těchto vláken, použitelných pro přenos informací např. uvnitř objektů, byl předán do Výzkumného ústavu Sklo-Union v Teplicích, kde byla od roku 1984 zahájena jejich průmyslová výroba [1]. V průběhu roku 1982 bylo rovněž v ÚCHSKM vyvinuto laboratorní zařízení pro přípravu preforem optických vláken metodou modifikované depozice z plynné fáze (MCVD), jedné z metod přípravy preforem zkoumané a rozvíjené zejména v USA. Více o této metodě pojednává článek I. Kašíka a spol. v tomto čísle Jemné mechaniky a optiky (JMO).

Asi od roku 1983 byl v ÚCHSKM zahájen výzkum přípravy optických vláken s gradientním profilem (GI) indexu lomu, tj. telekomunikačních vláken pro městské sítě. V rámci tohoto výzkumu byly popsány procesy přípravy objemových skelných materiálů s definovaným profilem indexu lomu nanášením tenkých vrstev na vnitřní stěnu křemenné trubice metodou modifikované depozice z plynné fáze (MCVD). Kromě zkušebnostních modelů přípravy těchto materiálů ve formě preforem, byly vypracovány i modely teoretické rozvíjené pouze na několika pracovištích v USA, SSSR, NDR [2]. Tento materiálový výzkum plně využíval i závěry modelování přenosových vlastností gradientních vláken získané v ÚRE [3, 4], které umožnily určit kritické vlastnosti vláken. Po přípravě série asi 100 km gradientních vláken pro vlnovou délku 850 nm byl výrobní postup v letech 1987-1988 opět předán do poloprovozu ve Sklo-Unionu Teplice. Tento postup umožnil připravovat vlákna s útlumy asi 2,99 dB/km pro vlnovou délku 850 nm a 0,81 dB/km pro vlnovou délku 1300 nm (viz obr. 1). Průměrná šířka pásma 61,5 km vláken činila 562,3 MHz.km [5], což byly výsledky plně srovnatelné se světem. Tyto výsledky byly již dosaženy s využitím komerčního MCVD zařízení instalovaného na pracovišti ÚCHSKM v Praze 6 - Lysovalkách.

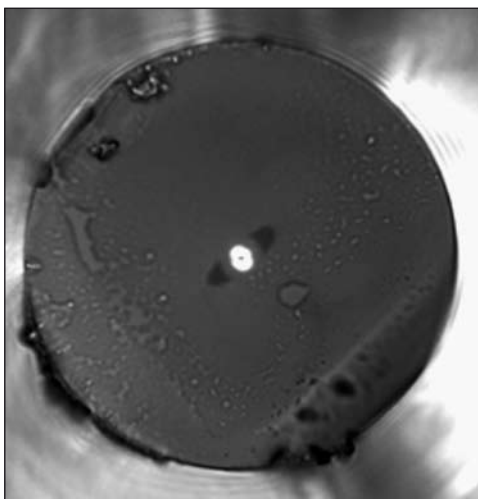
Výsledky výzkumu GI vláken byly v ÚCHSKM zobecněny i pro přípravu vláken jednovidových pro vlnovou délku 1300 nm. Tento výzkum začal v průběhu roku 1986. Výsledkem výzkumu byl v roce 1989 proces přípravy vláken s útlumem pod 0,5 dB/km při 1300 nm a asi 0,2 dB/km při 1550 nm (viz obr. 1). Disperze vláken byla v rozmezí $\pm 3,5$ ps/nm/km při 1300 nm. I tento materiálový výzkum využíval výsledky ÚRE v oblasti modelování přenosových vlastností jednovidových vláken i měření jejich disperze [6].



Obr. 1 Spektrální útlum telekomunikačních typů vláken připravených v ÚCHSKM

V průběhu roku 1987 byl v ÚCHSKM zahájen výzkum přípravy vláken speciálních, k nimž patří vlákna dopovaná v jádře netradičními dopanty jako jsou prvky vzácných zemin (erbiem, neodym). Pro přípravu preforem těchto vláken byl navržen a ověřen originální proces dopování z roztoku spočívající ve využití roztoků solí prvků vzácných zemin v chloroformu [7]. První hodnoty zesílené spontánní emise byly na těchto vláknech naměřeny v ÚRE v roce 1989.

Originální postup přípravy speciálních vláken byl v rámci spolupráce ÚCHSKM s „Institutem Radiotechniky a Elektroniky Akademii Nauk SSSR“ ověřen i při přípravě vláken zachovávajících polarizaci (viz průřez se dvěma tmavými napěťovými prvky v blízkosti jádra na obr. 2) [8]. Tento proces využíval tepelné clony při leptání napěťových vrstev při přípravě preformy.



Obr. 2 Průřez vlákna zachovávajícího polarizaci (typ „motýlek“)

3. OBDOBÍ OD ROKU 1990

Po listopadu 1989 se výzkum přípravy optických vláken v ČR zaměřil na speciální vlákna zejména pro optické vláknové lasery a zesilovače a pro optické vláknové senzory. Poloprovozní výroba vláken pro telekomunikace ve VUSU Teplice byla ukončena v roce 1990, zařízení a výrobní postupy byly prodány do Turecka firmě Hesfibel v roce 1992.

V roce 1993, po zrušení ÚCHSKM, přešli tři jeho pracovníci spolu s unikátními experimentálními zařízeními umístěnými v Praze 6 - Lysolajích do ÚRE a posílili tak možnost promítnout originální teoretické návrhy fyzikálního výzkumu do vzorků vláken. Tento přechod tak posílil v ÚRE (dnes ÚFE) experimentální předpoklady pro fyzikální a materiálový výzkum speciálních vláken, který lze dnes charakterizovat dvěma hlavními směry.

3.1. Vlákna pro lasery a zesilovače

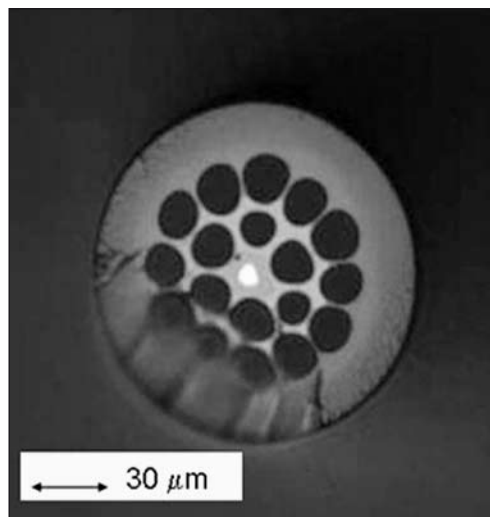
Jeden směr výzkumu speciálních vláken reprezentují vlákna dopovaná prvky vzácných zemin erbiem a ytterbiem se zesílenou spontánní emisí v oblasti vlnových délek 1550 nm. Pomocí připravených vláken byly sestaveny vláknové lasery a generovány optické solitony [9]. Pro S-pásmo jsou zkoumána vlákna dopovaná thuliem [10]. Probíhá výzkum vláknových zesilovačů používajících vysoce výkonové laserové diody pro čerpání prvků vzácných zemin v jádře vláken přes plášť [11] nebo využívajících stimulovaný Ramanův rozptyl v optických vláknech [12]. Tento směr je součástí širší oblasti výzkumu a vývoje v ČR zaměřené na optické zesilování v telekomunikačních sítích, na jejímž rozvoji ÚFE těsně spolupracuje se sdružením CESNET z.s.p.o., ČR. Výsledky této spolupráce byly oceněny Cenou ministra školství, mládeže a tělovýchovy ČR za výzkum v roce 2007. Další detaily jsou uvedeny v článku P. Peterky a spol. v tomto čísle JMO. V oblasti optických komunikací lze zmínit i koncepční přínos ÚFE k problematice lokálních sítí v ČR [13].

3.2. Vlákna pro senzory

Druhý směr výzkumu zahrnuje optická vlákna pro senzory. V jeho rámci byla navržena, připravena a testována řada původních struktur pro vláknové senzory chemických látek. Na rozdíl od vláken pro telekomunikace, která musí mít prakticky nulovou citlivost k vnějším fyzikálním a chemickým vlivům, je výzkum ÚFE zaměřen na návrh a přípravu vláken s definovanou citlivostí k chemickým látkám. Základní metodologický přístup rozvíjený v ústavu spočívá ve výzkumu nových přístupů pro zvýšení podílu optického výkonu přenášeného evanescentní vlnou a pro kontrolu přístupu chemikálií do detekčního místa v evanescentním poli.

Prvním studovaným vláknem pro chemické senzory bylo PCS vlákno, kde excitace kolimovaným odkloněným svazkem umožnila podstatně zvýšit citlivost k chemikáliím [14]. Pro řízení selektivity detekce, tedy přístupu pouze některých chemických látek do oblasti evanescentního pole, byla část pláště PCS vlákna nahrazena porézní vrstvou s tloušťkou do jednoho mikrometru a s definovanou polaritou [14]. Polarita vrstvy řídí složení a množství látek, které vrstvou projdou až k rozhraní jádro/plášť, kde je evanescentní pole nejsilnější. Tyto přístupy byly modelově testovány s pomocí uhlovodíků v plynných směsích a rozpuštěných ve vodě [14, 15]. V posledním případě aromatických uhlovodíků byly detekovány koncentrace pod 10^{-4} mol. %.

Výzkum pokračoval návrhem a přípravou speciálních detekčních vláken, sektorových s-vláken nebo vláken s invertovaným gradientním (IGI) profilem jádra [14]. Obě tyto struktury umožňují podstatně zvýšit optický výkon v evanescentním poli a tím i detekční citlivost. Další možnost řízení citlivosti vláken k vnějším parametrům zkoumaná v ÚFE spočívá v zápisu mřížek s dlouhou periodou do vláken. Specifika výzkumu jsou dána zápisem těchto mřížek do vláken se speciálními gradientními nebo IGI profily indexu lomu. Tímto přístupem byla prokázána možnost řízení citlivosti těchto vláken k vnějším faktorům [16]. K souboru materiálů zkoumaných v současnosti v ÚFE pro optické vláknové senzory lze přiřadit mnohosložková oxidická skla i vlákna neoxidická - chalkogenidová pro střední infračervenou oblast.



Obr. 3 Průřez MSV vlákna s jádrem dopovaným ionty erbia a ytterbia

3.3. Vlákna mikrostrukturální

Od roku 2005 je v ÚFE intenzivně studována příprava a vlastnosti vláken mikrostrukturálních (MSV). Tato vlákna mají vzduchové díry v optickém plášti (viz obr. 3). V ÚFE jsou tato vlákna studována pro vláknové lasery (vlákno v obr. 3 dopované v jádře prvky vzácných zemin) [17] a vláknově-optické senzory [18]. V rámci výzkumu bylo navrženo několik původních přístupů zahrnujících modifikace selektivity MSV nanášením detekční vrstvy na stěnu vzduchových děr. ÚFE tak patří k jednomu z prvních pracovišť

ve světě, kde tyto detekční vrstvy byly připraveny a byl prokázán jejich vliv na detekci uhlovodíků [18]. Výsledky s využitím MSV pro chemickou detekci iniciovaly mezinárodní spolupráci s USA v oblasti modelování těchto vláken [19].

4. ZÁVĚRY

Srovnáním výsledků uvedených v předchozím textu s výsledky dosaženými ve světě lze učinit závěr, že výzkum přípravy a vlastností optických vláken v ÚFE lze zařadit do hlavního směru fotonického výzkumu ve světě. Řada původních metod přispívá k rozvoji tohoto směru. Současně tyto výsledky vytvářejí předpoklady pro budoucí rozvoj. Jsou zkoumány nové postupy přípravy vláken zahrnující sol-gel metodu, použití nanočástic atp. Ve většině těchto případů výzkum umožnil prokázat platnost nových myšlenek, a to jak z oblasti fyzikálního výzkumu, tak z oblasti přípravy nových materiálů. V některých případech na tento základní výzkum navázal výzkum aplikovaný, zaměřený již na nejlepší určité užité vlastnosti vláken, a následně směřoval i do vývoje. I po listopadu 1989 se našlo několik malých firem v ČR snažících se o spolupráci při praktické aplikaci výsledků výzkumu. Lze tedy konstatovat, že téměř třicetileté zkušenosti klíčových osobností s přípravou a charakterizací vláken jsou dobrým předpokladem pro rozvoj tohoto výzkumu i v budoucnosti.

Poděkování:

Tento výzkum byl podpořen AV ČR v rámci řešení výzkumného záměru AV0Z20670512.

Literatura

- [1] J. Novák, J. Markuci, J. Šulc, V. Rubinsteinová, Poloprovozní výroba vláken typu PCS ve Sklo Unionu Teplice, Sb. Optické Komunikace 1984, Ed. C. Anderle, ČSVTS, str. 15-17.
- [2] V. Matejec, I. Kasik, M. Chomat, Fundamentals and performance of the MCVD aerosol process, Aerosol Chemical Processes in the Environment, Ed. K.R. Spurny, Lewis Publishers, USA, str. 271-294, 2000.
- [3] M. Karasek, Vliv poruchy profilu indexu lomu na šířku pásma optických vláknových vlnovodů, Sb. Optické Komunikace 1986, Ed. C. Anderle, ČSVTS, str. 31-35.
- [4] T.B. Babkina, M. Karasek, Chromatic dispersion of multimode fiber lightguides, Radiotechnika i Elektronika Vol. 33(1), str. 175-177, 1988.
- [5] J. Gotz, Z. Choc, V. Matejec, M. Hayer, G. Kuncova, M. Pospisilova, Technologická příprava telekomunikačních vláken typu GI, Sb. Optické Komunikace 1988, Ed. C. Anderle, ČSVTS, str. 99-104.
- [6] R. Vichr, M. Karasek, Z. Choc, J. Gotz, Transmission characteristics of single-mode fibers, Ceramics-Silikaty Vol. 36(1), str. 7-13, 1992.
- [7] O. Sysala, I. Kasik, I. Spejtkova, Preparation of preforms and optical fibers containing aluminium by the solution-doping method, Ceramics-Silikaty Vol. 35(4), str. 363-367, 1991.
- [8] V. Matejec, L. Sasek, J. Gotz, G.A. Ivanov, N.A. Koreneva, V.V. Grigoryants, New gas-phase etching method for preparations of polarisation maintaining fibers, Proc. SPIE Vol. 1513-Glasses for Optoelectronics II, Ed. G.C. Righini, str. 174-179, 1991.
- [9] P. Peterka, P. Honzatko, J. Kanka, V. Matejec, I. Kasik, Generation of high repetition rate pulse trains in a fiber laser through a twin-core fiber, Proc. SPIE Vol. 5036-Photonics, Devices and Systems II, Eds. M. Hrabovsky, D. Senderakova, P. Tomanek, str. 376-381, 2003.
- [10] P. Peterka, I. Kasik, V. Matejec, W. Blanc, B. Faure, B. Dussardier, G. Monnom, V. Kubecek, Thulium-doped silica-based optical fibers for cladding-pumped fiber amplifiers, Opt. Materials Vol. 30(1), str. 174-176, 2007.
- [11] P. Peterka, I. Kasik, V. Kubecek, V. Matejec, M. Hayer, P. Honzatko, A. Zavadilova, P. Dvoracek, Optimization of erbium-ytterbium fibre laser with simple double-clad structure, Proc. SPIE Vol. 6180-Photonics, Devices and Systems III, Eds. P. Tomanek, M. Hrabovsky, M. Miler, D. Senderakova, str. 618010-1 – 618010-6, 2006.
- [12] M. Karasek, J. Radil, J. Vojtech, Power transients in time-division multiplexed discrete Raman fibre amplifier, Optics Commun. Vol. 282(14), 2944-2949, 2009.
- [13] A. Kuchar, Achievements of COST 266 action and further prospects in research of advanced infrastructure for photonic networks, Proc. ICTON 2004 6th International Conference on Transparent Optical Networks Vol. 1, str. 37-42, 2004.
- [14] V. Matejec, M. Chomat, M. Hayer, I. Kasik, D. Berkova, F. Abdelmalek, N. Jaffrezic-Renault, Development of special optical fibers for evanescent-wave chemical sensing, Czech J. Phys Vol. 49(5), str. 883-888, 1999.
- [15] J. Skokankova, J. Mrazek, V. Matejec, M. Hayer, I. Kasik, M. Chomat, D. Berkova, A. Barau, M. Zaharescu, M. Raileanu, Properties of xerogel layers for the detection of toluene in water, Mater. Sci. Eng. C-Biom. Supramol. Systems Vol. 26(2-3), str. 208-213, 2006.
- [16] F. Todorov, M. Chomat, D. Berkova, J. Ctyroky, V. Matejec, I. Kasik, Sensitivity characteristics of long-period gratings written with a CO2 laser in fiber with parabolic-index cladding, Sens. Letters Vol. 7(5), str. 979-983, 2009.
- [17] V. Matejec, M. Hayer, I. Kasik, J. Mrazek, P. Peterka, J. Kanka, P. Honzatko, Microstructure fibers for the development of fiber lasers, Proc. SPIE Vol. 6180-Photonics, Devices and Systems III, Eds. P. Tomanek, M. Hrabovsky, M. Miler, D. Senderakova, str. 61800Z-1 – 61800Z-6, 2006.
- [18] V. Matejec, J. Mrazek, M. Hayer, I. Kasik, P. Peterka, J. Kanka, P. Honzatko, D. Berkova, Microstructure fibers for gas detection, Mater. Sci. Eng. C-Biom. Supramol. Systems Vol. 26(2-3), str. 317-321, 2006.
- [19] Y.N. Zhu, Z.H. He, J. Kanka, H. Du, Numerical analysis of refractive index sensitivity of long-period gratings in photonic crystal fiber, Sens. Actuators B-Chemical Vol. 129(1), str. 99-105, 2008.

Nové trendy v přípravě preforem metodou MCVD

Článek se zabývá pokroky v oblasti přípravy preforem pro tažení optických vláken metodou MCVD. Vychází z historických poznatků při přípravě telekomunikačních vláken, které přispěly k významnému pokroku v oboru, za jehož rozvoj získal K. C. Kao v roce 2009 Nobelovu cenu. Pozornost je soustředěna zejména na nové materiály a vláknové struktury a postupy jejich přípravy z oblasti speciálních vláken pro vláknové zesilovače, lasery a sensory.

Klíčová slova: optické vlákno, preforma, metoda MCVD

1. ÚVOD

V prosinci roku 2009 získal Nobelovu cenu za fyziku, resp. její polovinu, Charles Kuen Kao za průlomové myšlenky týkající se přenosu světla ve vláknech pro optickou komunikaci. V článku, který vytvořil základ pro Nobelovu cenu [1], K. C. Kao a G. A. Hockham navrhli vlákno z dielektrických materiálů o indexu lomu vyšším než je obklopující okolí jako vhodné přenosové prostředí pro vlny optických kmitočtů. Popsali fyzikální přenosové charakteristiky takového vlákna. K. C. Kao v článku vyjádřil stimulující myšlenku, že je možné připravit vlákno ze skelných materiálů, jehož optické ztráty budou na úrovni 20 dB/km. Jako perspektivní materiál uvedl skelný křemen. Praktické implementaci této myšlenky se věnovalo několik skupin. Skupina vedená R. Maurerem [2] v roce 1972 připravila vlákno s útlumem 20 dB/km, určených K. C. Kao jako limit pro optické sdělování. Dalšího pokroku a snížení ztrát na 4 dB/km pak skupina dosáhla záměnou dopantů v křemenném skle [3]. Prakticky ve stejné době pracoval v Bell Laboratories MacChesney se spolupracovníky na další metodě tzv. modifikované depozice z plynné fáze (MCVD) [4]. Tato metoda umožnila dále snížit útlum připravovaných vláken pro telekomunikace a je spolu s výše uvedenými metodami základem dnešních výrobních metod [5, 6].

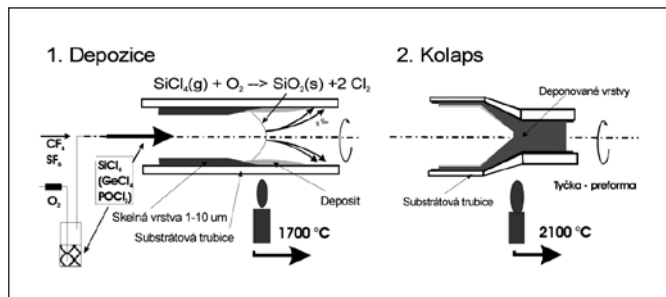
2. METODA MCVD

MCVD slouží k přípravě preforem – tyčí, ze kterých se následně táhne optické vlákno o požadované struktuře. Metoda MCVD vychází z konceptu metod depozice z plynné fáze (CVD, Chemical Vapor Deposition), při kterých jsou páry výchozích látek (SiCl_4) oxidovány za vzniku částic v pevném stavu (SiO_2). Čistota FO-Optipur výchozích látek, u nichž obsah nečistot nesmí přesahovat úroveň ~1 ppm (parts per million, tj. 10^{-6} nebo desetitisícinu procenta), je základním předpokladem pro přípravu nízkoztrátových optických vláken. Při MCVD (Modified CVD) metodě jsou výchozí plynné

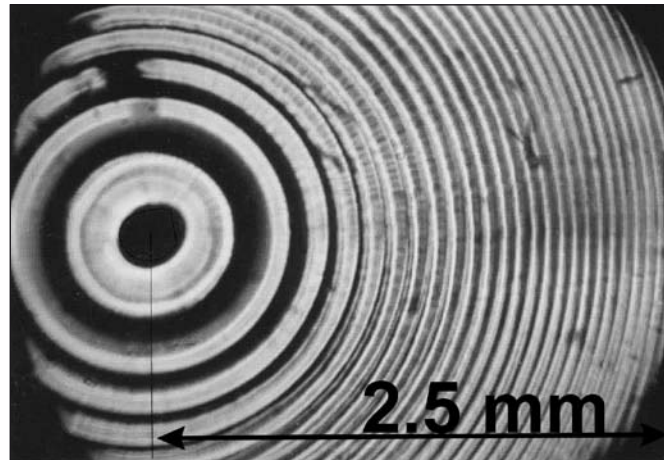
látky oxidovány přímo uvnitř substrátové trubice z kvalitního křemenného skla. Jemné submikronové částice SiO_2 s dopanty vznikající oxidací v horké zóně pohybujícího se hořáku, jsou při každém jeho průchodu podél trubice usazovány na její vnitřní stěnu a následně protavovány do tenkých skelných vrstev (obr. 1). Specifika MCVD metody spočívají v uplatnění termoforesy, kdy jemné částice putují z místa o nejvyšší teplotě (horké zóny hořáku) do místa o nejnižší teplotě (povrch substrátové trubice), jako



Obr. 2 Příprava preformy metodou MCVD (kolaps)



Obr. 1 Princip metody MCVD pro přípravu preforem pro tažení optických vláken (depozice a kolaps)



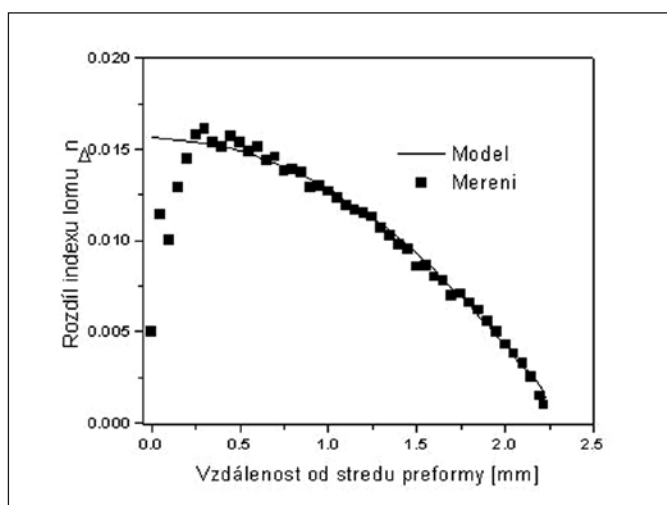
Obr. 3 Foto příčného řezu gradientní preformy

základního mechanismu pro usazování částic. Nastavením průtoku nosného plynu odpařovací nádobou SiCl_4 lze kontrolovat tloušťku deponovaných vrstev, použitím dalších výchozích látek (GeCl_4 , POCl_3 , aj.) lze řídit obsah dopantů a index lomu vrstev. V závěru procesu je pak substrátová trubice s nanosenými vrstvami při vysoké teplotě okolo 2100°C vlivem povrchových sil a v důsledku viskózních toků ve skle stažena do tyče (tzv. kolaps, obr. 2). Tímto postupem vznikají z tenkých vrstev objemové vzorky skla – preformy (obr. 3).

Do výzkumu přípravy preforem a optických vláken se zapojilo od roku 1980 i pracoviště, které zpočátku neslo název Společná laboratoř silikátů ČSAV a VŠCHT, posléze Ústav chemie skelných a keramických materiálů (ÚCHSKM) ČSAV. Od roku 1993 je toto pracoviště součástí dnešního Ústavu fotoniky a elektroniky (ÚFE) AVČR, v.v.i.

3. PŘÍPRAVA PREFOREM PRO TAŽENÍ TELEKOMUNIKAČNÍCH VLÁKEN

Do roku 1990 byla pozornost věnována primárně výzkumu technologie přípravy vláken pro telekomunikace. Od roku 1982 byly na laboratorním MCVD zařízení a od roku 1986 i na komerčním zařízení (Arnold, SRN, Special Gas Velká Británie) zkoumány postupy přípravy preforem vláken gradientních (GI, Graded Index). Tento výzkum zahrnoval jak zkušenostní modely zobecňující rozsahy průtoků výchozích látek, teplot nanášení a zpracování vrstev, kolaps trubice s vrstvami, tak modely teoretické [7]. Jak ukazuje obr. 4, bylo dosaženo uspokojivé shody profilu GI preformy v části, kde má nejkritičtější vliv na přenášenou šířku pásma. Tento vliv byl určen fyzikálním modelováním přenosových charakteristik GI vláken [8]. Výzkum optimálního dopování optického obalu/jádra a vlivu profilu indexu lomu na šířku pásma vedl k přípravě vláken o minimálních optických ztrátách v řádu jednotek dB/km, jak je pojednáno v dalším článku tohoto čísla JMO (V. Matějec et.al.). Technologie vypracovaná na základě výzkumu byla převedena do poloprovozní výroby v tehdejší VÚSU Sklo-Union Teplice a dodnes je využívána ve firmě Hesfibel v Turecku. Na konci osmdesátých let byla ještě vypracována technologie přípravy preforem pro tažení jednovidových vláken, jejichž optické ztráty (útlumy) dosahují minimálních hodnot okolo 0,2 dB/km, což odpovídá poklesu optického výkonu o 4,6 % na vzdálenosti 1 km.



Obr. 4 Optimalizace profilu indexu lomu preforem pro tažení gradientních vláken

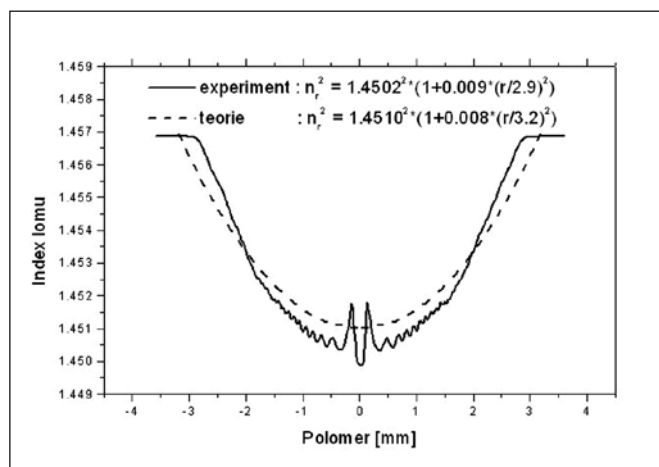
4. PŘÍPRAVA PREFOREM PRO TAŽENÍ VLÁKEN SPECIÁLNÍCH

Zkušenosti získané během výzkumu přípravy a charakterizace vláken pro telekomunikace byly využity v období následujícím po roce 1990, kdy byla pozornost soustředěna na technologie přípravy vláken speciálních. V tomto případě již vlákna neslouží

pouze jako pasivní přenosový prvek v telekomunikačních sítích, ale jako aktivní elementy generující optickou informaci – ve vláknových laserech (zesilovačích) [9] nebo optických vláknových senzorech [10].

4.1. Preformy se strukturami pro vláknové senzory

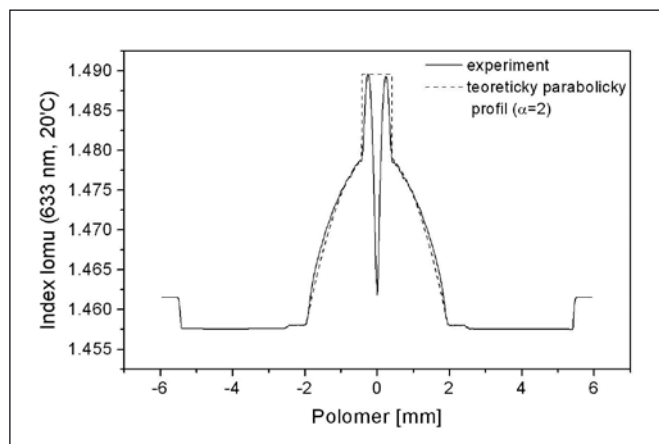
Jako optický hardware vhodný pro vláknově-optické refraktometrické senzory citlivé v širokém rozsahu indexů lomu [11] byla vyvíjena mnohavidová vlákna s invertovaným profilem indexu lomu (IGI, Inverted Graded Index). Preformy pro tažení takových vláken citlivých ke změnám indexu lomu pod úrovní křemenného skla ($n_{633} = 1,457$) byly dopovány B_2O_3 nebo fluorem. Bylo dosaženo maximálního poklesu indexu lomu až o -0.007, což je srovnatelné s výsledky předních světových pracovišť [12]. Poměrně dobrou shodu mezi teoretickým návrhem IGI struktury a připravenými preformami ukazuje obr. 5.



Obr. 5 Porovnání teoretického a experimentálního profilu indexu lomu invertované parabolické struktury s indexem lomu jádra nižším než 1,457 (B_2O_3 - SiO_2)

Preformy pro tažení IGI vláken citlivých ke změnám indexu lomu nad úrovní křemenného skla byly dopovány GeO_2 a P_2O_5 s cílem dosažení velkého průměru gradientního jádra a vysoké numerické apertury. Byly připraveny preformy s poměrem průměrů jádro/plášť až 80/125 při dosažení velmi vysoké numerické apertury okolo 0.5, tj. více než u ostatních výzkumných týmů [13].

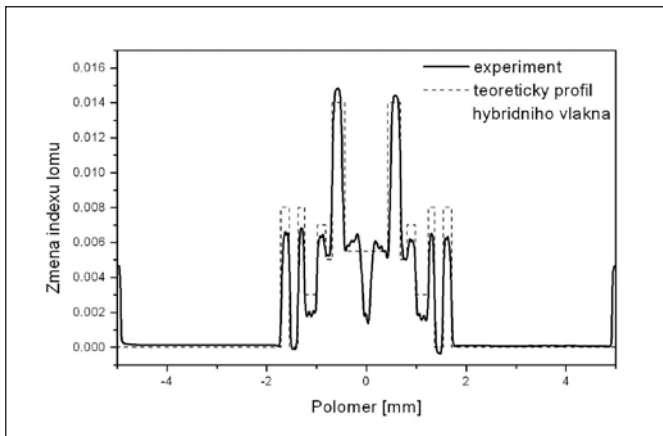
Zkušenosti z procesu depozice MCVD byly využity dále při přípravě speciálních struktur vhodných pro zápis mřížek s dlouhou periodou (LPG, Long Period Grating) [14]. Tyto struktury jsou charakterizovány gradientním profilem indexu lomu v optickém



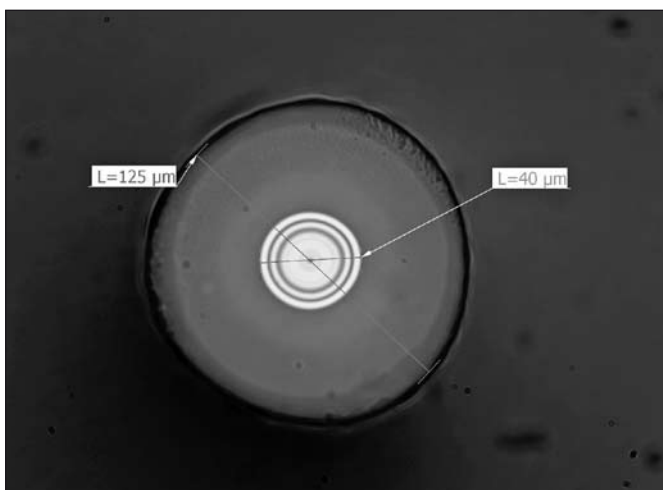
Obr. 6 Preforma s gradientním profilem optického obalu a jednovidovým jádrem

pláští a jednovidovým jádrem (viz obr. 6). Taková speciální vlákna byla navrhována za účelem specifické detekce teploty nebo tlaku [15]. Srovnání mezi teoretickým návrhem gradientní struktury a naměřeným profilem indexu lomu připravené preformy je patrné na obr. 6.

Vypracované modely procesu byly dále využity při přípravě hybridních kvazijednovidových struktur (obr. 7). Takové struktury jsou navrhovány za účelem spojení funkcí optických vláken jako přenosových médií a zároveň detekčních prvků [16]. Příčný řez vytaženého a zalomeného vlákna je na obr. 8.



Obr. 7 Profil indexu lomu preformy pro tažení hybridního vlákna



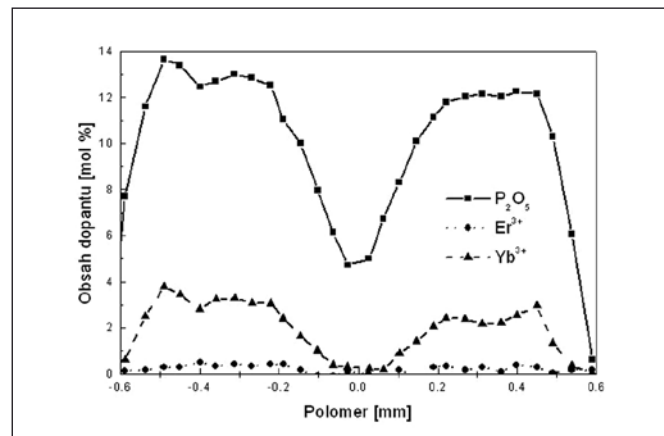
Obr. 8 Mikrofoto příčného řezu hybridního vlákna

4.2. Preformy dopované prvky vzácných zemin

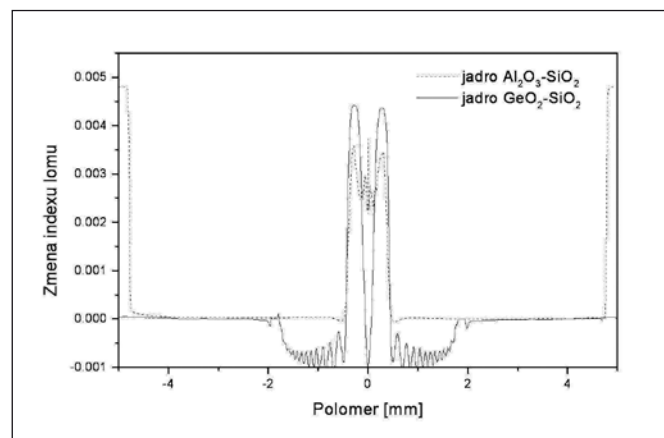
Potřeba přípravy vláken pro vláknové lasery a zesilovače dopovaných ionty vzácných zemin (RE, Rare-Earth) [17] přinesla primárně nutnost materiálového řešení, které by zamezilo fázové separaci vzácných zemin v matrici čirého křemenného skla. V souladu se světovým trendem byla vlákna vedle iontů vzácných zemin postupně ko-dopována Al_2O_3 , P_2O_5 , společně Al_2O_3 a P_2O_5 nebo Sb_2O_3 [18, 19, 20]. Tyto dopanty, schopné kompenzovat díky své struktuře silné pole iontů RE, umožnily podstatné zvýšení jejich koncentrace v jádře vláken až na úroveň desítek tisíc ppm, aniž by se tvořily shluky (clusters) RE a tím se snižovala úroveň zesílené spontánní emise (ASE, Amplified Spontaneous Emission). Nejdříve byly připravovány preformy dopované ionty erbia emitujícími na vlnové délce 1550 nm. Posléze byly podmínky zobrazeny pro přípravu preforem dopovaných v jádře současně ionty erbia a ytterbia [21], což umožňovalo efektivní čerpání na vlnové délce 1064 nm pomocí konvenčních YAG laserů. Vlákna vytažená z těchto preforem byla použita pro sestavení solitonového zdroje s vysokým opakovacím kmitočtem v řádu stovek GHz. V současné době jsou intenzivně studována vlákna dopovaná ionty thulia s emisí v oblasti

S-pásma [22, 23], vhodná pro zvyšování kapacity sítě přístupem WDM (Wavelength Division Multiplexing). Problematice vláknových laserů a zesilovačů je speciálně věnován další příspěvek (Peterka et al.). Pro dosažení nelineárních vlastností byla vlákna dále dopována Bi_2O_3 [24, 25] a v současné době je v souladu se světovým trendem [26] pozornost věnována přípravě vláken s nanostrukturovaným jádrem [27]. U těchto vláken se očekává další zvýšení úrovně ASE.

Požadavek dopování vláken ionty vzácných zemin přinesl požadavek na nový technologický proces, protože vhodné výchozí látky (AlCl_3 , SbCl_3 , RECl_3 , $\text{RE}(\text{NO}_3)_3$) jsou v takovém případě obvykle



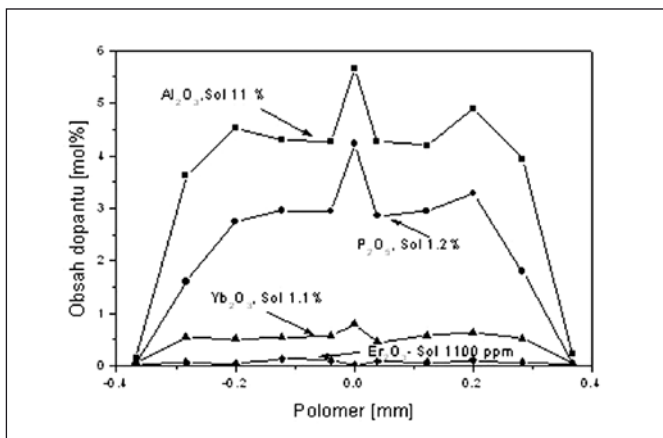
Obr. 9 Koncentrační profil preformy dopované P_2O_5 a $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ připravené metodou solution-doping



Obr. 10 Profil indexu lomu preforem pro tažení jednovidových vláken dopovaných Al_2O_3 nebo GeO_2

pevné látky. Bylo proto nutné metodu MCVD modifikovat, na čemž pracovala řada pracovišť po celém světě. V dřívějším ÚRE, dnes ÚFE byla primárně rozvíjena metoda dopování z roztoku, jejíž modifikacemi [28, 29] bylo dosaženo obsahu dopantů Al_2O_3 okolo 10 mol% [30], 15 mol% P_2O_5 a RE^{3+} až 40 000 ppm (obr. 9) a základní útlumy vláken sníženy na úroveň do 100 dB/km. Dopování jádra oxidem hliníovým vedlo k odstranění centrálního provalu (dípu) na profilu indexu lomu a vzhledem k tomu, že profily koncentrací RE jsou podobné profilu koncentrace oxidu hliníového, umožnilo to soustředění RE okolo osy jádra (obr. 10).

Paralelní rozvoj metody sol-gel na pracovišti umožnil přípravu dopovaných vláken kombinací postupů MCVD a sol-gel, kdy vrstva jádra byla namísto depozicí z plynné fáze připravena nanášením z roztoku. Při tomto postupu byl nejprve připraven sol obsahující polysiloxanové řetězce (oxid křemičitý) a koloidní částice dopantů (oxid hliníový, oxid fosforečný). Sol byl nanesen na vnitřní stěnu křemenné trubice metodou namáčení („dip-coating“). Vrstva gelu vzniklá na stěně tvorbou trojrozměrné sítě z řetězců a částic solu



Obr. 11 Koncentrační profil preformy s jádrem $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ - Al_2O_3 - P_2O_5 - SiO_2 připravené kombinací metod MCVD a sol-gel

byla vysušena, čímž byla získána porézní vrstva, která byla dále tepelně zpracována při teplotách do 600 °C. Opakováním tohoto procesu nanášení byla zvýšena tloušťka celkové nanesené vrstvy, která byla poté slinuta za podmínek podobných jako při metodě dopování z roztoku. Tím byly připraveny preformy pro tažení jednoválcových vláken (obr. 11) o parametrech srovnatelných s preformami připravovanými postupem solution-doping [31, 32, 33].

Výzkum rovněž prokázal, že vlastnosti jádra preformy, tj. zejména obsah dopantů, závisí na tloušťce nanesené vrstvy. Pokud tato tloušťka poklesla pod hranici 5 μm , obsahy dopantů byly v důsledku interakce vrstev se substrátovou trubicí nižší. Výsledky metodologických výzkumů byly celkově shrnuty v publikacích např. [34, 35, 36].

5. ZÁVĚR

K.C. Kao dal svou prací zásadní impuls pro výzkum a vývoj optických vláken, jednoho z nejdůležitějších prostředků moderní komunikace. Lze říci, že výzkum optických vláken není uzavřenou kapitolou, ani jeho význam nepoklesl, neboť stále se zvyšující požadavky na rychlejší přenos většího počtu informací stimulují výzkum nových vláknových struktur jak pro telekomunikační linky, tak zdroje záření, tj. vláknové lasery. Samostatnou kapitolu ve výzkumu pak reprezentují vláknové senzory. K tomuto výzkumu přispělo za 30 let své existence i pracoviště (SLS, ÚCHSKM) ÚFE, na jehož půdě bylo dosaženo řady původních výsledků zahrnující např. preformy pro tažení speciálních vláken pro senzory, vláknové lasery a zesilovače. Tyto výsledky a zejména získané zkušenosti výzkumného týmu dávají dobrý předpoklad pro implementaci nových fyzikálních principů (např. nelineární optické jevy) i nových metod přípravy, jako je využití nanočástic v nových typech preforem pro tažení optických vláken, a pokračování takového výzkumu i v budoucnosti.

Poděkování

Výzkum je podporován Grantovou agenturou České republiky, grant č. 102/10/2139.

Literatura

- [1] K.C. Kao, G.A. Hockham, Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies, Proc. IEE, 113, No.7, July 1966, 1151-1158.
- [2] D.B. Keck, P.C. Schultz, Method of producing optical waveguide fibers, US patent 3,711,262.
- [3] D.B. Keck, R.D. Maurer, P.C. Schultz, On the ultimate lower limit of attenuation in glass optical waveguides, Appl. Phys. Lett. 22 (1973) 307.
- [4] J.B. McChesney, New technique for preparation of low-loss and graded-index optical fibers, Proc. IEEE 62 (1974) 1280.
- [5] S.E. Miller, A.B. Chynoweth, Optical fiber telecommunications, Academic Press, Orlando USA, 1979.
- [6] J.M. Senior, Optical fiber communications: principles and practice, Pearson Education 2008, 169-216.
- [7] V. Matějec, Z. Choc, Fyzikálně chemický model procesu MCVD, Sb. Opt. Komunikace, Ed. C. Anderle, ČSVTS, str. 54-55, 1986.
- [8] M. Karasek, Calculated bandwidth of perturbed multimode optical fibers, Studies in Electrical and Electronic Engineering (1986) 297-299.
- [9] E. Desurvire, The golden age of optical fiber amplifiers, Physics Today, 1994, 28, překlad M. Chomát, Čs. časopis pro fyziku, 44 (1994) 183-191.
- [10] I. Kasik, V. Matejec, M. Chomat, M. Hayer, D. Berkova, Optical fibres for optical sensing, Optical chemical sensors, Dordrecht: Springer, 2006, 59-76.
- [11] I. Kasik, V. Matejec, M. Chomat, M. Hayer, D. Berkova, J. Mrazek, J. Skokankova, Silica-based optical fibres with tailored refractive-index profiles in the region of 1.46-1.52 for evanescent-wave chemical detection, Sensors and Actuators: B 107 (2005) 93-97.
- [12] J. Kirchhof, S. Unger, B. Knappe, P. Kleinert, A. Funke, About the fluorine chemistry in MCVD, Cryst. Res. Technol 22 (1987) 495-501.
- [13] M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, S.L. Semenov, V.F. Khopin, M.Y. Salganskii, A.N. Gur'yanov, E. M. Dianov, Optical losses in single-mode and multimode fibres heavily doped with GeO_2 and P_2O_5 , Quantum electronics 34 (2004) 241-246.
- [14] M. Chomat, D. Berkova, V. Matejec, I. Kasik, J. Kanka, R. Slavik, A. Jancarek, P. Bittner, Responses of a long-period gratings fabricated in a graded-index optical fiber to temperature and refractive-index changes, Materials Science and Engineering C 26 (2006) 457-461.
- [15] F. Todorov, M. Chomat, D. Berkova, J. Ctyroky, V. Matejec, I. Kasik, Sensitivity characteristics of long-period gratings written with a CO_2 laser in fiber with parabolic-index cladding, Sensors Lett. 7 (2009) 1-5.
- [16] P. Siska, J. Skapa, V. Vasinek, F. Hanacek, I. Kasik, Optical fiber sensor based on redistribution of power among several guided modes, Proc. SPIE 7356, Optical Sensors 2009, 73561G-1 – 73561G-7.
- [17] I. Kasik, O. Sysala, J. Gotz, Dopování křemenných vláken netradičními dopanty, Ceramics 36 (1992) 169-179.
- [18] V. Matejec, I. Kasik, M. Pospisilova, Preparation and optical properties of silica optical fibers with an Al_2O_3 -doped core, J. Non-Cryst Solids 192&193 (1995) 195-198.
- [19] V. Matejec, I. Kasik, M. Hayer, D. Berkova, M. Chomat, J. Skokankova, Fabrication of silica optical fibers doped in the core with aluminium oxide and rare-earth elements by using xerogels, Roumanian J. of Chemistry 47 (2002) 1233-1239.
- [20] M. Pospisilova, P. Adamek, P. Peterka, V. Kubecek, I. Kasik, V. Matejec, Influence of Si-Al-Ge-Sb matrices on Tm^{3+} excitation levels, Materials Science Forum IV 587-588 (2008), 293-297.
- [21] I. Kasik, V. Matejec, M. Pospisilova, J. Kanka, J. Hora, Silica optical fibers doped with Yb^{3+} and Er^{3+} , Proc. SPIE 2777 - ALT 95 (1995) 71-79.
- [22] W. Blanc, P. Peterka, B. Faure, B. Dussardier, G. Monnom, I. Kasik, J. Kanka, D. Simpson, G. Baxter, Characterization of thulium-doped silica-based optical fibre for S-band amplification, Proc. SPIE 6180 - Photonics Prague (2005) 61800V. 1-61800V. 6.
- [23] P. Peterka, I. Kasik, V. Matejec, W. Blanc, B. Faure, B. Dussardier, G. Monnom, V. Kubecek, Thulium-doped silica-based optical fibers for cladding-pumped fiber amplifiers, Optical Materials 30 (2007) 174-176.

- [24] V. Matejec, I. Kasik, M. Hayer, D. Berkova, M. Chomat, J. Skokankova, Fabrication of silica optical fibers doped in the core with aluminium oxide and rare-earth elements by using xerogels, *Roumanian J. of Chemistry* 47 (2002) 1233-1239
- [25] M. Makowska, I. Kityk, J. Berdowski, V. Matejec, I. Kasik, A. Mefleh, Nonlinear optical phenomena in the Al_2O_3 - P_2O_5 , Er- and Yb-doped silica glasses, *Pure and Appl. Opt.* 2 (2000) 43-47.
- [26] S. Moon, A. Lin, B.H. Kim, P.R. Watekar, W-T. Han, Linear and nonlinear optical properties of the optical fiber doped with silicon nano-particles, *J. Non-Cryst. Solids* 354 (2008) 602-606.
- [27] O. Podrazky, I. Kasik, M. Pospisilova, V. Matejec, Use of nanoparticles for preparation of rare-earth doped silica fibers, *Physica Status Solidi C* 6 (10) (2009) 2228-2230.
- [28] O. Sysala, I. Kasik, I. Spejtkova, Preparation of preforms and optical fibres containing aluminium by the solution doping method, *Ceramics* 35 (1991) 363-367.
- [29] I. Kasik, V. Matejec, J. Kanka, P. Peterka, P. Honzatko, A. Langrova, Using aerosol-based techniques and solution-doping for fabrication of optical fiber lasers, *Roumanian J. of Chemistry* 47 (2002) 1241-1245.
- [30] I. Kasik, V. Matejec, J. Kanka, P. Honzatko, Properties and fabrication of ytterbium-erbium co-doped silica fibres for high power fiber lasers, *Pure and Appl. Opt.* 7 (1998) 457-465.
- [31] V. Matejec, I. Kasik, D. Berkova, M. Hayer, J. Kanka, Sol-Gel fabrication and properties of silica cores of optical fibers doped with Yb^{3+} , Er^{3+} , Al_2O_3 , or TiO_2 , *J. Sol-Gel Sci. & Technol.* 13 (1998) 617-621.
- [32] M. Hayer, V. Matejec, D. Berkova, I. Kasik, J. Kanka, P. Peterka, P. Honzatko, Effect of high-temperature treatment on optical properties of silica films doped with Al_2O_3 , P_2O_5 and rare-earth elements, *J. Sol-Gel Sci. and Technol.* 19 (2000) 293-296.
- [33] V. Matejec, M. Hayer, J. Mrazek, I. Kasik, O. Podrazky, M. Pospisilova, Performance of the sol-gel method for the preparation of optical fibers, *Revue Roumaine de Chimie* 52 (10) (2007) 991-998.
- [34] I. Kasik, V. Matejec, New ways for influencing thermoforetic efficiency in the MCVD process, *J. Aerosol. Sci.* 26 (1995) 399-406.
- [35] V. Matejec, I. Kasik, M. Chomat, Chapter 13: Fundamentals and performance of the MCVD aerosol process, *Aerosol chemical processes in the environment*, Levis 2000, 271-296.
- [36] V. Matejec, I. Kasik, D. Berkova, M. Hayer, M. Chomat, Z. Berka, A. Langrova, Properties of optical fiber preforms prepared by inner coating of substrate tubes, *Ceramics* 45 (2001) 62-69.

Dr. Ing. Ivan Kašík, tel.: 220 922 391, e-mail: kasik@ufe.cz

Ing. Vlastimil Matějec, CSc., Ing. Ondřej Podrazký, PhD., Ing. Pavel Peterka, PhD., Ing. Jan Mrázek, Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 - Kobylisy

Technické pokyny pro autory

Příspěvky se přijímají v elektronické formě.

Požadavky na textovou část: Text musí být pořízen v editoru MS WORD, doporučuje se font Times New Roman, velikost písma 12, dvojitě řádkování, formát stránky A4. Ve všech částech příspěvku používejte stejný font. Text pište do jednoho sloupce se zarovnáním k levému okraji, klávesu ENTER používejte pouze na konci odstavce.

Rovnice a vzorce uváděné na samostatných řádcích musí být vytvořeny modulem pro matematiku editoru MS WORD, rovnice a vzorce, které jsou součástí textu na řádku, zapisujte pomocí vložených symbolů, nikoliv zmíněným modulem. Při psaní matematických a chemických výrazů dodržujte základní pravidla: Veličiny pište kurzívou, matice tučně stojatě (antikva), vektory a skaláry tučnou kurzívou. Úplný (totální) diferenciál „d“ vždy stojatě. Ludolfovo číslo „π“ stojatě. Indexy, pokud vyjadřují veličinu, pište kurzívou, v opačném případě stojatě (např. max, min apod.). Imaginární jednotku „i“ stejně jako „j“ v elektrotechnice pište stojatě.

Dodržujte pravidla českého pravopisu; za interpunkčními znaménky je vždy mezera. Rovněž tak před a za znaménky „+“, „-“, „=“ apod. je vždy mezera.

Požadavky na obrázky a grafy: Grafickou část příspěvku nevěleňujte do textu, ale dodávejte ji jako samostatné grafické soubory typu *.CDR, *.EPS, *.TIF, *.JPG a *.AI (vektorovou grafiku jako

*.EPS nebo *.AI soubory, bitmapovou grafiku jako *.TIF nebo *.JPG soubory). V žádném případě nedodávejte obrázek v souboru typu *.doc. Bitmapové soubory pro černobílé kresby musí mít rozlišení alespoň 600 dpi, pro černobílé fotografie nejméně 200 dpi a pro barevné nejméně 300 dpi. Při generování obrázků v COREL DRAW do souboru typu *.EPS převedte text do křivek. U souborů typu *.JPG používejte takový stupeň komprese, aby byla zachována co nejlepší kvalita obrázku. Velikost písma v obrázcích by neměla klesnout pod 1,5 mm (při předpokládané velikosti obrázku po zalomení do tiskové strany).

Pokyny k předávání příspěvku

Ke každému textu nebo grafice musí být přiložen kontrolní výtisk nebo fotografie.

Dále je třeba, aby k článku autor dodal překlad resumé a názvu článku do anglického (českého – slovenského) jazyka, klíčová slova, jména všech autorů včetně titulů, jejich plných adres, telefonického spojení a případně e-mailové adresy.

Soubory je možno dodat na disketě nebo CD. Ke každému příspěvku připojte seznam všech předávaných souborů a u každého souboru uveďte pomocí jakého software byl vytvořen.

Příspěvky zasílejte na adresu: Redakce časopisu JMO, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov.

Tažení optických vláken v Ústavu fotoniky a elektroniky

Článek se zabývá procesem tažení optických vláken na základě výsledků výzkumu Oddělení optických vláken Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i. (ÚFE). Je v něm uveden souhrn základních procesů ve skelných materiálech při tažení vláken z preformy i popis unikátních experimentálních zařízení v ÚFE. Dále jsou ukázány příklady výsledků tažení vláken dopovaných prvky vzácných zemin s kruhovým i nekruhovým průřezem pro vláknové lasery a zesilovače. Článek rovněž popisuje tažení speciálních vláken pro optické vláknové senzory jako jsou sektorová vlákna, vlákna s invertovaným gradientním profilem, vlákna z nízkotavitelných optických skel, vlákna chalkogenidová i vlákna mikrostrukturální. V závěru se článek zabývá kontinuálním tažením vláken pokrytých nanočásticemi anatasu pro fotokatalýzu.

Klíčová slova: tažení, optické vlákno, laser, zesilovač, sensor

1. ÚVOD

Tažení optických vláken je proces tváření výchozích materiálů do výsledného tvaru, jehož příčné rozměry jsou mnohem menší než rozměry podélné. Tento tvar je u většiny optických vláken válcový. Připravit optické vlákno reprezentuje přetvořit výchozí materiál tak, aby vlákno mělo požadované fyzikální vlastnosti. To znamená jednak splnění základních požadavků, že vlákno musí mít jádro obklopené optickým pláštěm s nižším indexem lomu a musí být propustné pro světlo. K tomu mohou přistoupit požadavky na úroveň optických ztrát jádra a pláště, jejich absorpční a luminiscenční vlastnosti, rozsah změn rozměrů jádra a pláště vlákna s délkou vlákna (u kónicky zúžených vláken - taperů), fyzický přístup k jádru, atp. Navíc, vlákno musí mít mechanické vlastnosti takové, že je s ním možné provádět měření, brousit a leštit je, konektorovat, kabelovat atp.

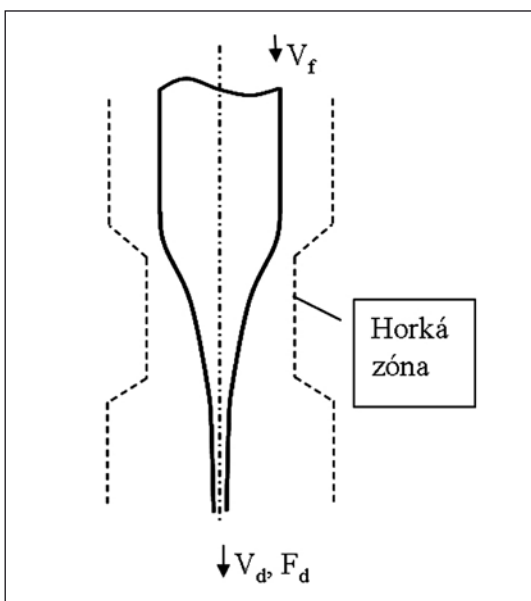
Výchozí materiály pro tažení optických vláken jsou obvykle materiály skelné, ale optická vlákna byla připravena i z polymerů [1, 2] a látek krystalických jako je safír nebo halogenidy stříbra (AgCl, AgBr, ZnCl₂) [3]. Při tažení optických vláken ze skelných a polymerních materiálů existuje řada podobných rysů, které nelze nalézt u přípravy vláken z krystalů. Proto jsou u těchto materiálů

optická vlákna tažena z taveniny nebo formována protlačováním materiálu tryskou při teplotách nižších než bod tání [3].

V případě skelných materiálů se využívá spojitého přechodu mezi kapalnou a pevnou fází. Výchozí materiál je v horké zóně pece ohřát na teploty zajišťující viskozitu řádově 10³ - 10⁵ Pa.s. Při tomto ohřátí dojde pod vlivem tažné síly (F_d), viskózních napětí a povrchového napětí k protažení a zúžení materiálu v horké zóně pece (viz obr. 1). Na výstupu z horké zóny v důsledku snížení teploty dojde ke zvýšení viskozity materiálu a k novému skelnému přechodu (viskozita 10^{13,3} Pa.s). Tím transportní procesy hybnosti, energie i látek v materiálu „zamrznou“ a proces tváření se zastaví.

U skelných materiálů můžeme pro proces tažení optických vláken nalézt tři hlavní experimentální uspořádání, kterými jsou metoda jednoduchého nebo dvojitého kelímku, metoda tyč v trubce a tažení z preformy [4]. U metody tažení z kelímku je výchozí materiál umístěn do kelímku a zahřát na teplotu zajišťující jeho viskozitu v řádu 10³ - 10⁴ Pa.s. To umožní tok tohoto materiálu otvorem (tryskou) ve dně kelímku a po ochlazení pod tryskou tvorbu vlákna. Naopak u dalších dvou metod jsou viskozity při procesu tažení vyšší a výchozí materiály jsou do horké zóny pece podávány rychlostí V_f a taženy rychlostí V_d .

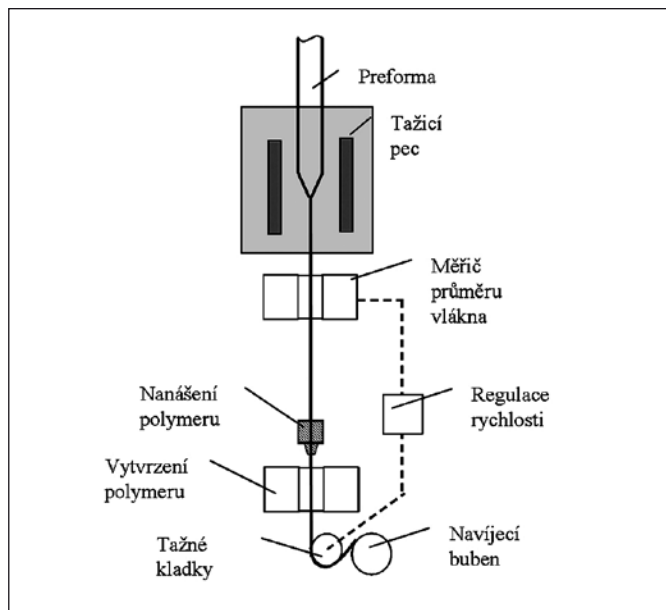
V dnešní době se pro přípravu optických vláken využívá zejména tažení optického vlákna z preformy. Ačkoliv preforma má vlastnosti nezbytné k tomu, aby vytažené vlákno mělo navržené fyzikální vlastnosti, není proces tažení vlákna čistě mechanické zmenšení průměru preformy na průměr vlákna. Každou preformu lze na základě jejích vlastností charakterizovat určitým rozsahem klíčových podmínek procesu tažení, tj. teploty tažení, rychlosti podávání, rychlosti tažení atp. Tyto podmínky musí zajistit tažení preformy jako celku (ne pouze jádra nebo pláště) ve formě vlákna, ne v kapkách nebo krátkých úsecích, musí zamezit tvorbě krystalů, omezit difuzní procesy ve skle, atp. Určení klíčových proměnných tohoto procesu je obsahem základního výzkumu přípravy optických vláken, k němuž přispívá i Oddělení optických vláken Ústavu fotoniky a elektroniky (ÚFE) a to v oblasti přípravy optických vláken využívajících oxidická a chalkogenidová skla. Tento výzkum využívá téměř třicetiletou zkušenost klíčových osobností oddělení při výzkumu přípravy optických vláken i unikátní experimentální zařízení pro tuto přípravu instalovaná v oddělení. Těsné propojení s teoretickým a experimentálním výzkumem vlastností vláken v ÚFE umožňuje výzkum v oddělení zaměřit na nové a původní struktury optických vláken. Podmínky tažení vybraných typů těchto vláken a jejich fyzikální charakteristiky jsou popsány dále v tomto článku.



Obr. 1 Schéma protažení preformy v horké zóně tažící pece

2. EXPERIMENTÁLNÍ ZAJIŠTĚNÍ

Oddělení optických vláken ÚFE je vybaveno dvěma experimentálními tažicími zařízeními o výškách asi 7 m (viz foto v odkazu [5]). Tato zařízení jsou jediná v rámci ČR. Schéma tažicího zařízení je na obr. 2. Jedno zařízení pracuje s grafitovou odporovou pecí Centor (USA), druhé s podobnou pecí fy. Special Gas (UK). Obě pece jsou použitelné pro tváření preforem při teplotách 1500-2300 °C. Tyto grafitové pece umožňují tažení vláken z preforem o průměru maximálně 21 mm a délce do 1000 mm. Na jednom z tažicích zařízení je dále nainstalována odporová pec s keramickým elementem pro tažení vláken při teplotách 200-1000 °C (Krička s.r.o., ČR). U vlákna vycházejícího z pece je měřen průměr. K měření jsou používány laserové měřiče průměru vyvinuté v ÚFE nebo v ID Lab s.r.o., ČR. Údaje z měřiče průměru vstupují do jednotky regulace rychlosti tažení, kde se používají jako vstupní údaj pro proporcionálně-integračně-derivativní regulátor. V oddělení se používá jedna regulační jednotka vyvinutá v ÚFE, druhá byla vyvinutá v ID Lab s.r.o., ČR.



Obr. 2 Schéma tažicího zařízení

Po výstupu z měřiče průměru prochází vlákno jednotkou na nanášení funkčních vrstev s využitím polymerů nebo koloidních roztoků (soly) [6]. Ta sestává z kovové nebo polymerní trysky doplněné otevřeným zásobníkem. Průchodem vlákna tryskou lze na povrch nanést vrstvu s tloušťkou 0,5-100 μm v závislosti na rozměrech trysky a vlastnostech nanášeného polymeru. Polymerní povrchy mají zejména ochrannou funkci, brání adsorpci vlhkosti na povrchu skla a tím i snížení mechanické pevnosti vlákna.

Vrstva nanesená na vlákno se stabilizuje vytvrzením ve vytvrzovací jednotce, kde dojde k zesíťování polymeru nebo soly. K vytvrzení se používá odporová pec vlastní konstrukce s teplotami do 500 °C. Dále jsou na obou zařízeních instalovány jednotky pro UV vytvrzování nanášených materiálů (Heathway, USA).

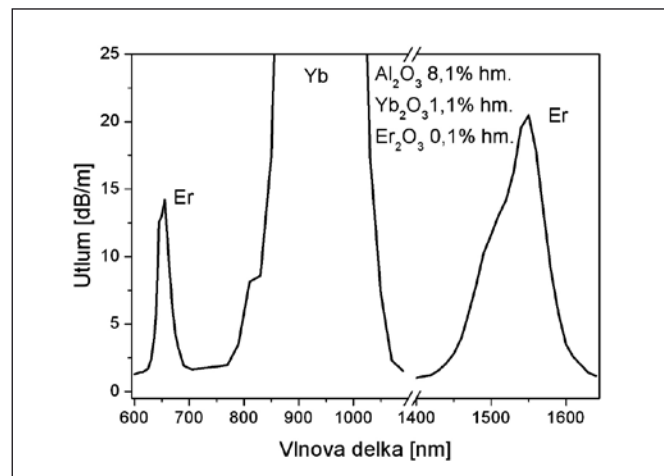
Vlákno vystupující z vytvrzovací pece prochází do tažných kladek, jejichž rychlost je řízena z jednotky regulace rychlosti tažení. Různá konstrukce kladek navržených a vyrobených v ÚFE umožňuje tažení vláken s průměry 0,05-5 mm. Po výstupu z kladek vlákno může být navinuto na cívky s průměrem 200-300 mm pomocí navijecího zařízení Heathway (UK).

3. PŘÍPRAVA VLÁKEN

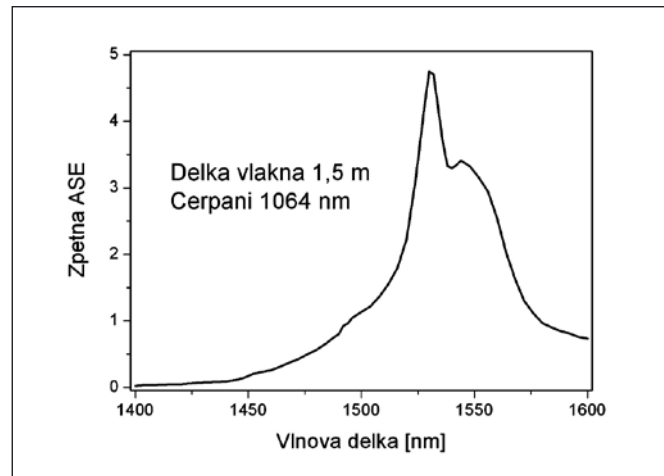
V období po listopadu 1989 se výzkum Oddělení optických vláken zaměřil na procesy tažení speciálních vláken pro vláknové lasery a zesilovače, senzory a fotokatalýzu.

3.1. Vlákna dopovaná prvky vzácných zemin s kruhovým průřezem

Tato vlákna jsou připravena z křemene a dopována v jádře prvky vzácných zemin, erbiem, yterbiem nebo thuliem, které mají požadované absorpční pásy (900-1100 nm) nezbytné pro excitaci luminiscence v oblasti 1450-1550 nm (viz křivku spektrálního útlumu na obr. 3). Tato luminiscence je základním předpokladem pro zesílenou spontánní emisi (ASE, Amplified Spontaneous Emission) v této oblasti odpovídající třetímu telekomunikačnímu oknu - 1550 nm (viz obr. 4). Pro zamezení zhášení luminiscence shlukováním („klastrováním“) iontů je jádro vlákna dopováno oxidem hlinitým a fosforečným v obsahu do 10 mol %. Na křivce spektrálního útlumu těchto vláken lze najít jak pásy charakteristické pro prvky vzácných zemin, tak vyšší základní útlum (na úrovni do 0,1 dB/m) daný jejich přípravou (obr. 3).

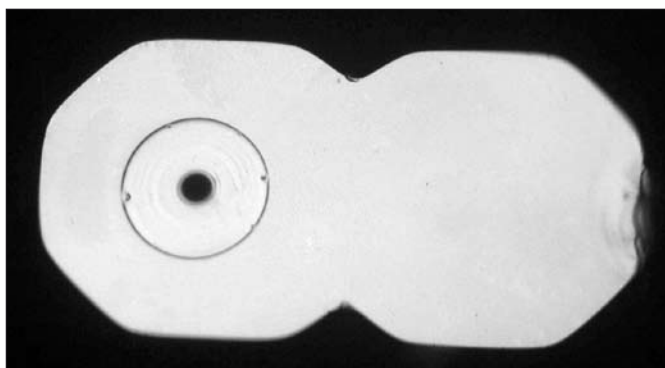


Obr. 3 Spektrální útlum vlákna dopovaného oxidy hliníku, erbia, yterbia



Obr. 4 Zesílená spontánní emise erbia

Proces tažení těchto vláken je analogický procesu tažení telekomunikačních vláken s tím zásadním rozdílem, že viskozita jádra preformy v horké zóně pece je vyšší než viskozita křemenného pláště. To je způsobeno dopováním oxidem hlinitým. Navíc může u těchto materiálů docházet k fázovému odmísení a tím i ke zvýšení základního útlumu. Proto teplota a rychlost tažení musejí vycházet z těchto rozdílů. Při experimentálním výzkumu tažení těchto vláken byla úspěšně připravena řada vzorků. Tyto vzorky, pokryté polymerním ochranným pláštěm z UV vytvrzitelného akrylátu (De Sotto, Nizozemsko), byly úspěšně testovány pro generaci optických solitonů [7]. Další detaily lze nalézt v článku P. Peterky a spol. v tomto čísle.



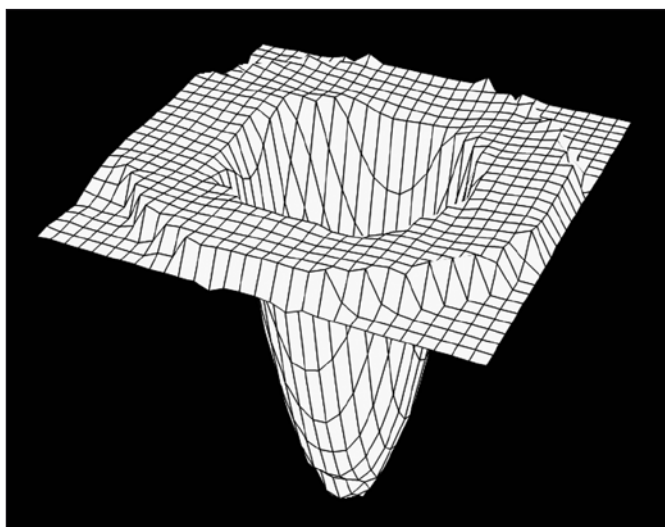
Obr. 5 Průřez vlákna typu stadion (maximální průměr 250 μm)

3.1.1. Vlákna dopovaná prvky vzácných zemin s nekruhovým průřezem

Tato vlákna jsou určena pro vláknové lasery a zesilovače čerpané přes křemenný plášť vlákna. Pro toto čerpání je vlákno pokryté polymerem s indexem lomu nižším než křemen. Používá se polysiloxanový tepelně vytvrditelný polymer nebo fluorovaný UV akrylát s indexem lomu $n_D \sim 1,4$. Pro maximální využití čerpání z nekoherentní vysokovýkonové laserové diody byla v ÚFE teoreticky navržena a připravena vlákna s nekruhovým průřezem typu „stadion“ (viz obr. 5) [8]. Preforma pro tažení vlákna tohoto typu je složena ze dvou částí. Jedna část se připraví broušením a leštěním kruhové preformy dopované v jádře prvky vzácných zemin (viz 3.1.), druhá stejným postupem z křemenné tyčky. Proces tažení takové preformy musí probíhat při teplotách zajišťujících zachování vnějšího tvaru, slnutí obou částí preformy a jejich protažení do vlákna. Tažením při teplotách asi o 100 $^{\circ}\text{C}$ nižších než odpovídá teplotám při tažení standardních vláken byly připraveny vzorky vláken dopovaných yterbiem a erbiem, které byly úspěšně otestovány v různých uspořádáních vláknových laserů [8] (viz P. Peterka a spol. v tomto čísle).

3.2. Vlákna pro vláknové senzory

Tato vlákna mají strukturu navrženou tak, aby na rozdíl od telekomunikačních vláken měla definovanou citlivost k vnějším fyzikálním a chemickým faktorům. V ÚFE jsou zkoumána zejména vlákna pro evanescentní detekci chemických látek. V rámci tohoto výzkumu jsou studovány různé fyzikální přístupy pro zvýšení citlivosti PCS vláken [9]. Navíc byla teoreticky navržena a připravena vlákna s nekruhovým vnějším tvarem, tzv. sektorová s-vlákna nebo kruhová vlákna s invertovaným gradientním profilem indexu lomu, tzv. IGI (Inverted Graded Index) vlákna (viz obr. 6) [9].

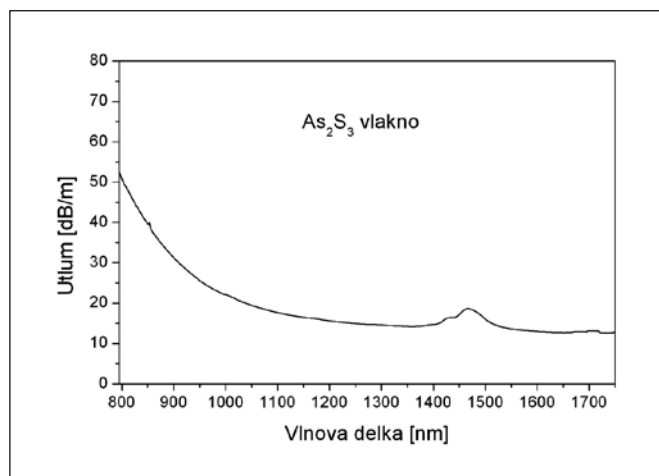


Obr. 6 Tomografický profil indexu lomu IGI vlákna dopovaného v jádře oxidem boritým

Při výzkumu přípravy s-vláken byly určeny rozsahy teplot a rychlosti tažení umožňující vytažení vlákna z broušené preformy, které umožňují potlačit vliv viskózních toků a povrchového napětí analogicky jako v případě tažení vlákna typu stadion. Vlákna byla pokryta polysiloxanovým optickým pláštěm a měla asi pětkrát vyšší citlivost ke změnám absorpčního koeficientu pláště než PCS vlákna [9].

Pro přípravu mnohavidových IGI vláken bylo nutné vypracovat postupy pro odstranění vnější křemenné části preformy bez narušení IGI jádra a jeho popraskání v důsledku vysokých koncentrací oxidu boritého nebo germaničitého. K tomu bylo využito chemické odleptávání křemene směsí obsahující kyselinu fluorovodíkovou. Z takto opracovaných preform byly vytaženy vzorky IGI vláken s optickým pláštěm z polysiloxanového polymeru s citlivostí ke změnám indexu lomu v rozmezí indexu lomu 1,44 - 1,48 [10]. Nižší hodnota odpovídala dopování jádra oxidem boritým, vyšší oxidem germaničitým. Vysoká úroveň dopování jádra IGI vláken je spojená s teplotami tažení nižšími o 100-300 $^{\circ}\text{C}$ ve srovnání s telekomunikačními vlákny.

Pro rozšíření oblasti citlivosti k chemickým látkám byla v ÚFE zkoumána vlákna z vícekomponentních oxidických skel. Tato skla mají teploty měknutí asi 900-1100 $^{\circ}\text{C}$. Proto pro tváření komerčně dostupných tyčinek (F2 sklo - $n_D = 1,63$, Schott, SRN) byla použita odporová pec s keramickým elementem. Tato vlákna byla pokryta polysiloxanovým optickým pláštěm a ve spolupráci s Ecole Centrale de Lyon byla využita pro výzkum síťování epoxidových polymerů doprovázený zvýšením indexu lomu a tedy snížením intenzity světla procházejícího vláknem [11].

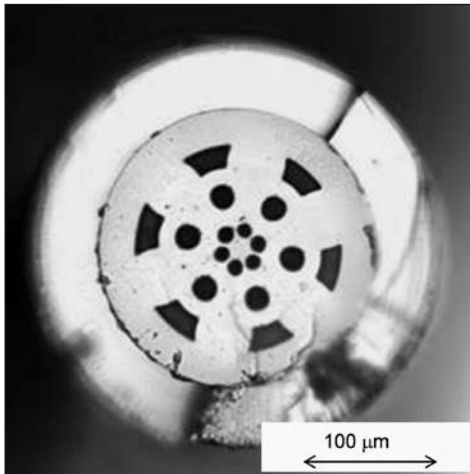


Obr. 7 Spektrální útlum chalkogenidového vlákna připraveného v ÚFE

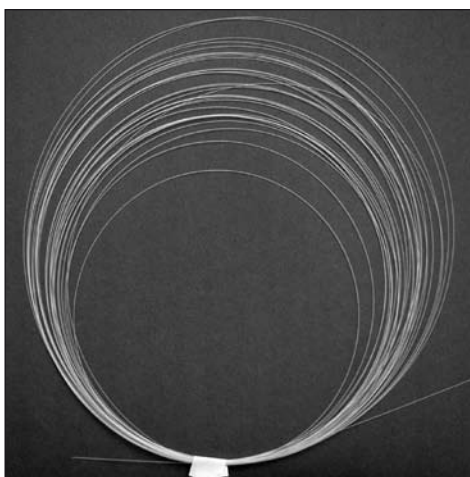
Pro detekci změn absorpčního koeficientu ve střední infračervené oblasti mohou být použita vlákna chalkogenidová. V ÚFE byla tato vlákna tažená z tyčinek sulfidu arsenu připravených v Ústavu anorganické chemie AV ČR, v.v.i. K tažení těchto materiálů při teplotách asi 400 $^{\circ}\text{C}$ bylo nutné upravit pec s keramickým elementem tak, aby v horké zóně pece byla inertní atmosféra argonu potlačující oxidaci materiálů. Vlákna byla pokryta UV-vytvrditelným akrylátem. Jejich spektrální útlum je ukázán na obr. 7.

Pro chemickou detekci jsou v ÚFE zkoumána i vlákna mikrostrukturální. Tato vlákna jsou charakterizována řadou vzduchových děr v optickém plášti, které mohou být naplněny detekovanými chemikáliemi. Vlákna jsou obvykle připravena z čistého křemene. Proces přípravy vláken spočívá v sestavení výchozího svazku trubiček a centrální tyčinky jejich upevnění v obalové trubici a protažení do vlákna [12]. V tomto případě byl výzkum procesu přípravy zaměřen na určení vztahu mezi rozměrem trubic, teplotou tažení a tlakem uvnitř trubic. Pro studium poslední procesní proměnné bylo vyvinuto několik technických přístupů umožňujících řídit přetlak uvnitř trubiček.

Byly připraveny různé struktury mikrostrukturálních vláken (příklad viz obr. 8). Pro zvýšení citlivosti mikrostrukturálních vláken k plynným uhlovodíkům nebo kyslíku byly na stěnu vzduchových děr naneseny pórézní detekční vrstvy s využitím modifikace metody sol-gel vypracované v oddělení [13]. U mikrostrukturálních vláken připravených v ÚFE byla prokázána citlivost k plynnému toluenu pro koncentrace vyšší než 0,03 mol. % a k plynnému kyslíku pro koncentrace nad 0,5 mol. %. Další struktury mikrostrukturálních vláken jsou popsány v článkách V. Matějce a T. Martana a spol. v tomto čísle.



Obr. 8 Mikrostrukturální vlákno navrženo a testované pro detekci kyslíku



Obr. 9 Foto křemenného vlákna pokrytého porézní vrstvou nanočástic anatazu

3.3. Vlákná pro fotokatalýzu

Při přípravě těchto vláken byla zkoumána možnost nanést na křemenná vlákna vrstvu nanočástic anatazu, který fotokatalyzuje řadu chemických reakcí. Taková vlákna by bylo možno využít ve fotokatalytických reaktorech, při rozkladu látek v nepřístupných místech atp. V oddělení byl zkoumán originální postup, kdy vrstva fotokatalyzátoru je nanášena během tažení vláken s použitím nanášecí trysky, tedy analogicky jako polymerní vrstva [6]. Tím lze připravit vlákna v délce několika metrů. Pro tento postup bylo nutné určit vlastnosti nanášené disperze i jejího tepelného vytvrzování, které umožní získat kompaktní pórézní vrstvu. Připravená vlákna (viz obr. 9) měla dobrou fotokatalytickou účinnost pro rozklad metylenové modří v roztoku.

4. ZÁVĚRY

Příklady výsledků tažení vláken popsané výše ukazují, že pracovníci ÚFE navrhli, připravili a charakterizovali řadu původních vláknově optických struktur pro vláknově optické lasery a zesilovače nebo senzory chemických látek. Tyto možnosti byly využity ve dvou projektech Evropské unie (FP5 a FP6) pro přípravu vláken se speciálními povrchy organicky modifikovaných siloxanů (ORMOCER®) ve spolupráci mj. s Fraunhofer Institute for Silicate Research ve Würzburgu. Byly základem i mezinárodní spolupráce na výzkumu senzorů pro sledování vlastností polymerních kompozitů s Ecole Centrale de Lyon nebo výzkumu fotokatalytických procesů s Universitou v Rennes. V oddělení je dostupná řada vzorků různých typů speciálních vláken, jsou zde podmínky pro výzkum a vývoj vláken pro praktické aplikace.

Poděkování:

Tento výzkum byl podpořen AV ČR (výzkumný záměr AV0Z20670512).

Literatura

- [1] J. Zubia, J. Arrue, Plastic optical fibers: An introduction to their technological processes and applications, *Optical Fiber Technology* 7, str. 101-140, 2001.
- [2] M. Šorm, Polymerní světlovody – dnes a zítra, Sb. *Optické komunikace* 1986, Ed. C. Anderle, Praha 8.-10.4. 1986, str. 105 a106, 1986.
- [3] J.A. Harrington, Infrared fiber optics, *Handbook of Optics*, Vol. 4, Chapter 14, Mc Graw Hill, http://irfibers.rutgers.edu/ir_rev_index.html
- [4] J. M. Senior, *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*, Third Edition, Pearson Prentice Hall 2008, str. 169-216.
- [5] Více než 25 let základního výzkumu silikátů v Československé akademii věd, *Sklář a keramik* Vol. 39(3), str. 9-10, 1989.
- [6] V. Matejec, M. Hayer, P. Pavlovic, M. Kubeckova, G. Kuncova, M. Guglielmi, Effect of preparation of sol-gel coatings on the strength of optical fibres, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* Vol. 5(3), str. 193-199, 1995
- [7] I. Kasik, V. Matejec, J. Kanka, P. Honzato, Properties and fabrication of ytterbium-erbium co-doped silica fibres for high-power fibre lasers, *Pure Appl. Optics* Vol. 7(3), str. 457-465, 1998.
- [8] P. Peterka, I. Kasik, V. Matejec, V. Kubecek, P. Dvoracek, Experimental demonstration of novel end-pumping method for double-clad fiber devices, *Opt. Lett.* Vol. 31(22), str. 3240-3242, 2006.
- [9] V. Matejec, M. Chomat, M. Hayer, I. Kasik, D. Berkova, F. Abdelmalek, N. Jaffrezic-Renault, Development of special optical fibers for evanescent-wave chemical sensing, *Czech J. Phys* Vol. 49(5), str. 883-888, 1999.
- [10] I. Kasik, V. Matejec, M. Chomat, M. Hayer, J. Mrazek, J. Skokankova, Silica-based optical fibres with refractive index profiles tailored in a region of 1.46-1.62 for fibre-optic chemical detection, *Sens. Actuators B-Chemical* Vol. 107(1), str. 93-97, 2005.
- [11] E. Chailleux, M. Salvia, N. Jaffrezic-Renault, V. Matejec, I. Kasik, In situ study of the epoxy cure process using a fibre-optic sensor, *Smart Mater. Struct.* Vol. 10(2), str. 194-202, 2001.
- [12] J. Mrazek, V. Matejec, I. Kasik, M. Hayer, D. Berkova, Application of the sol-gel method at the fabrication of microstructure fibers, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* Vol. 31(1-3), str. 175-178, 2004.
- [13] V. Matejec, J. Mrazek, M. Hayer, O. Podrazky, J. Kanka, I. Kasik, Sensitivity of microstructure fibers to gaseous oxygen, *Mater. Sci. Eng. C-Biom. Supramol. Systems* Vol. 28(5-6), str. 876-881, 2008.

Ing. Vlastimil Matějce, CSc., tel.: 266 773 404, e-mail: matejec@ufe.cz

Ing. Ondřej Podrazký, PhD., Ing. Jan Mrázek, Ing. Pavel Peterka, PhD., Ing. Miloš Hayer, CSc.

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 - Kobylisy

Zúžená optická vlákna

Článek se zabývá zúženými optickými vlákny, jejich přípravou a využitím pro sensorové aplikace. Zúžením telekomunikačních vláken nebo mikrostrukturálních vláken s velkými plášťovými otvory lze dosáhnout většího překryvu evanescentní vlny s analytem, čímž se zvýší citlivost detekce ve srovnání s nezúženou strukturou. Zalomené zúžené optické vlákno s imobilizovaným opticko-chemickým převodníkem na špičce bylo využito jako optická vláknová sonda pro měření pH. Příprava navržených zúžených jednovidových nebo mikrostrukturálních optických vláken byla realizována na počítačem řízeném zařízení vlastní konstrukce.

Klíčová slova: jednovidové optické vlákno, mikrostrukturální optické vlákno, zúžené optické vlákno, evanescentní vlna, detekce analytu

1. ÚVOD

Charles Kuen Kao získal v roce 2009 polovinu Nobelovy ceny za fyziku za přínos v oblasti přenosu světla optickými vlákny. Vláknové vlnovody prošly od doby, kdy K. C. Kao a G. A. Hockham publikovali klíčové myšlenky [1] více než 40 letým vývojem. Telekomunikační optická vlákna jsou dnes využívána nejen k dálkovému přenosu dat, ale společně se speciálními vlákny slouží k výrobě vláknových komponent, jakými jsou zúžená optická vlákna. Příklad podélné struktury zúženého jednovidového optického vlákna je na obr. 1. První zóna je tvořena původním jednovidovým vláknem, obvykle o vnějším průměru 125 μm . Tento úsek je označen jako l_1 . Přečody, tedy oblasti s měnícím se průměrem, jsou označeny jako l_2 a tzv. pas s konstantním průměrem, tvořící centrální oblast zúženého vlákna, je označen jako l_3 . Pro index lomu dopovaného jádra n_1 a index lomu křemenného pláště optického vlákna n_2 platí, že $n_1 > n_2$. Průměr pasu zúženého vlákna závisí na aplikaci, ale obvykle se pohybuje v rozmezí jednotek až desítek mikrometrů. Existují ale případy zúžených vláken, kdy pas dosahuje průměru několika stovek nanometrů nebo dokonce méně než 100 nm [2]. Délka pasu zúženého vlákna je opět závislá na aplikaci a pohybuje se obvykle v rozsahu milimetrů až po metry.

Pro velmi tenké pasy s průměrem jednotek mikrometrů nebo stovek nanometrů již dopované jádro z hlediska vedených vidů prakticky zaniká. Světlo je tedy vedeno celým průměrem pasu a vystupuje ještě dále do prostředí obklopující pas v podobě evanescentní vlny, která se šíří podél rozhraní (křemen-vzduch). Zúžená optická vlákna s tenkými pasy lze proto využít pro detekci

založenou na překryvu evanescentní vlny s analytem. Světlo vedené podél rozhraní křemenného pasu zúženého vlákna reaguje na změnu indexu lomu nebo absorpčního koeficientu v okolí pasu. Čím větší je překryv evanescentní vlny s analytem, tím vyšší je citlivost detekce. Zúžená optická vlákna tak mohou být využita jako velmi citlivé evanescentní chemické nebo biochemické senzory.

Zúžená optická vlákna vhodná pro sensorové aplikace je možno vyrobit nejen z telekomunikačních vláken, ale i ze speciálních vláken, včetně vláken mikrostrukturálních.

Mikrostrukturální optická vlákna (MOF, Microstructured Optical Fibres) jsou novým typem optických vlnovodů, které jsou vláknovou realizací 2-D fotonických krystalů [3, 4, 11]. Unikátní vlastnosti MOF jsou založené na velkém kontrastu indexů lomu mezi křemenným sklem a vzduchem v plášťových otvorech. MOF jsou nejčastěji vyráběná z křemenného skla s plným jádrem. Jádro je obklopené (periodickým) systémem axiálních vzduchových otvorů tvořících plášť vlákna. Axiálními otvory mohou proudit různé plyny nebo kapaliny, které mění efektivní index lomu pláště. Toho lze využít pro detekci analytů procházejících plášťovými otvory MOF.

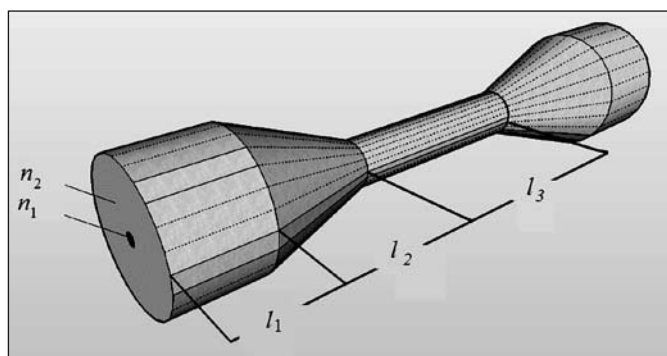
Článek se zabývá zúženými optickými vlákny na bázi jednovidových vláken nebo MOF pro sensorové aplikace. Zalomená zúžená jednovidová vlákna byla navržena a vyrobena jako optické sondy s jemným prostorovým rozlišením. Zúžená jednovidová vlákna nebo zúžená MOF byla připravena na zařízení vlastní konstrukce.

2. PŘÍPRAVA ZÚŽENÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN

Zúžené optické vlákno je vláknová komponenta vznikající obvykle jako následující technologický krok po vytažení optického vlákna. Zúžená vlákna se vyrábějí sofistikovanými způsoby využívající např. CO₂ laseru, elektrického oblouku, tažící věže s grafitovou pecí nebo řízeného zužování vlákna s regulovaným plynovým hořákem [5, 6].

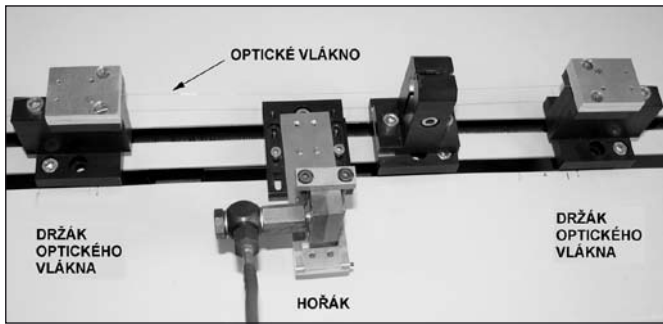
Pro reprodukovatelnou přípravu zúžených optických vláken bylo zkonstruováno počítačem řízené zařízení využívající ohřev plamenem. Princip zužování byl založen na lokálním ohřevu úseku vlákna, jehož konce byly taženy opačnými směry. Na tomto zařízení byla vyvinuta technologie přípravy nejen telekomunikačních, ale i mikrostrukturálních optických vláken [7, 8]. Na obr. 2 je fotografie mechanické části zařízení pro přípravu zúžených vláken, které bylo navrženo a zkonstruováno pro práci ve vodorovné poloze.

Pro ohřev vlákna bylo využito směsi plynů propan-butan-kyslík, jejichž průtoky byly regulovány. Mechanická část zařízení je tvořena dvěma pohyblivými držáky, ve kterých je upevněno optické



Obr. 1 Symetrická podélná struktura zúženého jednovidového optického vlákna:

l_1 – oblast původního vlákna l_2 – přečod, l_3 – pas,
 n_1 – index lomu jádra, n_2 – index lomu pláště optického vlákna

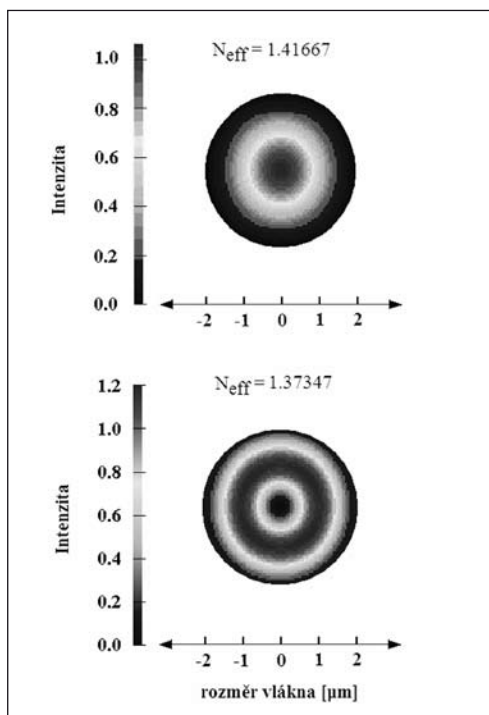


Obr. 2 Zařízení určené pro přípravu kónicky zúžených optických vláken

vlákna. Při procesu zužování optického vlákna se mezi držáky vlákna, pohybujícími se navzájem opačnými směry, pohybuje plynový hořák zleva doprava. Pohybem hořáku je přesně definována tzv. horká zóna, v níž je postupně formován pas zúženého vlákna. Hořák i držáky vlákna jsou poháněny závitovými tyčemi, které jsou přes pružné spojky spojeny s planetovými převodovkami PLE-60 a ty s třífázovými krokovými motory WRDM 364 LHA. Závitové tyče byly použity pro transformaci rotačního pohybu krokových motorů na lineární pohyb hořáku a držáků vlákna. Pro přesné řízení pohybů mechanické části zařízení byla zkonstruována její ovládací elektronická část. Řízení obou krokových motorů bylo zprostředkováno programovatelnou kartou Adventech PCL-839 a výkonovými kartami D-920. Programové řízení umožňuje vyrábět zúžená telekomunikační i mikrostrukturní vákna s přesně definovanými parametry.

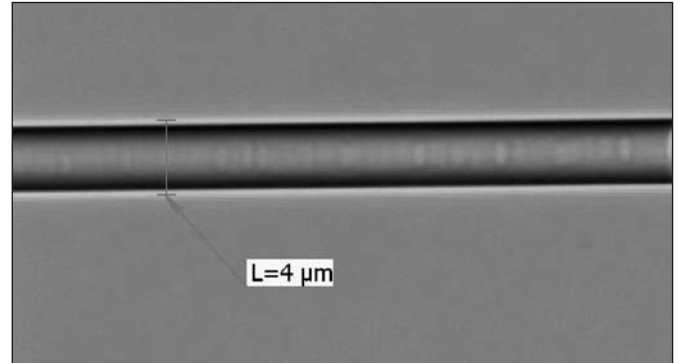
3. ZÚŽENÁ JEDNOVIDOVÁ OPTICKÁ VLÁKNA

Pomocí výše popsaného zařízení byla připravena zúžená jednovidová optická vlákna. Návrhy a charakterizace jednovidových zúžených vláken byly provedeny pro telekomunikační pásmo 1550 nm [6]. Vytvořením zúženého optického vlákna dochází v oblasti přechodu k vidové konverzi a vazbě základního vedeného vidu do vidů vyšších. V oblasti pasu zúženého vlákna je pak veden více než jeden vid [7]. Na obr. 3 je grafické znázornění numerického



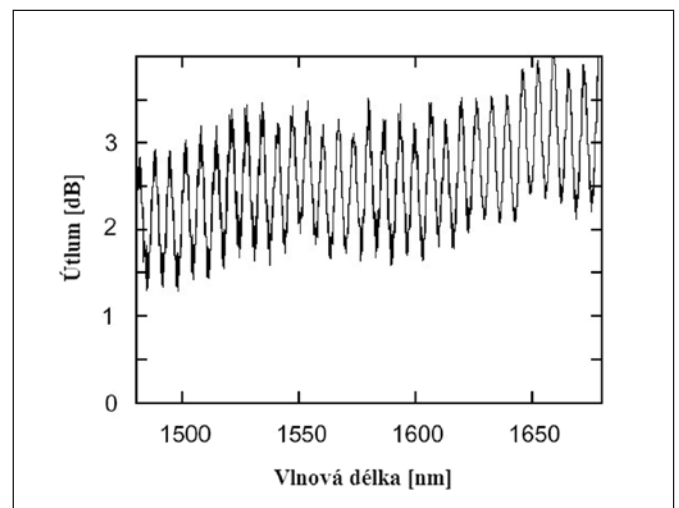
Obr. 3 Intenzita elektrického pole dvou kruhově symetrických vidů vedených pasem zúženého jednovidového vlákna o průměru 4 μm

výpočtu rozložení intenzity elektrického pole dvou kruhově symetrických vidů ($N_{\text{eff}} = 1,41667$ a $N_{\text{eff}} = 1,37347$) vedených pasem zúženého jednovidového vlákna (Corning SMF28e) o průměru pasu 4 μm. Rozložení pole bylo numericky analyzováno pomocí Lumerical Solutions software, využívající FDFD (Finite-Difference Frequency-Domain) metodu. Fotografie úseku pasu zúženého vlákna o průměru cca 4 μm, pořízené mikroskopem Olympus BX-51, je na obr. 4. Toto zúžené vlákno o délce pasu 5 mm a délce přechodů 7,2 mm bylo vyrobeno z jednovidového vlákna Corning SMF28e.



Obr. 4 Fotografie úseku pasu o průměru 4 μm zúženého vlákna SMF 28e (detail)

Rychlost tažení optického vlákna (rychlost posuvu držáků vlákna) byla 1,2 mm/min a teplota ohřevu vlákna byla 1650 °C. Spektrální útlum tohoto zúženého vlákna měřený metodou dvou délek (cut-back method) je na obr. 5. Metoda dvou délek je poměrně přesná a jednoduchá metoda. Pomocí této metody byl nejprve měřen spektrální útlum celého optického vlákna se zúženým úsekem. Posléze byl měřen jen počáteční dvoumetrový úsek vlákna (bez zúžené části), při zachování vstupní vazby (zdroj-vlákno). Z charakteristiky na obr. 5 je patrná interference mezi základním videm a dominantním videm vyššího řádu. Rozdíl efektivních indexů lomu těchto vidů se zvyšuje se snižujícím se průměrem pasu zúženého optického vlákna [6].



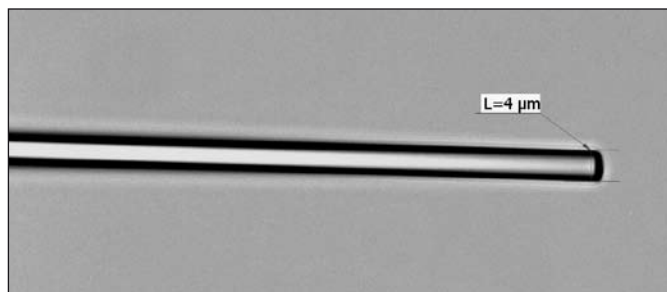
Obr. 5 Spektrální útlum zúženého jednovidového vlákna o průměru pasu 4 μm

4. ZÚŽENÉ OPTICKÉ VLÁKNO JAKO SONDA PRO MĚŘENÍ pH

Pro senzorové aplikace je možné využít nejen zúžených optických vláken se strukturou uvedenou na obr. 1. Zalomením zúženého optického vlákna v oblasti pasu získáme optickou vláknovou sondu. Takové sondy mohou sloužit pro lokální detekci fyzikálně

chemických veličin, jako je koncentrace různých chemických látek v mikroobjemech nebo např. pro lokální měření pH [9,15,16].

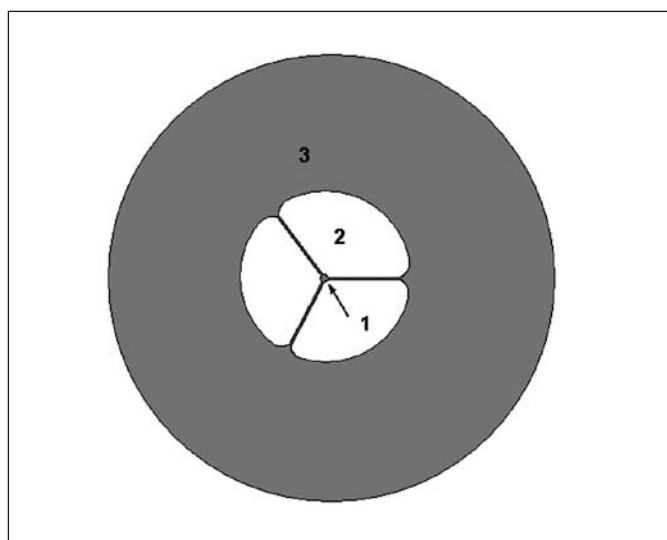
Zúžená optická vlákna byla vyrobena s průměry pasů od desítek po jednotky mikrometrů. Na obr. 6 je fotografie zalomeného pasu (špičky) zúženého vlákna o průměru 4 μm . Na fotografii je patrná vynikající podélná homogenita pasu a kolmé zalomení. Pro zvýšení odolnosti vláknových sond byl povrch pasů (špiček) a přechodových oblastí zúžených vláken naprášen vrstvou oxidu india a cínu o tloušťce cca 200 nm nebo vrstvou hliníku o tloušťce cca 150 nm. Tím bylo dosaženo potřebné ochrany zúžených vláken před OH⁻ ionty a zároveň tím byl zpevněn jejich povrch, což umožňuje lepší manipulaci při lokální detekci pH. Opticko-chemický převodník byl imobilizován na špičce zúženého vlákna a detekce byla realizována prostřednictvím měření intenzity fluorescence [9, 11, 15, 16].



Obr. 6 Mikrofotografie podélné struktury zalomeného pasu (špičky) o tloušťce 4 μm

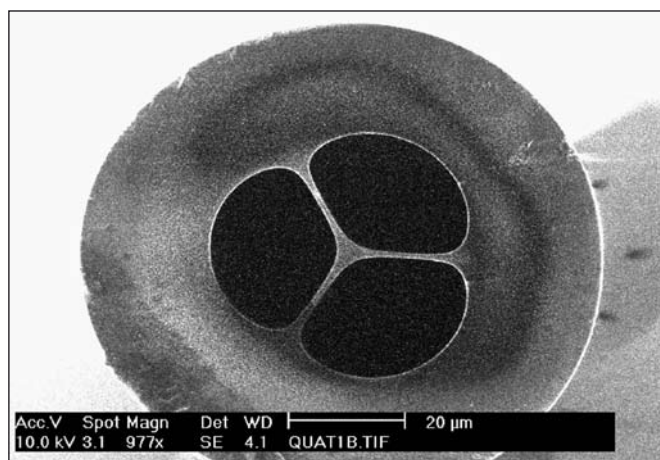
5. ZÚŽENÁ MIKROSTRUKTURNÍ OPTICKÁ VLÁKNA

V současné době se vyrábějí různé druhy MOF. Příklad struktury s křemenným jádrem obklopeným třemi velkými vzduchovými otvory SW MOF (Steering-Wheel Microstructured Optical Fibre) vhodné pro detekci je na obr. 7. Křemenné jádro takového (zúženého) vlákna je obvykle uzpůsobeno tak, aby světlo procházející



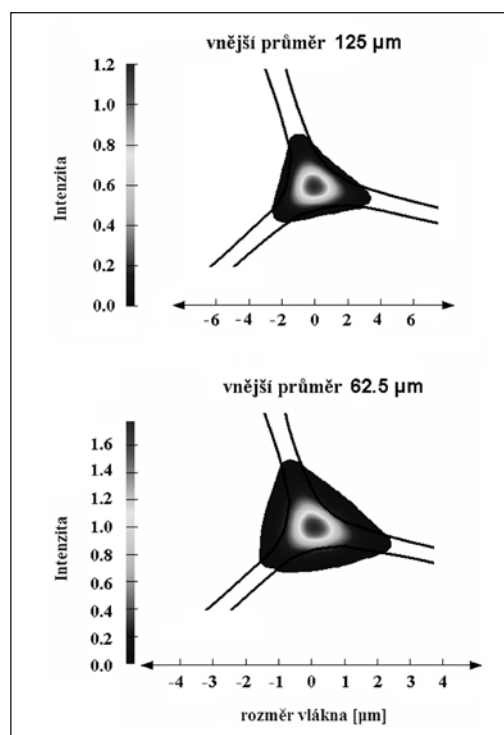
Obr. 7 Příčná struktura mikrostrukturálního optického vlákna (SW MOF) s křemenným jádrem obklopeným jednou řadou plášťových vzduchových otvorů.
1 – oblast jádra, 2 – oblast pláště, 3 – vnější plášť vlákna

jádrem vlákna mělo co největší překryv evanescentní vlny s analytem. Tento typ vlákna je vhodný pro detekci analytů vzhledem k tenkému křemennému jádru obklopenému velkými plášťovými otvory, v nichž může proudit analyt buď v kapalně nebo plynné fázi. Na obr. 8 je SEM (Scanning Electron Microscopy) fotografie příčné struktury SW MOF vyrobeného v ÚFE.

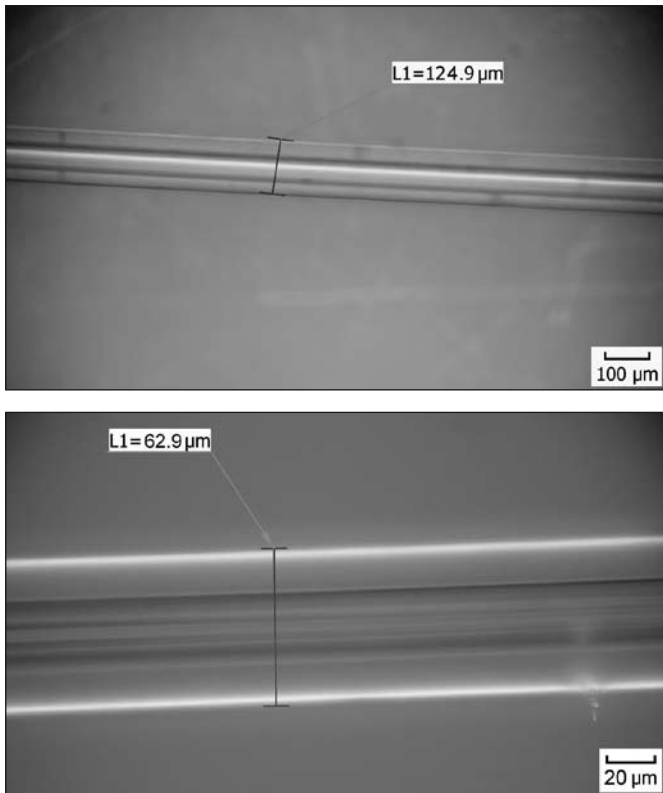


Obr. 8 SEM fotografie příčné struktury mikrostrukturálního optického vlákna (SW-MOF)

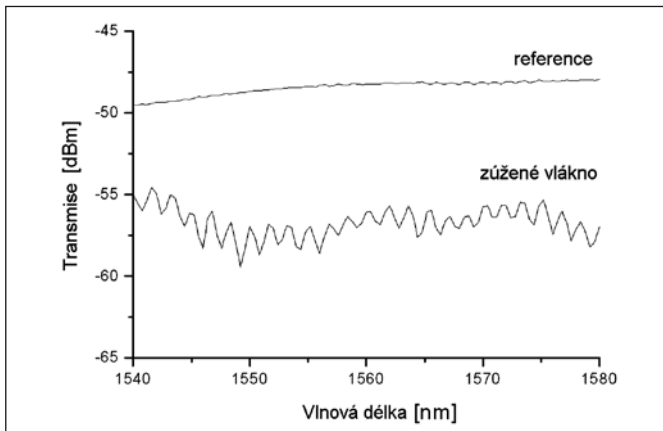
Z realizovaných výpočtů vyplývá, že původní mikrostrukturální vlákno o vnějším průměru 125 μm má překryv intenzity pole základního jaderného vidu na vlnové délce of 1550 nm pouhých 0,84 %. Oproti tomu, zúžením mikrostrukturálního vlákna na poloviční průměr, tj. na vnější průměr pasu 62,5 μm , docílíme zvýšení překryvu intenzity pole základního jaderného vidu s plášťovými otvory na 5,79 %. Na obr. 9 je profil intenzity elektrického pole základního jaderného vidu SW-MOF na vlnové délce of 1550 nm pro průměr vlákna 125 μm a průměr pasu 62,5 μm . Zúžením mikrostrukturálního vlákna v poměru 1:2 tak dosáhneme téměř sedminásobného zvýšení překryvu intenzity pole základního jaderného vidu se vzduchovými plášťovými otvory [10, 12, 13, 14]. Fotografie podélné struktury původního nezúženého SW MOF s vnějším průměrem 125 μm je na obr. 10 a). Úsek pasu zúženého SW MOF o šířce 62,5 μm je na obr. 10 b). Naměřená transmisivita zúženého SW MOF, jehož průměr pasu je 65,9 μm , délka pasu 3 cm a délka přechodů 2,7 mm, je na obr. 11. Zvýšené vložné ztráty, patrné z charakteristiky, mohou



Obr. 9 Profil intenzity elektrického pole základního jaderného vidu SW-MOF na vlnové délce of 1550 nm pro průměr vlákna 125 μm a průměr pasu 62,5 μm



Obr. 10 Podélná struktura mikrostrukturálního optického vlákna (SW MOF): a) původní struktura, b) zúžené vlákno na polovinu původního průměru



Obr. 11 Transmise zúženého mikrostrukturálního vlákna (SW MOF) o průměru pasu 65,9 μm

být přičteny na vrub rozměrovým nepřesnostem vnitřní struktury SW MOF vzniklým během přípravy zúženého vlákna. To může způsobovat vazbu vyšších vidů v důsledku ohybů nebo mikroohybů na jádře SW MOF v oblasti pasu a přechodů.

6. ZÁVĚR

Článek pojednává o zúžených optických vláknech určených pro senzorové aplikace. Na základě numerických analýz se podařilo připravit zúžená optická vlákna pomocí počítačem řízeného zařízení vlastní konstrukce.

Bylo připraveno zalomené zúžené jednojádřové optické vlákno o průměru pasu 4 μm, které bude sloužit jako vláknová sonda pro intracelulární měření pH v tabákových buňkách.

Unikátních vlnodivných vlastností bylo využito u mikrostrukturálního optického vlákna s velkými plášťovými otvory. Na tomto zúženém vlákne byl simulován cca sedminásobně zvýšený překryv intenzity pole základního vidu s plášťovými vzduchovými otvory (tj. zvýšené citlivosti detekce) oproti nezúžené původní struktuře. Připravené zúžené mikrostrukturální vlákno bude využito pro detekci uhlovodíků.

Vzhledem k vnitřní struktuře mikrostrukturálního vlákna není nutné toto vlákno zúžit na tak malé průměry pasu oproti telekomunikačním vláknům pro dosažení daného překryvu evanescentní vlny s analytem. Zúžené mikrostrukturální vlákno je přitom dostatečně robustní a zároveň umožňuje proudění plynného či kapalného analytu v plášťových otvorech ve srovnání se zúženými telekomunikačními jednojádřovými vlákny. Výhodou zúžených jednojádřových i mikrostrukturálních vláken je efektivní navázání optického svazku do/z tenkého pasu přes přechody s pozvolně měnícím se průměrem. Výhodou mikrostrukturálního vlákna je detekce menších objemů (mikroobjemů) proudícího analytu (plynu nebo kapaliny) v plášťových kapilárách zúženého mikrostrukturálního vlákna. Analyt je v plášťových otvorech mikrostrukturálního vlákna izolován od okolního prostředí oproti zúženému jednojádřovému vláknu. V případě zúženého mikrostrukturálního vlákna je ale nevýhodou vhnání analytu do plášťových otvorů vlákna pod tlakem.

Poděkování: Výzkum zúžených optických vláken pro senzorové aplikace je podporován Grantovou agenturou České republiky grantem č. 102/08/P639.

Literatura

- [1] Kao C. K., Hockham G. A.: Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *Proc. IEE*, 113 (7), 1151-1158 (1966).
- [2] Brambilla G., Xu F., Horak P., Jung Y., Koizumi F., Sessions N. P., Koukharenko E., Feng X., Murugan G. S., Wilkinson J. S., Richardson D. J.: Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications. *Advances in Opt. and Phot.* 1, 107-161 (2009).
- [3] Kaňka J., Honzátko P., Matějček V., Kašík I., Martan T.: Mikrostrukturální optická vlákna. *Optické komunikace OK 2002*, 41-50 (2002).
- [4] Knight J. C., Russell P. St. J.: Photonic Crystal Fibers: New Ways to Guide Light. *Science*, 296, 276-277 (2002).
- [5] Kakarantzas G., Dimmick T. E., Birks T. A., Le Roux R., Russell P. S. J.: Miniature all-fiber devices based on CO₂ laser microstructuring of tapered fibers. *Opt. Lett.*, 26, 1137-1139 (2001).
- [6] Martan T., Honzátko P., Kaňka J., Novotný K.: Workplace for manufacturing devices based on optical fiber tapers. *Proc. SPIE*, 6609, 66090K (2007).
- [7] Marcuse D.: Mode Conversion in Optical Fibers with Monotonically Increasing Core Radius. *J. Light. Tech.*, LT-5 (1), 125-133 (1987).
- [8] Love J. D., Henry W. M.: Quantifying loss minimization in single-mode fiber tapers. *El. Lett.*, 22, 912-914 (1986).
- [9] Martan T., Pospisilova M., Aubrecht J., Mrazek J., Podrazky O., Kasík I., Matejček V., Kanka J.: Tapered Optical Fibres for Local pH Detection. *J. Physics (JPCS)*, WIO 2009, Paris, 2009 (in print).
- [10] Martan T., Kaňka J., Kašík I., Matějček V.: Tapered optical fibres for sensing. *Proc. SPIE*, 7138, 71380Z-1 - 71380Z-6 (2008).
- [11] Martan T., Kaňka J., Podrazký O., Kašík I., Matějček V.: Kónicky zúžená optická vlákna. *Optické komunikace OK 2007*, 89-97 (2007).
- [12] Martan T., Kanka J., Kasík I., Matejček V., Theoretical Analysis And Preparation Of Tapered Suspended Core Microstructure Fibers. *Intern. J. Optomechanics*, 3 (3), 233-249 (2009).
- [13] Zhu Y., Du H., Bise R. T., Kanka J., Peterka P.: Core-cladding mode coupling and recoupling in photonic crystal fiber for enhanced overlap of evanescent field using long-period gratings *Optics Commun.*, 281, 55-60 (2008).
- [14] Oo M. K. K., Han Y., Kanka J., Sukhishvili S., Du H.: Structure fits the purpose: photonic crystal fibers for evanescent-field surface-enhanced Raman spectroscopy. *Opt. Lett.*, 35 (4), 466-468 (2010).
- [15] Podrazky O., Mrazek J., Seidl M., Kasík I., Tobiska P., Matejček V., Martan T., Aubrecht J.: Optical principle of pH measurement for detection of auxin flow through cellular membrane. *Proc. SPIE*, 6585, 65850YI-6580Y (2007).
- [16] Kasík I., Martan T., Podrazky O., Mrazek J., Pospisilova M., Matejček V.: Local Detection of pH Using Fibre Tapers. *Proc. SPIE*, 7356, 7356-70 (2009).

Vláknové lasery – principy a aplikace

Úspěch erbiem dopovaných vláknových zesilovačů v telekomunikačních podnitil i nedávný pozoruhodný rozvoj vláknových laserů, které v mnoha aplikacích mohou nahradit konvenční pevnolátkové lasery. V článku jsou popsány základní principy vláknových laserů, včetně vláknových laserů s vysokým výkonem čerpaných přes plášť. Jsou zde také shrnuty nejdůležitější aplikace těchto nových zdrojů laserového záření a podrobněji jsou uvedeny výsledky výzkumu v tomto oboru v Ústavu fotoniky a elektroniky.

Klíčová slova: vláknové lasery, vláknové zesilovače, optická vlákna, erbium, ytterbium, thulium

1. ÚVOD

Vláknové lasery byly navrženy již v roce 1960, krátce poté, co Theodore Maiman rozzářil koherentním světlem krystal rubínu a sestavil tak první laser. Tehdy Elias Snitzer navrhl a záhy realizoval laser, ve kterém jako aktivní, zesilující prostředí použil skleněné vlákno s jádrem dopovaným neodymem [1]. Tento vláknový laser generoval záření na vlnové délce 1,06 μm a byl čerpaný výbojkou, kolem které bylo vlákno obtočené ve spirále. Zatímco odvětví pevnolátkových laserů zaznamenávalo rychlý pokrok od dnů jejich objevu, po prvních pracích E. Snitzera upadají vláknové lasery v zapomnění a jsou považovány spíše za laboratorní kuriozitu. Optickým vláknům samotným však začal bouřlivý rozvoj jako bezkonkurenčnímu přenosovému médiumu pro telekomunikace.

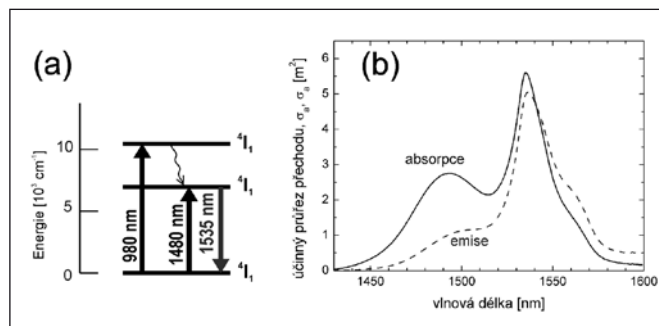
Aktivní optická vlákna byla znovuobjevena až v polovině osmdesátých let, kdy tým kolem Davida N. Payna z univerzity v Southamptonu v Anglii ukázal, že ionty prvku vzácné zeminy erbia mohou ve vláknech vyvolat zisk na vlnové délce kolem 1550 nm, využívané v komunikačních systémech [2]. Erbiem dopovaný vláknový zesilovač (EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier) způsobil v oblasti optických komunikací převratné změny. EDFA je totiž jednou z klíčových komponent, která umožnila výstavbu dálkových vysokokapacitních datových spojů a tedy i celosvětový rozvoj internetu. Tato komponenta také otevřela nové možnosti pro transparentní optické sítě s vlnovým multiplexem (WDM - Wavelength Division Multiplexing) a pro přenos dat prostřednictvím optických solitonů. Současně s výzkumem EDFA se prováděl i výzkum vláknových laserů. Je vskutku obdivuhodné jak jsou vláknové lasery univerzální. Některé nabízejí eleganci - široce přeladitelný výstup s úzkou šířkou čáry nebo femtosekundové pulzy. Jiné zas nabízejí hrubou sílu - výstupní výkon řádu stovek wattů až kilowattů z několika desítek metrů vlákna, a to bez nutnosti drahého a rozměrného vodního chlazení.

2. PRINCIP OPTICKÉHO ZESILOVÁNÍ

Vláknový laser je vlastně koherentní optický vláknový zesilovač se zpětnou vazbou. Na jakém principu je založeno optické zesilování? Zodpovězme si na tuto otázku právě na příkladu aktivního prostředí dopovaného ionty erbia Er^{3+} , viz obr. 1. Předpokládejme pro jednoduchost, že ionty Er^{3+} , kterými je prostředí dopováno, mohou existovat nejméně ve dvou diskretních stavech - v základním stavu, a v excitovaném stavu. V tepelné rovnováze je počet iontů nacházejících se na jednotlivých energetických hladinách dán Boltzmannovým rozdělením a většina iontů se tedy při normálních podmínkách nachází v základním stavu s minimální energií. Aktivní prostředí může být vyvedeno z termodynamické rovnováhy např. přítomností čerpacího světelného zdroje. Interakci souboru iontů

s kvanty světelné energie - fotony - teoreticky vysvětlil Albert Einstein začátkem dvacátého století. Mohou nastat tři různé jevy: spontánní emise, absorpce a stimulovaná emise. Absorpce fotonu o energii rovné rozdílu energetických hladin se iont v základním stavu převede do vybuzeného, excitovaného stavu. Z tohoto stavu může iont přejít zpět na základní hladinu buď spontánně, za současného vyzáření fotonu s náhodnou polarizací a fází, nebo je k emisi fotonu stimulován jiným fotonem. Alternativně může přejít nezářivým přechodem na jinou hladinu s dlouhou dobou života, tzv. metastabilní hladinu. Nepůsobí-li na aktivní prostředí jiné vlivy, tak dostatečně silné čerpání způsobí, že většina iontů se dostane do metastabilního stavu. Z metastabilního stavu do základního se iont opět dostane spontánní či stimulovanou emisí. V případě stimulované emise má vyzářený foton stejné fázové a polarizační vlastnosti jako stimulující foton, říkáme, že fotony jsou vzájemně koherentní. Při dostatečně silném čerpání bude převažovat stimulovaná emise nad absorpcí a signál bude zesilován. Fotony generované spontánní emisí jsou zdrojem šumu zesilovače. Z makroskopického hlediska klasické fyziky lze aktivní prostředí charakterizovat komplexním indexem lomu, jehož imaginární část způsobuje zeslabování resp. zesilování intenzity procházející signálové vlny.

U iontů erbia, stejně jako u dalších prvků vzácných zemin (lanthanoidů), se zářivé přechody uskutečňují mezi energetickými hladinami v elektronové slupce 4f. Elektronová konfigurace lanthanoidů je $[\text{Xe}] 4f^{N-1} 5s^2 5p^6 6s^0$, kde $[\text{Xe}]$ představuje uzavřenou

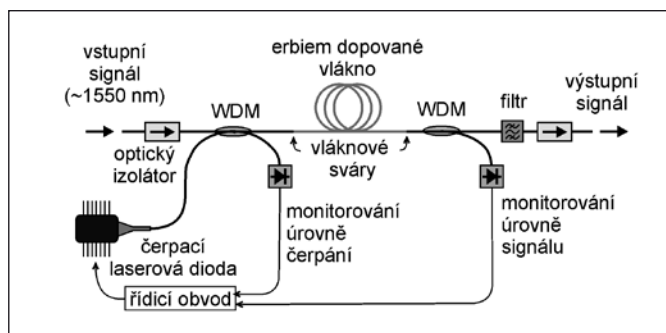


Obr. 1 (a) Schéma energetických hladin erbia. Metastabilní hladina $4I_{13/2}$ může být čerpána přímo na vlnové délce 1480 nm, nebo přes hladinu $4I_{11/2}$ zářením na vlnové délce 980 nm. Doba života iontu na hladině $4I_{11/2}$ je velmi krátká ($\approx 7 \mu\text{s}$) ve srovnání s dobou života hladiny $4I_{13/2}$ ($\approx 10 \text{ ms}$), takže iont vybuzený na hladinu $4I_{11/2}$ přejde rychle, nezářivě na metastabilní hladinu $4I_{13/2}$. (b) Absorpční a emisní spektrum přechodu $4I_{15/2} \leftrightarrow 4I_{13/2}$

slupkovou konfiguraci xenonu. V této konfiguraci iontu je jeden elektron vzat ze slupky $4f$ a dva ze slupky $6s$, podle energetické posloupnosti, ve které elektrony zaplňují jednotlivé podslupky. Na druhou stranu $N-1$ vnitřních elektronů slupky $4f$ zůstává stíněno od vnějších polí vnějšími slupkami $5s$, $5p$, takže $4f \rightarrow 4f$ laserové přechody vykazují relativně ostré spektrální čáry, ve srovnání např. s přechody kovů. Dalším důsledkem je menší citlivost spektrálních vlastností $4f \rightarrow 4f$ přechodu na typ hostitelského materiálu. I tento relativně malý vliv způsobený hostitelským materiálem však má pro laserové aplikace významný účinek. Pro iont Er^{3+} platí $N = 12$ a má tedy ve $4f$ slupce $N-1=11$ elektronů, které mohou nabývat celkem 14 různých energetických úrovní. Tyto úrovně jsou diskrétní a čárové v případě iontu Er^{3+} nacházejícího se ve vakuu. Pokud je však iont zabudován např. ve skleněné matici optického vlákna, dochází k rozšíření čárových hladin na energetické pásy. Energetické hladiny, resp. pásy, významné pro zesilování optického signálu v pásmu kolem 1550 nm, jsou na obr. 1a. Jednotlivé hladiny jsou označeny podle Russelovy-Sundersovy konvence, vycházející z kvantové atomární teorie. Rozšíření hladin je na obr. 1b ilustrováno na tvaru absorpčního a emisního spektra přechodu ${}^4I_{15/2} - {}^4I_{13/2}$ u erbiem dopovaného, fosfosilikátového optického vlákna vyrobeného v Ústavu fotoniky a elektroniky (ÚFE).

Jak ve skutečnosti vypadá optický zesilovač s erbiem dopovaným vláknem? Příklad konfigurace EDFA je na obr. 2. Erbiem dopované vlákno, řádově metr až desítky metrů dlouhé, je možné svařovat se standardním přenosovým vláknem nebo pasivními elementy z nich připravených. Vlnově selektivní vazební člen (WDM - Wavelength Division Multiplexer) sdružuje světlo pro čerpání se světlem signálu, zatímco další WDM člen za vláknem vyvazuje případné neabsorbované čerpání. Čerpací laserová dioda má vlnovou délku 980 nebo 1480 nm. V současnosti jsou dostupné diody na vlnové délce 980 nm s výkonem až 1 W, navázaným do jednovidového vlákna. Pásmový filtr potlačuje šum spontánní emise a optický izolátor odstraňuje nežádoucí odrazy světla a zabraňuje vzniku laserových oscilací zesilovače. Optický izolátor je optická vláknová součástka, která propouští záření jen jedním směrem. Optoelektronická zpětnovazební smyčka řídí zisk zesilovače prostřednictvím nastavení čerpacího výkonu.

Zesilovače EDFA jsou v optických komunikacích používány k regeneraci signálu utlumeného absorpcí a rozptylem v přenosovém vlákně. Vkládají se do dálkových přenosových tras zhruba po 70-100 km optického kabelu, případně jsou používány jako nízkošumové předzesilovače pro zvýšení citlivosti přijímače. V sítích kabelové televize jsou instalovány jako výkonové zesilovače zdroje signálu, který je následně rozvětven do mnoha optických kabelů vedoucích k jednotlivým objektům.

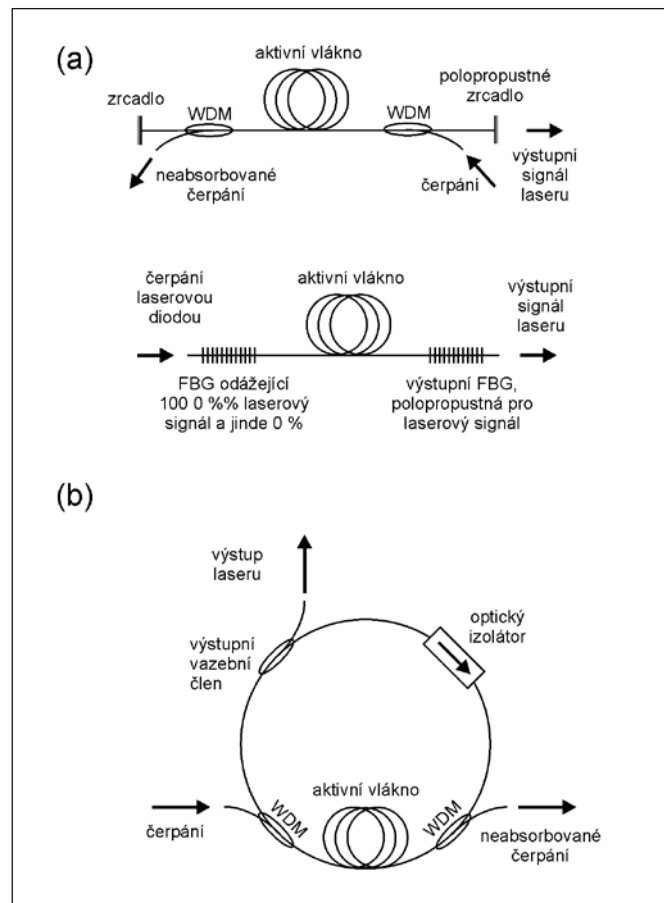


Obr. 2 Schéma erbiem dopovaného vláknového zesilovače

3. KONTINUÁLNÍ VLÁKNOVÉ LASERY

Lasery obecně jsou optické oscilátory. Skládají se z koherentního optického zesilovače, jehož výstupní signál se vrací zpětnou vazbou sfázovaný znovu na vstup. Ve specifickém případě vláknových laserů se tedy jedná o optický vláknový zesilovač, který byl popsán v předchozím odstavci, se systémem zpětné vazby.

Systém zpětné vazby se vytváří umístěním zesilovače do optického rezonátoru. Dva typické příklady rezonátorů jsou na obr. 3. Na obr. 3a je zesilovač vložen do Fabryova-Perotova rezonátoru tvořeného zrcadly. Uspořádání takového vláknového laseru se nazývá Fabryovo-Perotovo nebo též lineární uspořádání. Jedno ze zrcadel je polopropustné pro vlnovou délku signálu a vychází jím výstupní laserové záření. Zrcadla mohou být realizována několika způsoby: napařením kovové nebo dielektrické odrazné vrstvy na přesně kolmo zalomené čelo vlákna nebo přiložením externího zrcátka k čelům vlákna. Často užívané řešení zrcadel je také navaření vláknových braggovských mřížek (FBG - Fiber Bragg Grating) na vláknový zesilovač. FBG se vyrábí nejčastěji ozářením optického vlákna externím ultrafialovým laserem přes fázovou masku, např. mikroskopickou mřížku vyleptanou v křemenné podložce. Výsledný interferenční obrazec vysokovýkonového ultrafialového záření vytvoří podél osvětleného vlákna periodickou modulaci indexu lomu tím, že přeruší některé molekulární vazby v germaniem dopovaném křemenném skle jádra optického vlákna. Tato periodická mřížka pak bude odrážet světlo s vlnovou délkou, která je v rezonanci s mřížkovou periodou, a všechny ostatní vlnové délky bude propouštět. FBG jsou běžně používány v optických sítích jako vlnově selektivní filtry. Použití FBG pro vytvoření Fabryova-Perotova rezonátoru je jedním z mnoha příkladů, jak se v konstrukci vláknových laserů s výhodou využívá vyspělá technologie vyvinutá původně pro optické vláknové komunikace.



Obr. 3 Typická uspořádání vláknového laseru. (a) Fabryův-Perotův rezonátor, (b) kruhový rezonátor

Na obr. 3b je další typické uspořádání vláknového laseru, kdy výstup zesilovače je přiveden na vstup - vznikne kruhový rezonátor. Do kruhového rezonátoru je zařazen výstupní vazební člen pro vyvedení laserového signálu. Dále je do rezonátoru vřazen optický izolátor, který zajišťuje generaci laserového signálu jen v jednom směru a přispívá tak ke stabilitě výstupního signálu.

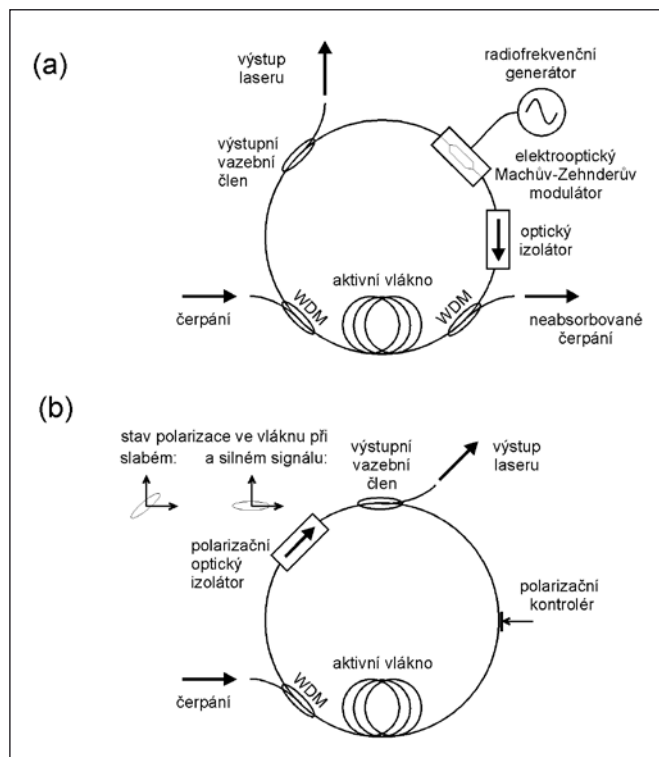
Jak ale výstupní laserový signál vzniká? Pokud na vstupu vláknového zesilovače není žádný signál, není ani výstupní signál, takže i signál zpětné vazby je nulový. Takový stav je však nestabilní. Sebenepatrnější šum (s frekvenčními složkami spadajícími do frekvenčního pásma zesilovače), který díky spontánní emisi nevyhnutelně vždy existuje, může na vstupu iniciovat vznik oscilací. Vstupní signál je zesílený a z výstupu je vedený zpět na vstup a je pak znovu zesilován. Tento proces se neustále opakuje dokud signál není tak velký, že další zvětšování signálu je omezeno snižováním zisku (saturací) zesilovače. Ustálený stav je dosažen, když zisk zesilovače přesně vyrovnává ztráty zpětnovazební smyčky při jednom oběhu smyčkou. Další podmínkou ustálených, stacionárních oscilací je fázový synchronismus: celková změna fáze při jednom oběhu musí být celočíselným násobkem 2π , takže signál zpětné vazby je sfázován s původním vstupním signálem. Tato podmínka je splněna pro celou řadu optických vln, módů, šířících se rezonátorem. Tyto, tzv. podélné módy, jsou v případě Fabryova-Perotova rezonátoru od sebe navzájem frekvenčně vzdáleny o $\Delta\nu = c/2d$, kde c je rychlost světla ve vlákně (cca 2×10^8 m/s) a d je délka rezonátoru. Pro 10 m dlouhý Fabryův-Perotův rezonátor tak vychází vzdálenost módů 10 MHz. Pro srovnání, typický polovodičový laser InGaAsP emitující na vlnové délce $\lambda = 1300$ nm má délku rezonátoru cca 300 μm , čemuž odpovídá vzdálenost podélných módů $\Delta\nu = 142$ GHz, resp. v optickém spektru $\Delta\lambda = \lambda^2 \Delta\nu / c = 0,8$ nm. Zatímco ve Fabryově-Perotově rezonátoru prochází optická vlna vláknem dvakrát, v kruhovém laseru jen jednou. Proto módy kruhového laseru jsou frekvenčně vzdáleny $\Delta\nu = c/d$. Např. módy vzdálené 10 MHz jsou podporovány v 20 m dlouhém kruhovém rezonátoru.

Vzhledem k vynikající kompatibilitě se standardními telekomunikačními optickými vlákny jsou vláknové lasery využívány v komunikacích. Výzkumníci ÚFE se podíleli na výzkumu erbiového vláknového laseru široce přeladitelného v pásmu 1480-1620 nm [3] a multifrekvenčního laseru generujícího současně až na 12 čarách s vzájemným odstupem 100 GHz (cca 0,8 nm) v telekomunikačním C-pásmu v okolí vlnové délky 1550 nm. Klíčové pro multifrekvenční laser je zařazení akustooptického modulátoru do rezonátoru laseru, díky němuž jsou signály při každém průchodu rezonátorem frekvenčně posunuty a dojde tak k efektivnímu potlačení homogenního rozšíření emisního spektra erbia. Signály na různých vlnových délkách pak mají k dispozici dostatečné zesílení nezávisle na výkonu v ostatních signálech [4-6]. Velmi krátké vláknové lasery s distribuovanou zpětnou vazbou jsou praktickými a kompaktními zdroji jednofrekvenčních laserů podporujících šíření jediného podélného módu a mají tedy velmi úzkou spektrální čáru, užší než 10 kHz. Tyto lasery jsou vhodné pro použití v optických interferenčních senzorech a v koherentních optických komunikačních systémech.

4. PULZNÍ VLÁKNOVÉ LASERY

Do spektrálního pásma zesílení erbia (šířka čáry přechodu Er^{3+} je cca 30 nm, resp. 4 THz), se vejde řádově stovky tisíc podélných módů. Tyto módy obvykle oscilují nezávisle na sobě, v tzv. režimu volně oscilujících módů. Existují však metody, kterými lze dosáhnout vzájemného svázání a sfázování módů, tzv. módové synchronizace. Na jednotlivé módy se potom můžeme dívat jako na složky Fourierova rozvoje periodické funkce s periodou $T = 1/\Delta\nu$, která je rovna době jednoho oběhu světelné vlny rezonátorem. Tato periodická funkce představuje sled optických pulzů. Časová šířka pulzů je nepřímo úměrná počtu podélných módů, a tedy i šířce pásma přechodu. Ustavení režimu synchronizace módů lze dosáhnout vložením optické závěrky do laserové dutiny, která se periodicky otvírá s periodou T . Optickou závěrku lze ovládat externím frekvenčním generátorem, mluvíme pak o aktivní módové synchronizaci. Na obr. 4a je optickou závěrku Machův-Zehnderův amplitudový modulátor vytvořený v krystalu niobičnanu lithného (LiNbO_3), což je prvek integrované optiky. Lze také použít pasivní závěrku tvořenou saturovatelným absorbujícím prostředím, pak

mluvíme o pasivní módové synchronizaci. Takovou závěrku může být např. polarizátor v kombinaci s nelineárním natáčením polarizace v optickém vlákně tvořícím rezonátor, jak je ukázáno na obr. 4b (funkci polarizátoru zde plní polarizační optický izolátor). Pro činnost této závěrky je podstatné nelineární šíření světla ve vlákně. Světlo se šíří jádrem vlákna, které má průměr 8 μm . Při výkonech kolem 1 W převyšuje průměrná intenzita světla v jádře vlákna intenzitu světla na povrchu Slunce a špičková intenzita v pulzech může být ještě řádově vyšší. Přitom se projevuje optický Kerrův jev, neboli závislost indexu lomu skla vlákna na intenzitě. Tato změna indexu lomu, která je různá v různých částech pulzu, významně ovlivňuje změny tvaru a polarizace pulzu při šíření. Polarizačním kontrolérem, viz obr. 4b, nastavíme polarizaci světelné vlny tak, že při slabém signálu je její polarizace kolmá k ose propustnosti polarizátoru, ale při silné intenzitě vlny je její polarizace Kerrovým jevem stočena tak, že prochází polarizačním izolátorem s malými ztrátami. Nelineární šíření ve vlákně se podílí i na formování tvaru pulzů, např. automodulace fáze může vést ke kompresi pulzů.



Obr. 4 Příklady uspořádání pulzního vláknového laseru s aktivní (a) a pasivní (b) módovou synchronizací

Jako u jiných typů laserů, i u vláknových laserů se používá technika spínání jakosti Q rezonátoru pro získávání sledu gigantických pulzů. Oproti módově synchronizovaným laserům se jedná o delší pulzy s nižší opakovací frekvencí, ale podstatně vyšší energií jednotlivých pulzů. V současné době jsou dostupné Q-spínané vláknové lasery s energií pulzů až 10 mJ, délkou pulzu řádově stovky ns a špičkovým výkonem desítky kW. Pro modulaci ztrát rezonátoru se používají buď aktivní modulátory, např. akustooptické, případně pro pasivní Q-spínání se používají saturovatelné absorbéry, vesměs na bázi objemových prvků jako jsou nelineární polovodičová zrcadla (SESAM), vrstvy uhlíkových nanočástic, nebo krystaly $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$.

Studium pulzních vláknových laserů je jednou z tématik řešených ve skupině nelineární vláknové optiky ÚFE. Pohled do laboratoře je na obrázku 5. Schéma laseru na obr. 4b odpovídá femtosekundovému vláknovému laseru, který jsme sestavili pro výzkum plně optického zpracování datových toků s vysokou přenosovou rychlostí, o němž je možné se dočíst více v článku Pavla Honzátko

a kol. v tomto čísle časopisu. Laser generuje sled pulzů dlouhých 170 fs s opakovací frekvencí 40 MHz. Byly zde vyvinuty pasivně vidově synchronizované vláknové lasery s opakovací frekvencí řádu jednotek až desítek MHz, aktivně vidově synchronizované vláknové lasery s opakovací frekvencí řádu stovek MHz až jednotek GHz a vláknové lasery založené na modulační nestabilitě s opakovací frekvencí řádu stovek GHz. Lasery založené na modulační nestabilitě mohou být atraktivním zdrojem optických pulzů pro budoucí komunikační systémy s vysokou přenosovou rychlostí. V těchto laserech se dosahuje fázové synchronizace při čtyřřivném směšování křížovou modulací a automodulací fáze. Opakovací frekvence těchto laserů byla definována volným spektrálním intervalem (FSR - Free-Spectral Range) hřebenového filtru zapojeného do rezonátoru. Sestavili jsme pulzní lasery s hřebenovým filtrem typu Fabryova-Perotova etalonu [7], příp. dvoujádřového optického vlákna [8]. Jako aktivní prostředí bylo použito optické vlákno dopované erbiem a yterbiem. Čerpací záření neexcituje přímo ionty erbia, ale energie čerpání je absorbována yterbiovými ionty, které předávají energii iontům erbia. Tyto lasery pracují na vlnové délce 1550 nm a pro čerpání se používá Nd:YAG-laser, příp. yterbiový vláknový laser, příp. na vlnové délce cca 1060 nm nebo čerpací laserové diody na vlnové délce 980 nm. V oblasti Q-spínaných vláknových laserů se v současnosti věnujeme výzkumu nových typů saturovatelných absorbérů, které jsou plně na bázi optických vláken, oproti nyní běžně používaných saturovatelných absorbérů na bázi prvků objemové optiky.

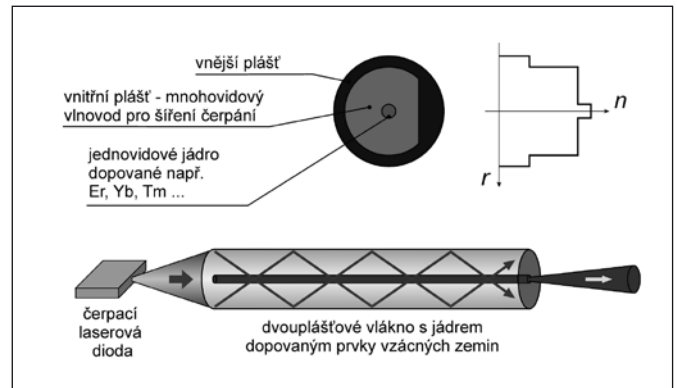


Obr. 5 Laboratoř nelineární vláknové optiky ÚFE AV ČR, ve které probíhá také výzkum vláknových laserů

5. VYSOKÝ VÝKON Z DVOUPLÁŠŤOVÝCH VLÁKEN

Klíčovým krokem ke zvýšení výstupního výkonu vláknových laserů bylo využití metody čerpání aktivního prostředí přes plášť koncem osmdesátých let. Tímto způsobem je možno transformovat vysoce rozbitý svazek z mnohamódových laserových diod s velkou vyzařovací plochou (typicky $100 \times 1 \mu\text{m}$) do kvalitního, jednomódového laserového svazku s malou divergencí. První vláknový laser čerpaný přes plášť realizoval opět Elias Snitzer, autor prvního vláknového laseru [9]. Samotnou myšlenku čerpání přes plášť si ovšem nechal patentovat již v sedmdesátých letech Robert Maurer ze sklárny Corning Incorporated v USA [10]. Princip laseru s dvouplášťovým aktivním vláknem je naznačen na obr. 6. Jádrem vlákna je dopováno erbiem nebo jinými prvky vzácných zemin schopnými laserového zesílení. Vnitřní plášť má pak nižší index lomu než jádro, takže jádro slouží jako vlnovod pro signál. Jádro je většinou jednovidové. Vnitřní plášť je též obklopen materiálem s nižším indexem lomu než má sám, např. polysiloxanovým polymerem nebo akrylát. Vnitřní plášť tedy slouží také jako vlnovod, a to pro šíření čerpání. Protože vnitřní plášť má relativně velkou

plochu průřezu, je možné do něj účinně navázat z čerpacích diod vysoký optický výkon. Jak se čerpací záření šíří podél vlákna, stále znovu křížuje oblast dopovaného jádra a je v něm absorbováno na iontech vzácných zemin. Excitované ionty pak mohou formou stimulované emise předat svou energii zesílovanému signálu. Oproti klasickým pevnolátkovým laserům mají tyto lasery inherentně vysokou stabilitu a provozní spolehlivost, kompaktnost a malé rozměry, díky jednovidovému jádru i výbornou módovou kvalitu výstupního svazku. Vzhledem k velké délce aktivního prostředí mají lepší odvod tepelných ztrát a odpadá komplikované chlazení. Tyto výhody mají i konvenční vláknové zesilovače čerpané jednovidovými diodami. Dvouplášťová vlákna jsou mimořádně účinné prvky pro konverzi výkonového záření polovodičových laserů s malým jasnem do výkonového záření s vysokým jasnem. Hlavní výhodou plášťem čerpaných zesilovačů a laserů je proto především možnost použít vysoce výkonných mnohovidových čerpacích diod a z toho vyplývající nižší cena a vysoký výstupní výkon.



Obr. 6 Princip čerpání aktivního vlákna přes plášť

Problémem specifickým pro čerpání plášťem je zajistit účinnou absorpci čerpání podél dvouplášťového vlákna. Např. v případě kruhového průřezu vlákna je selektivně absorbována část čerpání šířící se středem vlákna, tzv. meridiální paprsky, zatímco kosé (mimoosové) paprsky jádro míjejí a tlumeny nejsou. Útlum, absorpce čerpání tak není homogenní podél celého vlákna, ale po absorpci meridiálních paprsků na počátku vlákna se již čerpání šíří téměř beze ztrát. Optimální pro aplikace dvouplášťových aktivních vláken je zajistit maximální absorpci čerpání ve vlákně, tj. zajistit homogenní útlum podél celého vlákna. Toho lze dosáhnout vhodným tvarem průřezu vnitřního pláště, který zajistí tzv. chaotickou dynamiku šíření paprsků. V dvouplášťovém vlákně s „chaotickým“ šířením paprsků se při libovolném způsobu buzení dosáhne po jisté délce vlákna statisticky rovnoměrného rozložení intenzity záření po průřezu. Příklad takového průřezu vlákna je tzv. vlákno tvaru písmene D na obrázku 6. Některé detaily o tažení vláken s neokrouhým průřezem lze nalézt v článku V. Matějce a kol. v tomto čísle JMO.

Dalším problémem dvouplášťových laserů a zesilovačů je navazování signálu a čerpání do aktivního vlákna. V literatuře bylo popsáno několik způsobů jak navázat současně čerpání do vnitřního mnohovidového pláště a signál do jednovidového jádra. V laboratorních podmínkách je ještě přijatelné kombinování signálu a čerpání na vstupu aktivního vlákna pomocí objemových optických prvků a čoček, viz obr. 7a. Pro zachování výhod šíření signálu optickým vláknem byly vyvinuty v zásadě dva různé způsoby navázání čerpání do vnitřního pláště aktivního vlákna. Prvním způsobem je příčné navázání čerpání z boku aktivního vlákna buďto nějakým difrakčním prvkem, např. hranolem nebo prostřednictvím zářezu ve tvaru V-drážky, viz obr. 7b. V druhém případě je čerpání navázáno na začátku dvouplášťového vlákna ve směru jeho osy. V Bellových laboratořích v USA vyvinuli elegantní metodu, využívající svařovaného vláknového vazebního

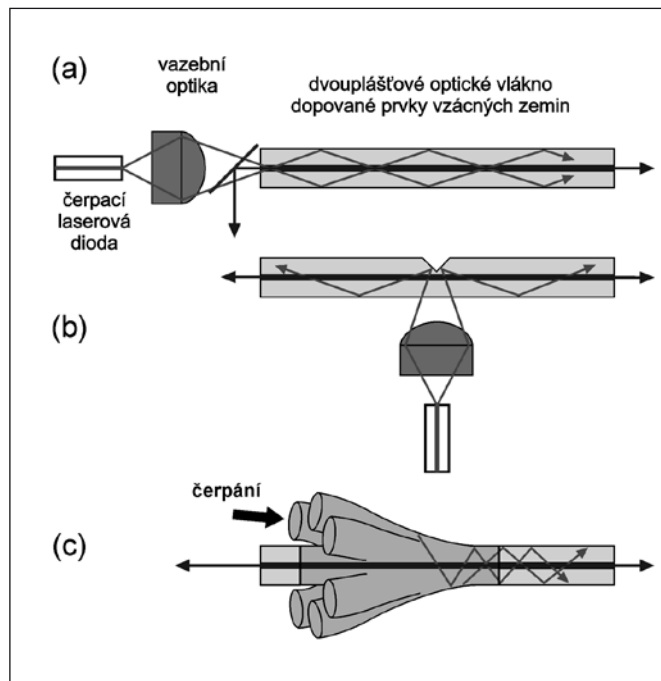
členu vytvořeného z jednovidového a několika mnohavidových vláken, soustředěných okolo jednovidového signálového vlákna, tzv. „star coupler“, viz obr. 7c. V ÚFE jsme navrhli nový způsob pro optické čerpání přes plášť a experimentálně jej ověřili pro čerpání vláknového laseru i zesilovače [11, 12]. Tato patentovaná metoda čerpání je založena na přímém připojení čerpacího i signálového vlákna k dvouplášťovému aktivnímu vláknu se specifickým průřezem. U tohoto uspořádání byla prokázána vysoká účinnost vazby a absorpce čerpání podél dvouplášťového vlákna. Tento modul vláknového zesilovače nevyžaduje žádné prvky objemové optiky nebo jiné vazební mezičlánky, jak je tomu zapotřebí u většiny jiných metod. Toto zařízení může najít využití ve vysokovýkonových, cenově dostupných vláknových zesilovačích a laserech. Zajímavou oblastí našeho současného výzkumu je také využití vláknových mřížek s dlouhou periodou, připravovaných v ÚFE, ve výkonových vláknových laserech. Ukázali jsme možnost jejich využití pro selekci vlnové délky [13] a pro rozšíření spektrálního pásma oscilací yterbiových vláknových laserů [14].

Jaké jsou další prvky vzácných zemin používané pro vláknové lasery kromě erbia a neodymu? Je to především yterbium, které silně absorbuje v pásmu 980 nm a emituje záření kolem 1100 nm. V posledních letech jsme svědky strmého růstu výstupního výkonu yterbium dopovaných dvouplášťových vláken. V roce 2008 byl sestaven yterbiový vláknový laser s kontinuálním výstupním výkonem 6 kW vycházejícím z jediného optického vlákna. Postavila jej jedna z vůdčích společností v oblasti výkonových vláknových laserů, firma IPG Photonics Valentina Gapontseva, který s výzkumem vláknových laserů začal v Ústavu radiotechniky a elektroniky Akademie věd SSSR ve Frjazinu nedaleko Moskvy. Fyzikální limit výstupního výkonu z jediného vláknového laserového systému je odhadnut na cca 10-20 kW. V současnosti je proto vysoce aktuální výzkum metod koherentního slučování jednotlivých svazků, díky nimž se očekává možnost kontinuálně generovat záření v difrakčně limitovaném svazku s výkonem řádu stovek kW [15]. Výkonová konverzní účinnost yterbiových vláknových laserů je velmi vysoká, vyšší než 80%, takže např. při čerpání 1 kW je ztrátové teplo jen 200 W a to je možné odvést vzhledem k velké délce a malému průměru aktivního prostředí - vláken - ještě bez nutnosti vodního chlazení.

Významným prvkem je také thulium, které má široký emisní pás v pásmu 1,9 - 2,2 μm a silnou absorpci kolem 800 nm, kde jsou rovněž k dispozici výkonné čerpací diody. I thuliové vláknové lasery na 2 μm se již blíží hranici 1 kW kontinuálního výstupního výkonu současně při vysoké výkonové konverzní účinnosti 65 % [16]. V naší laboratoři jsme ve spolupráci s Laboratoří fyziky pevných látek CNRS a Univerzity v Nice ve Francii teoreticky navrhli a experimentálně připravili a charakterizovali novou strukturu thuliem dopovaného vlákna s potenciálem pro využití pro zesilování v telekomunikačním S-pásmu (1450-1530 nm). Příspěvek k výzkumu v této oblasti spočívá v návrhu nového složení jádra vlákna a v jeho přípravě vedoucí ke zvýšení konverzní účinnosti zářivých přechodů thulia [17, 18]. Kromě využití v telekomunikacích má zkoumaná struktura značný potenciál i pro lasery pro spektrální oblasti v okolí 800 nm a 2000 nm. Podrobnější popis základního materiálového výzkumu vláken v ÚFE může čtenář najít v článku I. Kašíka a kol. v tomto čísle JMO. Erbium a thulium může být dopováno spolu s yterbium, aby bylo možno použít dostupné výkonné čerpací diody na vlnových délkách 915, 940 a 980 nm [19].

S nárůstem výkonu nabývají na významu nelineární jevy, stimulovaný Brillouinův a Ramanův rozptyl, které jsou hlavními omezujícími faktory pro činnost výkonových vláknových zesilovačů a laserů. Brillouinův rozptyl je vyvolán podélnou akustickou vlnou vzniklou elektrostrikcí a rozptýlená vlna je spektrálně posunutá o cca 10 GHz. Jeho velikost závisí na úhlu rozptylu, maximum energie je rozptýleno ve zpětném směru. Brillouinův rozptyl je zvláště významný pro signály s úzkou šířkou čáry, a proto je tento jev možné účinně potlačit snížením koherenční délky signálu,

neboli, ekvivalentně řečeno, rozšířením spektra signálu. Ramanův rozptyl označuje jev, kdy světelná vlna excituje vyšší vibrační módy molekul SiO_2 a je tak rozptylována do vlny, která se liší o energii vibračního přechodu - pro křemenné sklo je to 13,2 THz. Tyto jevy lze do jisté míry potlačit vhodným návrhem vlákna, např. zvětšením průměru jádra. Pro jisté aplikace však může být Ramanův rozptyl žádoucí a dobře využitelný.



Obr. 7 Různé způsoby současného navázání čerpání a signálu do dvouplášťového aktivního vlákna: (a) pomocí objemové optiky; (b) boční čerpání odrazem na V-drážce; (c) svařovaným vazebním členem, tzv. „star coupler“

6. RAMANOVSKÉ VLÁKNOVÉ LASERY

Silného Ramanova rozptylu v jednovidových optických vláknech lze využít k účinné konverzi záření vláknového laseru do záření s nižší frekvencí, do tzv. Stokesovy vlny. Zapišeme-li na konce vlákna pár braggovských mřížek, které odraží světlo o vlnové délce Stokesovy vlny, vytvoříme pro tuto vlnovou délku rezonátor. Stokesova vlna je dále zesilována stimulovaným Ramanovým rozptylem, takže energie z čerpacího laseru je velmi účinně přelévána do příslušné Stokesovy vlny. Tento proces je možno posunout dále k delším vlnovým délkám vytvářením dalších rezonátorů, takže se vytváří vlastně několik do sebe zapouzdřených rezonátorů, jejichž rezonanční frekvence se liší pokaždé o 13,2 THz. Tak například zápisem pěti párů braggovských mřížek odražejících záření na vlnových délkách 1144, 1208, 1280, 1362 a 1455 nm bude vytvořen kaskádní rezonátor ramanovského laseru, který zkonvertuje vlnovou délku 1086 nm yterbiového vláknového laseru do záření na vlnové délce 1455 nm. Tento příklad neuvádíme náhodou, ramanovský laser na 1455 nm vyvolává Ramanovo zesílení v standardních jednovidových vláknech v komunikačním pásmu 1550 nm. Bude-li přenosové vlákno čerpáno proti směru šíření signálu (čerpací ramanovský laser je na straně přijímače) bude pomocí Ramanova zesílení výrazně prodloužena vzdálenost přenosu bez opakovaců. V rámci společného projektu sdružení CESNET, které provozuje páteřní akademickou počítačovou síť České republiky, a ÚFE byl demonstrován přenos dvou WDM kanálů 10 Gigabitového Ethernetu po 300 km standardního jednovidového vlákna bez linkových zesilovačů [20]. Je to slibný výsledek zvláště pro operátory sítí závislých na pronajímání tzv. „temných“ vláken, tj. optických vláknových kabelů a tras bez aktivních prvků jako jsou vysílače a zesilovače, resp. opakovací signálu.

7. NĚKTERÉ DALŠÍ APLIKACE

Vláknové lasery jsou užitečné pro kteroukoliv aplikaci, která vyžaduje mechanicky odolný zdroj koherentního záření s vynikající módovou kvalitou výstupního svazku. V tomto závěrečném odstavci zmíníme některé další aplikace, které jsme dosud neuvedli. Zvláště zajímavou oblastí aplikací je zpracování materiálu. Např. výstup 100 W laseru může být fokusován na průměr až 1 μm při odpovídající měrné zářivosti několika $\text{GW}/\text{cm}^2/\text{steradián}$. Vláknové lasery je tedy možné použít pro žhání součástek jemné mechaniky, řezání až několik centimetrů silných ocelových dílů, selektivní pájení a svařování komplikovaných mechanismů, značkování plastových a kovových dílů, jakož i rozmanité tiskové aplikace. Byly ukázány aplikace kilowatových vláknových laserových systémů pro vyprošťování osob ze zřícených betonových budov při zemětřešení, řezání pancéřových desek ve vojenském loďářském průmyslu, svařování trub tranzitních plynovodů a mnohé další. Významnou oblastí nejrůznějších aplikací na zpracování materiálu je samozřejmě i automobilový průmysl. Zde je výhodou vláknových laserů, oproti jiným typům laserů srovnatelného výkonu, především vysoká kvalita svazku umožňující např. svařování na relativně velké vzdálenosti, až jednotky metrů. Svařování pak může být rychlejší, flexibilnější a nedochází ke znečišťování laserové hlavičky, která je dostatečně daleko od sváru. Slibné aplikace jsou také v medicíně, v oční chirurgii a v zubním lékařství, kde na vlnové délce $\lambda = 1064$ nm, resp. její druhé harmonické 532 nm, mohou být ytterbiové vláknové lasery používány místo Nd:YAG laserů, a na vlnové délce v okolí 2 μm pak thuliové vláknové lasery mohou nahradit pevnolátkové lasery na bázi krystalů dopovaných holmiem.

Vláknové lasery s pasivní módovou synchronizací generující pulzy řádu stovek femtosekund mohou najít využití v ramanovské spektroskopii a Q-kličené vláknové lasery s velkou energií v pulzu jsou součástí detekčních systémů LIDAR (Light Detection And Ranging) používaných např. v civilním letectví. Zde je třeba připomenout, že vláknová geometrie sice zajišťuje vynikající módovou kvalitu výstupního svazku a odvod ztrátového tepla ve vláknových laserů, na druhou stranu však díky této geometrii mají nízké prahové výkony nežádoucí nelineární jevy. Proto pro určité aplikace pulzních laserů vyžadující extrémně vysoké energie pulzů nemohou vláknové lasery poskytnout tak vysoce energetické pulzy jako konvenční krystalové lasery nebo nové typy laserů na bázi tenkých disků. Generátory hřebene optických frekvencí na bázi femtosekundových kruhových vláknových laserů je možno použít pro zatím nejpřesnější měření času, frekvence a dalších veličin. Možná nejdůležitější perspektiva vláknových laserů tkví v inherentní jednoduchosti konceptu vláknového laseru, která při případné hromadné výrobě povede k významnému snížení cen oproti srovnatelným konvenčním laserům.

Poděkování

Výzkum speciálních optických vláken pro vláknové lasery v ÚFE je podpořen Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR projektem ME10119 „FILA“.

Literatura

- [1] C. J. Koester and E. Snitzer, „Amplification in a fiber laser“, *Applied Optics*, 3(9):1182, 1964.
- [2] S. B. Poole, D. N. Payne, R. J. Mears, M. E. Fermann, R. I. Laming, „Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing RE ions“, *J. Lightwave Technol.*, 4:870-876, 1986.
- [3] A. Bellemare, M. Karasek, Ch. Riviere, F. Babin, G. He, G. W. Schinn: “Broadly tunable erbium-doped ring lasers: experimentation and modeling”, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 7:195-204, 2001.

- [4] M. Karasek, A. Bellemare, “Numerical analysis of multifrequency erbium-doped fiber ring laser employing a periodic filter and a frequency shifter”, *IEE Proc. Optoelectronics*, vol. 147, No. 2, 115-119, 2000.
- [5] R. Slavík, S. LaRochele, and M. Karásek, „High-performance Adjustable Room Temperature Multiwavelength Erbium-Doped Fiber Ring Laser in the C-band“, *Optics Communications*, 206, 365-371, 2002.
- [6] R. Slavík, S. LaRochele, „Frequency Shift in a Fiber Laser Resonator“, *Optics Letters*, 27, 28-30, 2002.
- [7] P. Honzatko, P. Peterka and J. Kanka. „Modulation instability sigma-resonator fiber laser“. *Optics Letters*, vol. 26, no. 11, pp. 810-812, 2001.
- [8] P. Peterka, P. Honzatko, J. Kanka, V. Matejec and I. Kasik. „Generation of high repetition rate pulse trains in a fiber laser through a twin-core fiber“. In *Proc. SPIE Vol. 5036*, p.376-381, 2003.
- [9] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tuminelli and B. C. McCollum, „Double-clad, offset core Nd fiber laser“, In *Proc. Optical Fiber Sensors*, 88, New Orleans, USA, postdeadline paper PD5, 1988.
- [10] R. Maurer, “Optical waveguide light source,” U.S. Patent 3 808 549, Apr. 30, 1974.
- [11] P. Peterka, V. Kubeček, P. Dvořáček, I. Kašík and V. Matějec, „Experimental demonstration of novel end-pumping method for double-clad fiber devices“, *Opt. Lett.*, 31, 3240-3242 (2006).
- [12] P. Peterka, V. Matějec, I. Kašík, „Spojovací prvek a způsob výroby spojovacího prvku pro navázání signálu a čerpání do dvouplášťového optického vlákna“, patent č. 301 215, 2.11.2009.
- [13] P. Peterka, J. Maria, B. Dussardier, R. Slavik, P. Honzatko, and V. Kubecek, „Long-period fiber grating as wavelength selective element in double-clad Yb-doped fiber-ring lasers“, *Laser Phys. Lett.* 6(10):732-736, 2009.
- [14] P. Peterka and R. Slavik, „Extension of the double-clad Yb-doped fiber laser oscillation range thanks to long-period fiber grating filters“, *CLEO-Europe*, paper CJ.P.11-THU, Munchen, Germany, June 14-19, 2009.
- [15] J. Limpert, F. Roser, T. Schreiber, Ch. Wirth, T. Peschel, R. Eberhardt and A. Tunnermann. „The rising power of the fiber lasers and amplifiers“, *J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, 13(3):537-545, 2007.
- [16] P. F. Moulton, G. A. Rines, E. V. Slobodtchikov, K. F. Wall, K.F., G. Frith, B. Samson, A. L. Carter, „Tm-doped fiber lasers: Fundamentals and power scaling“ *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 15 (1):85-92, 2009.
- [17] P. Peterka, B. Faure, W. Blanc, M. Karasek and B. Dussardier, „Theoretical modelling of S-band thulium-doped silica fibre amplifiers“, *Optical and Quantum Electronics*, 36:201-212, 2004.
- [18] P. Peterka, I. Kasik, V. Matejec, W. Blanc, B. Faure, B. Dussardier, G. Monnom and V. Kubecek, „Thulium-doped silica-based optical fibers for cladding-pumped fiber amplifiers“, *Optical Materials*, 30:174-176, 2007.
- [19] D. A. Simpson, W. E. Gibbs, S. F. Collins, W. Blanc, B. Dussardier, G. Monnom, P. Peterka, and G. W. Baxter, „Visible and near infra-red up-conversion in Tm³⁺/Yb³⁺ co-doped silica fibers under 980 nm excitation“, *Opt. Express*, 16(18):13781-13799, 2008.
- [20] M. Karasek , P. Peterka and Jan Radil, „202 km repeaterless transmission of 2 × 10 GE plus 2 × 1 GE channels over standard single mode fibre“, *Optics Communications*, 235:269-274, 2004.

Ing. Pavel Peterka, Ph.D., tel.: +420 266 773 527, e-mail: peterka@ufe.cz

Dr. Ing. Pavel Honzátko, Ing. Miroslav Karásek, DrSc., Ing. Jiří Kaňka, CSc., Dr. Ing. Ivan Kašík, Ing. Vlastimil Matějec, CSc.

Ústav fotoniky a elektroniky AVČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 - Kobylisy

Plně optické zpracování datových toků

Předkládáme průřez činností Laboratoře nelineární a vláknové optiky na poli plně optického zpracování datových toků. Demonstrovali jsme plně optický převodník formátu RZ/NRZ, založený na křížové fázové modulaci a grupovém zpoždění v nelineárním Sagnacově interferometru, vlnový konvertor s vysokou konverzní účinností založený na konverzi křížové fázové modulace na amplitudovou v braggovské mřížce. Oba převodníky byly testovány při rychlostech 10, 20 a 40 Gb/s. Pro testování síťových zařízení při přenosové rychlosti 107 Gb/s jsme sestavili kombinaci optický multiplexer-demultiplexer.

Klíčová slova: plně optická vlnová konverze, plně optická konverze modulačního formátu

1. ÚVOD

Plně optické zpracování datových toků se stává důležitou součástí moderních optických přenosových systémů. Dovoluje zpracovávat data v optické doméně, aniž by bylo nutné optické signály převádět na elektrické. Jedině v optické doméně se dají zpracovávat datové toky s vysokou přenosovou rychlostí, jako např. v nedávném experimentu provedeném na Dánské technické univerzitě v Lyngsby, při němž byla časově multiplexována a následně demultiplexována data s přenosovou rychlostí 5,1 Tb/s v jediném kmitočtovém kanále [1]. Elektronické zpracování signálů je limitováno mezním kmitočtem tranzistorů a ten se pohybuje kolem hodnoty 300 GHz v současných pokročilých SiGe bipolárních heterostrukturálních tranzistorech.

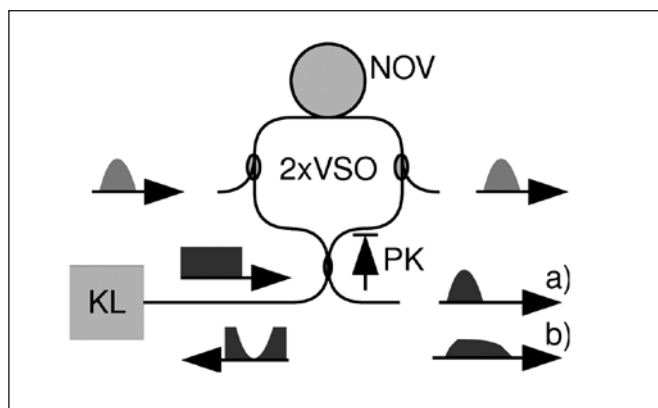
V naší laboratoři jsme provedli četné experimenty s plně optickým zpracováním datových signálů při přenosových rychlostech 10-160 Gb/s. Použití plně optických metod může být díky jejich jednoduchosti ekonomicky výhodné již od rychlosti 10 Gb/s. Cena elektronických zařízení rychle roste pro vyšší přenosové rychlosti, zatímco cena plně optických systémů zůstává téměř neměnná. Plně optické systémy jsou obvodově jednodušší, mají menší příkon a generují méně tepla. Mohou mít tedy nižší pořizovací i provozní náklady.

Cílem článku je ukázat několik námi studovaných zařízení pro plně optické zpracování signálů. Ukážeme jednoduchý převodník modulačního formátu z RZ (Return-to-Zero) na NRZ (Non-Return-to-Zero), vlnový konvertor a zařízení pro časové multiplexování a demultiplexování optických signálů.

2. PŘEVODNÍK MODULAČNÍHO FORMÁTU RZ/NRZ

Převodníky modulačního formátu se uplatňují na rozhraní dvou sítí (např. páteřní síť – metropolitní přístupová síť), ale zkoumalo se uplatnění i na páteřních sítích, kde by se na části trasy využívala lepší odolnost modulačního formátu NRZ vůči nelineárním jevům a na další části trasy odolnost modulačního formátu RZ vůči disperzi. Ve výsledku by se dosáhlo menšího zkruslení.

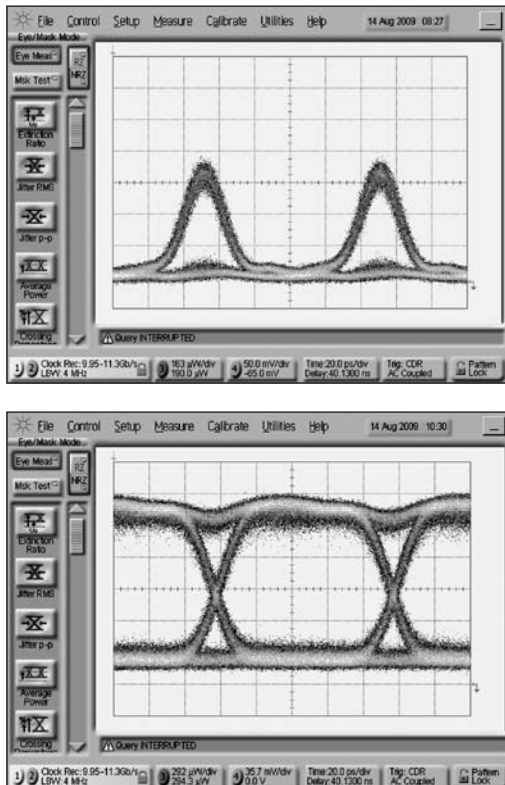
Převodník je založen na práci Bigo et al. [1]. Zatímco autoři původního článku za použití skalární teorie křížové fázové modulace dospěli k závěru, že použití nelineární vláknové smyčky není praktické pro převod RZ pulzů na NRZ, naše výsledky, které se opírají o vektorovou teorii křížové fázové modulace, ukazují, že se takto dají dosáhnout velmi dobré výsledky [2]. Skalární teorie předpokládala, že všechny signály uvnitř smyčky mají stejnou polarizaci. Vektorová teorie počítá s různými polarizačními stavy a jejich optimalizací lze dosáhnout dobrých parametrů převodníku. Metodu jsme vyzkoušeli při 10 Gb/s a 20 Gb/s, ale dá se snadno adaptovat i pro vyšší přenosové rychlosti.



Obr. 1 Převodník RZ/NRZ. KL-kontinuální laser, VSO-vlnově selektivní odbočnice, NOV-nelineární optické vlákno, PK-polarizační kontrolér. (a) Výstupní pulz při absenci rozdílu grupových rychlostí mezi kontinuální vlnou a datovými pulzy. (b) Výstupní pulz, jsou-li grupové rychlosti rozdílné

Nelineární vláknová smyčka je založena na Sagnacově interferometru, do něž je vloženo nelineární optické vlákno. Lineární Sagnacův interferometr funguje jako zrcadlo (obr. 1). Světlo z kontinuálního laseru je rozděleno v 3dB odbočnici rovným dílem na vlny obíhající smyčkou ve směru a proti směru hodinových ručiček. Lze-li zanedbat dvojitou, jsou po návratu obou vln na 3dB odbočnici fázové poměry vždy takové, že na výstupním portu interferují destruktivně a na vstupním portu konstruktivně, takže veškeré záření se odráží zpět. Smyčka samotná je tvořena nelineárním vláknem, jehož index lomu závisí na intenzitě světla, které jím prochází. Přímou do smyčky jsou pomocí vlnově selektivního vazebního členu navázány RZ pulzy, které je zapotřebí konvertovat. Pulz se šíří vláknem spolu s posměrnou kontinuální vlnou a způsobuje její fázový zdvih. Na výstupu nelineárního vlákna je RZ pulz vyvázan mimo smyčku dalším vlnově selektivním vazebním členem. Pokud ta část kontinuální vlny, která interagovala s pulzem získá nelineární fázový zdvih π vůči vlně protisměrně, budou obě vlny na výstupu interferovat konstruktivně a na výstupu se objeví pulz (obr. 1). Pokud je smyčka tvořena nelineárním vláknem s významnou disperzí, kontinuální vlna a RZ pulz se šíří různými grupovými rychlostmi. Interakční délka je tím omezena a výstupní pulz rozšířen. Je-li disperze taková, že samotný RZ pulz se příliš nerozšíří a spektrální vzdálenost mezi kontinuální vlnou a RZ pulzy je zvolena tak, aby rozdíl grupových zpoždění byl roven

bitové periodě, jsou výstupní pulzy téměř pravoúhlé a velmi dobře aproximují NRZ pulzy. Typické výsledky jsou zobrazené na obr. 2. Mezi přednosti tohoto řešení patří jednoduchost a malá závislost tvaru výstupních pulzů na tvaru a délce trvání vstupních pulzů.



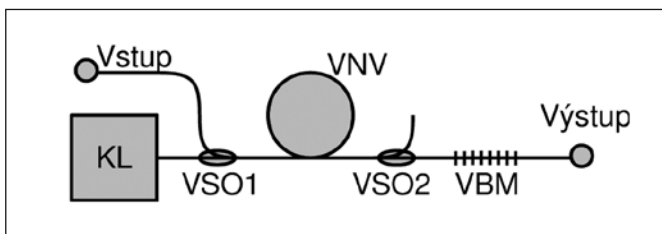
Obr. 2 Očkové diagramy (a) RZ pulzů na vstupu a (b) NRZ pulzů na výstupu převodníku při 10 Gb/s

3. VLNOVÝ KONVERTOR ZALOŽENÝ NA KŘÍŽOVÉ FÁZOVÉ MODULACI A VLÁKNOVÉ BRAGGOVSKÉ MŘÍŽCE

Vlnové konvertory převádějí signál z jedné vlnové délky na jinou při zachování modulačního formátu. Typickou oblast uplatnění představují směrovače. Vlastnímu datovému paketu předchází značka, která může být přenášena nízkou rychlostí a zpracovává se elektronicky. Samotná data se přenášejí vysokou rychlostí bez převodu na elektrické signály. Podle značky se rozhodne, zda se datový paket má poslat do směru A nebo B a podle toho se převede na vlnovou délku λ_A nebo λ_B . O ostatní se postará vlnově selektivní vazební člen.

V naší laboratoři jsme navrhli novou metodu vlnové konverze, která je založená na křížové fázové modulaci v krátkém segmentu vysoce nelineárního optického vlákna s následnou konverzí fázové modulace na amplitudovou v uniformní braggovské mřížce. Schéma vlnového konvertoru je na obr. 3.

Datový signál je zesílen na potřebnou úroveň v erbiovém zesilovači a sloučen ve vlnově selektivním vazebním členu se signálem z kontinuálního laditelného laseru. Při šíření vysoce nelineárním op-



Obr. 3 Schéma vlnového konvertoru s braggovskou mřížkou. KL – kontinuální laser, VSO – vlnově selektivní odbočnice, VNV – vysoce nelineární vlákno, VBM – vláknová braggovská mřížka

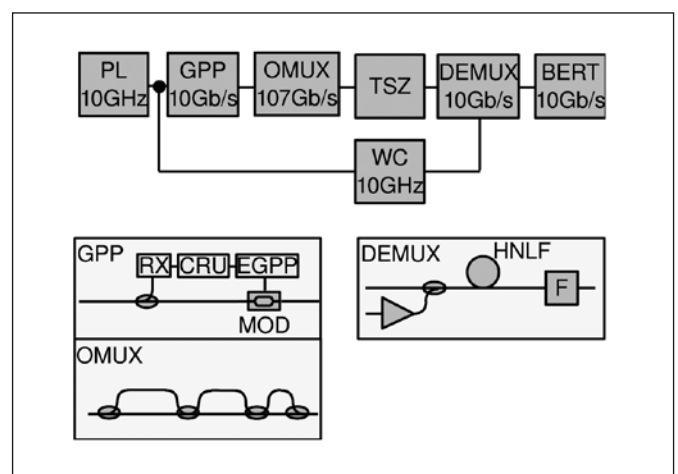
tickým vláknem se datová posloupnost obtiskne do fáze kontinuální vlny díky křížové fázové modulaci. Fázově modulovaná kontinuální vlna se oddělí od datových pulzů v další vlnově selektivní odbočnici a postupuje do braggovské mřížky. Braggovská mřížka musí mít rezonanční kmitočet blízký kmitočtu kontinuální vlny.

Při šíření optického signálu braggovskou mřížkou dochází k průchodu oblastí s periodickou změnou indexu lomu. Periodická modulace indexu lomu způsobuje mnohočetné částečné odrazy vstupního signálu, které se koherentně skládají v odraženou vlnu. Současně klesá amplituda dopředného signálu. Odražený signál v důsledku prostorově distribuovaného mechanismu jeho formování nemůže kopírovat okamžité změny amplitudy a fáze dopředného signálu. Je-li signál fázově modulován, ve zpětné vlně dochází ke středování fázových deviací dopředného signálu.

Pokud se objeví v signálu krátká fázová deviace o velikosti π , signál se neutlumí, ale naopak zesílí na úkor odražené vlny a na výstupu mřížky se objeví datový pulz. Takto zkonvertované pulzy mohou mít dvakrát větší amplitudu a čtyřikrát větší špičkový výkon než původní kontinuální vlna. Díky využití energie odražené vlny má tento vlnový konvertor výbornou konverzní účinnost, která je řádově lepší než konverzní účinnost konvertoru založeného na filtraci bočního pásma a o 6 dB předčí účinnost konvertoru s nelineárním Sagnacovým interferometrem.

4. ČASOVÉ MULTIPLEXOVÁNÍ A DEMULTIPLEXOVÁNÍ OPTICKÝCH SIGNÁLŮ NA 107 Gb/s

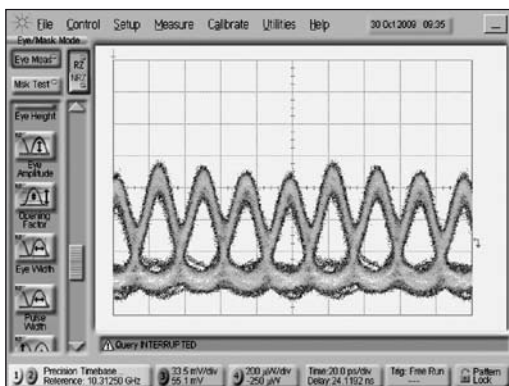
Základním způsobem dosažení vysokých přenosových rychlostí je časové multiplexování. Při něm se časově prokládají datové pulzy z více zdrojů s nižšími přenosovými rychlostmi, přístupnými pro elektronické obvody. U nás v laboratoři jsme vytvořili testovací zařízení pro rychlost 107 Gb/s. Předpokládá se, že to bude právě rychlost Ethernetu příští generace. V nejbližší budoucnosti se budou pravděpodobně prodávat karty, které budou přímo vysílat a přijímat signály touto rychlostí. Do té doby je však zapotřebí testovat přenosové trasy a vyvíjet síťové prvky s využitím stávajícího pomalejšího vybavení. V našem zařízení se jako výchozí používá signál s bitovou rychlostí 13,375 Gb/s. Ten je časově multiplexován ve třístupňovém optickém multiplexeru na 107 Gb/s. Po průchodu zkušební trasou je signál demultiplexován na původní rychlost 13,375 Gb/s a parametry jsou vyhodnoceny v měřiči chybovosti a pomocí datového komunikačního analyzátoru. K demultiplexování využíváme čtyřvlnové směšování v optickém vlákně s vysokým nelineárním indexem lomu (HNLF, Highly Nonlinear Fibre).



Obr. 4 Blokové schéma laboratorního pracoviště pro generaci, přenos a následnou demultiplexaci RZ 107 Gb/s signálu. PL-pulzní laser, EGPP-elektronický generátor pseudonáhodné posloupnosti, OMUX-optický multiplexer, TSZ-testované síťové zařízení, DEMUX-demultiplexer, BERT-měřič chybovosti, RX-přijímač, CRU-jednotka obnovy hodinového taktu, MOD-modulátor, HNLF-vysoce nelineární vlákno, F-filtr

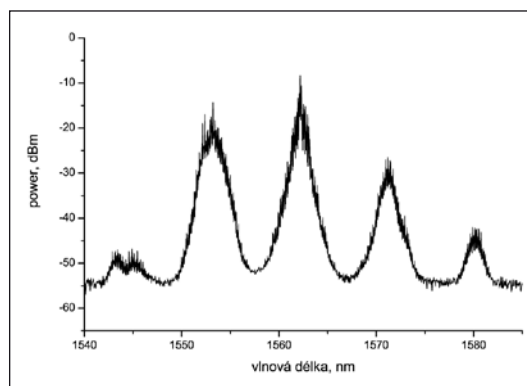
Blokové schéma laboratorního pracoviště pro generaci, přenos a následnou demultiplexaci je zřejmé z obr. 4.

RZ signál s opakovacím kmitočtem 13,375 Gb/s je odvozen z pasivně vidově synchronizované laserové diody s integrovaným saturovatelným absorbérem (MLLD, Mode Locked Laser Diode), která generuje nepřetržitý sled pulzů s pološířkou ≈ 3 ps. Část signálu je přivedena do optického přijímače (10 Gb/s Rx), jehož výstup slouží k obnově hodinového signálu (CRU, Clock Recovery Unit). Jednotka CRU spouští generátor pseudonáhodné posloupnosti (PRBS, Pseudo Random Bit Sequence). Touto pseudonáhodnou posloupností je v Machově-Zehnderově modulátoru (MOD) z nepřetržitého sledu pulzů vytvořen RZ signál s opakovacím kmitočtem 13,375 Gb/s. V třístupňovém časovém multiplexeru (OMUX) je vynásoben na 107 Gb/s. Multiplexer je navržen tak, aby zachovával pseudonáhodnou posloupnost 2⁷-1. Náš komunikační analyzátor neumožňuje zobrazit očkový diagram při 107 Gb/s. Na výstupu druhého stupně optického multiplexoru má signál přenosovou rychlost 53,5 Gb/s a jeho očkový diagram je znázorněn na obr. 5. Za OTDM (Optical Time Domain Multiplexing) násobičem je signál po zesílení v erbiem-dopovaném zesilovači (EDFA, Erbium Doped Fibre Amplifier) přenášen přes testované síťové zařízení nebo trasu.

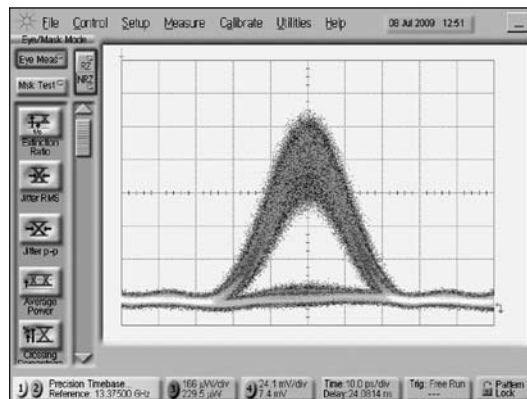


Obr. 5 Očkový diagram RZ signálu s opakovacím kmitočtem 53,5 Gb/s na výstupu druhého stupně optického multiplexoru

Pro demultiplexování pomocí čtyřvlnového směšování potřebujeme zdroj hodinového taktu s jinou vlnovou délkou, než kterou měl signál. V našem laboratorním zařízení odvozujeme hodinový taktovací signál s kmitočtem 13,375 GHz přímo ze zdroje. Využíváme k tomu vlnový konvertor podle obr. 3. Vysoce nelineární vlákno (HNLf) pracuje jako pulzně čerpaný vláknový parametrický zesilovač (FOPA, Fibre Optical Parametric Amplifier). Jestliže se časově kryje hodinový pulz, který má opakovací kmitočtem 13,375 GHz a velký špičkový výkon, a datový pulz signálu s bitovou rychlostí 107 Gb/s, tento datový pulz se parametricky zesílí a současně se vygeneruje jalová vlna. Jalová vlna má kmitočet daný zákonem zachování energie. Díky tomu, že výstupní signál je tvořen jalovou vlnou, která vzniká jen v případě časové koincidence hodinového pulzu a datového pulzu, dojde k demultiplexování na přenosovou rychlost 13,375 Gb/s. Optické spektrum na konci HNLf je znázorněno na obr. 6. Jalová vlna se z něj vybírá pásmovou propustí F. V experimentu byla MLLD naladěna na vlnovou délku 1552,8 nm a demultiplexovaný signál vznikl na vlnové délce 1571,3 nm. Vhodná časová poloha signálu a hodinových pulzů se nastavuje pomocí optické zpožďovací linky. Očkový diagram demultiplexovaného signálu s bitovou rychlostí 13,375 Gb/s je znázorněn na obr. 7. Demultiplexovaný signál je převeden do elektrické podoby v 10 Gb/s přijímači a je analyzován měřičem chybovosti.



Obr. 6 Optické spektrum na konci HNLf



Obr. 7 Očkový diagram jednoho z demultiplexovaných signálů s bitovou rychlostí 13,375 Gb/s

5. ZÁVĚR

Plně optické síťové prvky umožňují přenos dat rychlostí, která je daleko za možnostmi dnešních elektronických zařízení. Díky své jednoduchosti a úspornosti mohou být ekonomickou alternativou i při nižších přenosových rychlostech. V tomto článku jsme představili plně optický převodník modulačního formátu RZ/NRZ, vlnový konvertor a laboratorní sestavu pro časové multiplexování a demultiplexování optických signálů.

Poděkování

Tento výzkum probíhal s podporou programu Informační společnost AVČR 1ET300670502 a grantu GACR P102/10/0120. Zvláštní dík patří sdružení CESNET z.s.p.o. za spolupráci na mnohých experimentech.

Literatura

- [1] H.C.H. Mulvad, M. Galili, L.K. Oxenløwe, H. Hu, A.T. Clausen, J.B. Jensen, C. Peucheret, and P. Jeppesen, "Demonstration of 5.1 Tbit/s data capacity on a single-wavelength channel," *Opt. Express* **18**, 1438-1443 (2010) <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-18-2-1438>
- [2] S. Bigo, E. Desurvire, B. Desruelle, All-optical RZ-to-NRZ format conversion at 10Gbit/s with nonlinear optical loop mirror, *Electronics Letters* 30 (1994) 1868-1869.
- [3] P. Honzátko, M. Karasek, 10 and 20 Gb/s all-optical RZ to NRZ modulation format and wavelength converter based on nonlinear optical loop mirror, *Optics Communications*, doi:10.1016/j.optcom.2010.01.019.

Dr. Ing. Pavel Honzátko, tel.: 266 773 527, e-mail: honzatk@ufe.cz,
Ing. Miroslav Karásek, DrSc., tel.: 266 773 207, e-mail: karasek@ufe.cz.
Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 - Kobylisy

Historie, stav a perspektivy optického sdělování v České republice

V článku je popsán vývoj oboru optického sdělování v České republice v jednotlivých etapách společenského vývoje: období od vzniku tohoto oboru v Československu do konce r. 1989, v průběhu let 1990 – 1992 a od začátku r. 1993 do současnosti. Článek se zabývá vývojem situace v základním a aplikovaném výzkumu, výroby a aplikací v budování spojů a sítí pro přenos signálů v optické formě. V závěru článku je diskutován očekávaný budoucí vývoj optického sdělování v ČR.

Klíčová slova: optické sdělování, optické komunikace, telekomunikace

1. ÚVOD

Na možnost generovat koherentního záření ve vhodném aktivním prostředí upozornil již A. Einstein v r. 1916. Počátek moderních metod dálkového přenosu signálů na optických kmitočtech je třeba hledat v polovině minulého století, kdy fyzikové vynalezli kvantové generátory. V šedesátých letech byly sestrojeny pevnolátkové lasery a začátkem sedmdesátých let speciálně lasery polovodičové, které byly prakticky použitelné ve sdělovacích systémech. Šťastnou shodou okolností téměř ve stejnou dobu se podařilo vyrobit i vhodné prostředí pro přenos signálů na velké vzdálenosti na optických kmitočtech – světlovody, obecněji vláknové optické vlnovody nebo stručněji optická vlákna. Jelikož prvky pro konverzi optických signálů na signály elektrické (fotodiody) byly pro vlnové pásmo transparence tehdejších (křemenných) světlovodů již několik desetiletí k dispozici, základní kameny pro budování optických spojů byly na světě. Tím byla odstartována éra moderních komunikací založených na přenosu optických signálů. Jak na tento vývoj reagovali v tehdejší Československu lidé odpovědní za rozvoj, výstavbu a provoz systémů pro přenos informace na dálku? Jaká je situace v tomto oboru v ČR dnes a jaký vývoj lze očekávat v nejbližší budoucnosti? V tomto článku se pokusíme dát alespoň částečnou odpověď na tyto otázky. Budeme používat obecnější pojem „optické sdělování“, místo často používaného pojmu optické (tele)komunikace.

2. STRUČNÁ HISTORIE OBORU OPTICKÉHO SDĚLOVÁNÍ V ČESKÉ REPUBLICE

Jelikož historie optického sdělování v ČR je dlouhá kolem 35 let, můžeme v tomto rozsahem omezeného článku nabídnout pouze určitý pohled na vývoj tohoto oboru popisem situace v jednotlivých obdobích a uvedením některých mezníků. Zájemce o podrobnější informace na toto téma odkazujeme na velmi fundovanou práci jednoho z klíčových přímých účastníků procesu vzniku a rozvoje oboru optického sdělování v Č(S)R [1].

Podmínky pro rozvoj optického sdělování v naší zemi byly velmi rozdílné v různých historických obdobích: Do r. 1989 (ČSSR), 1990 – 1992 (ČSFR) a od počátku roku 1993, kdy se do té doby společný stát Čechů a Slováků rozdělil na dvě samostatné republiky.

2.1 Období do r. 1989

Odborníci v tehdejší ČSSR reagovali na tento vývoj v oblasti optického sdělování již v r. 1975: V TESLA Výzkumný ústav sdělovací techniky A.S. Popova (VÚST) se sešla skupina nadšenců, kteří iniciovali založení výzkumného programu orientovaného na optické sdělování. Následně, v r. 1978 se konal první celostátní seminář věnovaný tomuto oboru – „Optické komunikace 1978“, který se později přetvořil na konferenci pořádané pravidelně v dvouletém intervalu dodnes, kromě krátkého přerušení v bouřlivém období těsně po r. 1989. Zpočátku byl výzkum zaměřen na vhodné mate-

riály, později na součástky a nakonec na kompletní optické spoje pro budování telekomunikačních sítí.

Od r. 1975 byl aplikovaný výzkum organizován v rámci státního úkolu „Materiály a technologie pro využití vybraných fyzikálních jevů v elektronice a elektrooptice“, na který pak navazoval státní úkol „Optoelektronické sdělovací systémy“. Oba úkoly koordinoval VÚST. Akademická sféra byla zapojena do tohoto procesu v rámci cílového projektu „Optické sdělování“ státního plánu základního výzkumu. Tento cílový projekt byl koordinován tehdejší ČSAV. Tyto výzkumné programy pokrývaly prakticky celou oblast optického sdělování – od materiálů, přes součástky až po systémy a měřicí techniku. Byla do nich zapojena prakticky všechna čs. výzkumná a vývojová pracoviště, která mohla svým zaměřením nějakým způsobem k řešení vytýčených úkolů přispět. Po formální stránce byl tento program dobře provázaný – od základního k aplikovanému výzkumu až po vývojová pracoviště výrobních podniků. ČSSR byla zapojena také do programu spolupráce členských států tehdejší Rady vzájemné hospodářské pomoci (RVHP).

Počátkem osmdesátých let byly v ČSSR vyvinuty vzorky nejdříve nekoherentních luminiscenčních diod (LED) pro pásmo vlnových délek 850 nm, následně pak pro pásma 1300 a 1500 nm. Výsledkem navazujícího výzkumu a vývoje (VaV) koherentních zdrojů IČ záření pro tato pásma byly vzorky polovodičových laserových diod (LD). Zde narazili pracovníci VaV na obtížný problém životnosti a spolehlivosti těchto součástek, bez jehož vyřešení nemohly být aplikovány v komerčně provozovaných telekomunikačních sítích. Byly nasazeny pouze v pilotním projektu v Praze.

Druhým klíčovým prvkem optických sdělovacích systémů jsou optická vlákna – světlovody. Stručně řečeno, základní výzkum, včetně výchozích materiálů a preforem pro výrobu optických vláken, probíhal ve Společné laboratoři silikátů ČSAV a VŠCHT Praha (SLS) a optické kabely. Výsledky tohoto výzkumu vč. vzorků vláken byly předávány do vývoje a výroby ve VÚSU Teplíce, odkud vyrobená vlákna putovala do VÚKI Bratislava, který zajišťoval vývoj optických kabelů. Optické kabely vyráběl (a dodnes vyrábí) Kablo Děčín. Předmětem VaV optických vláken byly v první etapě světlovody typu PCS (Plastic Clad Silica se skleněným jádrem a polymerovým pláštěm). Měly být (a v určitém rozsahu byly) použity ve spojích pro přenos dat na malé vzdálenosti. V další etapě byla vyvinuta vlákna GI (s gradientním profilem indexu lomu po průřezu jádra vlákna) a koncem osmdesátých let i vlákna jednovodová určená pro telekomunikace.

Ve VÚST probíhal také výzkum optických konektorů, jejich vývoj a později i výrobu zajišťovala Tesla Jihlava. Další pasivní optické součástky, jako např. směrové odbočnice a optické de/multiplexory, byly předmětem výzkumu na několika pracovištích základního i aplikovaného výzkumu. Nedostaly se však do hromadné výroby.

Pro přenos dat na malé vzdálenosti (do 1000 m) rychlostí do 10 Mb/s vyvinul VÚST hybridně integrované moduly osazené na vysílací straně diodami LED pracující na vlnové délce kolem 850 nm do kabelového spoje s PCS světlovodem. Datová pojítka tohoto druhu vyráběla Tesla Blatná. Pro využití v telekomunikacích vyvinul VÚST (optický vysílač a přijímač) ve spolupráci s Výzkumným ústavem telekomunikací (VÚT, kodeky) zařízení pro spoje PCM 2. řádu (8 Mb/s), která měla vyrábět Tesla Strašnice.

Ačkoliv nástup VaV v ČSSR byl oproti vývoji ve světě zpočátku opožděn jen asi 5 let, úsilí zainteresovaných pracovníků a vložené investice nepřinesly očekávané ovoce včas. Vývoj většiny součástek nebyl dotažen to takového stavu, aby mohly být průmyslově vyráběny. Tam, kde se to podařilo, nebyly dostatečně velké zakázky od domácích odběratelů, export se nepodařilo zajistit ani v zemích RVHP, ačkoliv účast v některých programech spolupráce byla podložena závaznými smlouvami. Na pokročilé materiály, technologie a měřicí techniku bylo uvalené důmyslně propracované embargo v rámci systému COCOM, který dovozoval vývoz pouze zastaralých technologií a zařízení do vybraných zemí (včetně ČSSR). I na to, co dovážet bylo dovoleno, nebyl dostatek devizových prostředků. Spolupráce v rámci zemí RVHP byla těžkopádná a málo produktivní, snad s výjimkou základního výzkumu a na komerční úrovni s bývalou NDR.

Zatímco období do r. 1989 bylo bohaté na výzkumnou činnost v oblasti optického sdělování, dění v rezortu telekomunikací bylo podstatně skromnější a opatrnější. Byly pro to některé objektivní důvody: nedostatek investičních prostředků, protože zisky z tohoto odvětví stát odčerpával do státního rozpočtu, zatímco přiděl devizových prostředků na nákup špičkových zařízení a měřicí techniky byl silně limitován. Domácí průmysl nebyl, až na některé výjimky (např. optické kabely a konektory), schopen dodávat zařízení v potřebném množství, sortimentu a v požadované kvalitě srovnatelné se světovou úrovní, což byl i tenkrát oprávněný požadavek správy spojů, protože každá národní telekomunikační síť je součástí globální sítě. Na dovoz zařízení vyšší technické úrovně z průmyslově vyspělých zemí bylo uvaleno embargo. Přesto pracovníci rezortu se snažili v rámci svých možností držet krok s vývojem ve světě. V r. 1984 nainstalovali mezi telefonními ústřednami Praha - Dejvice a Praha - Střed první experimentální optický spoj v ČSSR [2]. Veškeré zařízení pro realizaci tohoto projektu bylo dovezeno z Japonska. Spoj byl dlouhý asi 5 km, kabel obsahoval 8 mnohovlákenných GI vláken, rychlost přenosu byla 8 Mb/s. Pracovníci Montážního podniku spojů zde získali cenné zkušenosti s instalací nové technologie a s jejím provozováním. Zahájili také přípravné práce na zatažení makety optického kabelu dodaného VÚKI Bratislava. Na volných vláknech nainstalovaného kabelu dostali také domácí potenciální dodavatelé příležitost vyzkoušet si svoje koncová zařízení. Takto byly zde do experimentálního provozu nasazeny prototypy zařízení vyrobené v Tesle Strašnice. Volná vlákna tohoto kabelu byla využita i v prvním experimentu s přenosem televizního signálu v ČSSR, který v r. 1984 provedli pracovníci tehdejšího Ústavu radiotechniky a elektroniky ČSAV. Pomocí laboratorního vzorku optického vysílače a přijímače a aplikací širokopásmové frekvenční modulace subnosné překlenují vzdálenost přes 15 km přesmyčkováním tří pětikilometrových úseků světlovodů v nainstalovaném kabelu.

V druhé polovině osmdesátých bylo v Praze vybudováno asi 60 km tras s optickými kabely obsahující mnohovlákenné světlovody typu GI. Tyto trasy propojovaly digitální ústředny E10 rychlostí 8,5 Mb/s na vlnových délkách nejdříve v pásmu 850 nm, později na vlnové délce 1300 nm rychlostí 34 Mb/s. První digitální přenosový systém 3. řádu (34 Mb/s) byl v Praze uveden do provozu 15. 6. 1989 [3]. V Praze pak bylo instalováno celkem 6 systémů 3. řádu s celkovou kapacitou 92 třicetikanálových skupin, z toho 5 pracovalo na vlnové délce 1300 nm emitované LED diodou na vysílací straně. Optické kabely i přenosová zařízení byly z dovozu.

Již v té době bylo zřejmé, že optické spoje s GI vlákny nejsou perspektivní, neboť z principu mají omezenou šířku pásma. Avšak

embargo na pokročilé technologie nedovolovalo nakoupit technologie na úrovni doby – kabely s jednovlákennými vlákny a rychlejší přenosová zařízení. Nicméně realizace prvních projektů optických spojů přes jejich zastaralou technologii umožnila pracovníkům spojů získat zkušenosti a dovednosti potřebné pro montáž, instalaci a údržbu optických kabelů, přičemž nainstalované přenosové kapacity byly v dané době postačující.

2.2 Období let 1990 - 1992

Změna politických poměrů po listopadu 1989 měla dramatický dopad i na obor optického sdělování.

Relativně zaostalá čs. výrobní základna neodolala zahraniční konkurenci a prakticky se brzy až na výjimky rozpadla. Především skončila výroba aktivních polovodičových prvků – zdrojů IČ záření v Tesle Blatná, protože podobné, avšak již osvědčené výrobky byly rázem dostupné dovozem ze zahraničí se zaručenými parametry a za podstatně nižší cenu. Zpravidla přežily podniky, do nichž vstoupil zahraniční kapitál. Ty se pak vybavily moderními technologiemi a tím se jim otevřely i zahraniční trhy pro jejich většinou licenční výrobky.

Od některých výrobních podniků se oddělili pracovníci vývoje a založili malé soukromé společnosti, např. skupina vývojářů z Tesly Jihlava založila prosperující společnost Optokon spol. s r.o., od které se později oddělila úzce specializovaná společnost OPTOVIT s.r.o. Vysokou odolnost vůči razantní změně podnikatelského prostředí prokázala společnost Kablo Děčín (nyní Kabelovna Děčín Podmokly, člen nadnárodní kabelářské skupiny Wilms), která má téměř stoletou tradici ve výrobě kabelů. V r. 1990 Kablo Děčín vyrábělo optické kabely až s 12 GI světlovody dodávané z VÚSU Teplice pro pásma vlnových délek 850 i 1300 nm [4]. Tyto kabely byly nainstalovány v r. 1989 v Praze propojující ústředny Žižkov a Smíchov spolu s dovezenými kabely od firmy ALCATEL [5].

Na aplikovaný výzkum měla změna politického režimu dramatický dopad. Rezortní výzkumné ústavy se rozpadly, protože ztratily odběratele výsledků své práce. Příkladem může být osud Výzkumného ústavu sdělovací techniky A.S. Popova, který byl hlavním nositelem aplikovaného výzkumu v oboru optoelektroniky. V některých případech se i z aplikovaných výzkumných ústavů oddělily skupiny zaměstnanců, kteří založili malé soukromé společnosti využívající své kvalifikace a zkušenosti a stali se průkopníky využívání optiky pro optické sdělování. Např. část výzkumného týmu pracovníků VÚST, kteří se podíleli na řešení státního úkolu „Optoelektronické sdělovací systémy“, založili společnost DATTEL s.r.o., která jako první v ČSSR začala realizovat koncepci multifunkčních sítí při budování televizního kabelového rozvodu v části vnitřní Prahy. Souběžně s metalickými kabely tam nainstalovala i kabely optické a stala se tak první společností v ČR, která vybudovala optickou přístupovou síť. Později obdržela tato společnost i licenci na poskytování telekomunikačních služeb a stala se zárodkem české části jednoho z nejvýznamnějších alternativních telekomunikačních operátorů – nadnárodní společnosti GTS – Novera a.s. Dalším příkladem úspěšného uplatnění znalostí specialistů na optoelektroniku dřívějších zaměstnanců VÚST je společnost MIKROKOM s.r.o., ze které se další specializací oddělila společnost PROFIBER Networking s.r.o. Obě tyto společnosti hrají i dnes významnou roli v rozvoji optického sdělování v ČR. Podobně z rezortního Výzkumného ústavu spojů někteří specialisté odešli do soukromých společností (např. do Diamond CS s.r.o, nyní SQS Vlákenná optika a.s., Sitel s.r.o., atd.), Výzkumný ústav telekomunikací se přetransformoval do TESLA TELEKOMUNIKACE, spol. s r.o. apod. Z některých výzkumných, resp. vývojových pracovníků se stali pravděpodobně jedni z nejkvalifikovanějších distributorů (často s vědeckými hodnotami) výrobců zahraničních firem v ČR.

Ústavy základního výzkumu, které byly v předchozím období zapojené do výzkumných programů v oblasti optoelektroniky, také buď zcela ukončily svoje aktivity v tomto oboru, anebo se zapojily do zahraničních, zejména evropských projektů. Např. ÚRE ČSAV se zapojil do systémového projektu COST 239 „Advanced

infrastructure for photonic transmission networks“. V ÚŘE ČSAV vyvrcholily práce také na vývoji laserových diod typu DC PBH (se zarostlou aktivní oblastí a blokovacím přechodem PN) pro nepřetržitý provoz v pásmu 1100 až 1670 nm se (na tu dobu) špičkovými parametry (prahový proud 11 mA). V tomto ústavu byly vyvinuty také aparatury pro zahořování těchto součástek jako součást testů jejich životnosti [6]. Tyto práce byly v tomto stadiu zastaveny ze stejných důvodů jako v aplikovaném výzkumu – výsledky nebylo komu předat do výroby a následného využití v praxi. Kolektiv pracovníků ÚŘE ČSAV ve spolupráci s Tesla VÚST (z nichž někteří po zrušení VÚSTu přešli na FEL ČVUT Praha) pokračoval ve výzkumu planárních světlovodných struktur, viz např. [7].

V Ústavu chemie skelných a keramických materiálů ČSAV (ÚCHSKM, do r. 1988 SLS) sice byla vyvinuta také jednovidová vlákna (JV), ta ale nebyla zavedena do výroby ve VÚSU Teplice. Ten později koupila zahraniční firma, která zde pomohla udržet v omezeném rozsahu výrobu optických vláken. Světový trh ovládlo několik málo velkých společností, které byly schopny uspokojit prakticky veškerou poptávku po optických vláknech. Bohatě zkušenosti z výzkumu vlastností a technologie a přípravy optických vláken v ÚCHSKM byly později využity ve výzkumu speciálních (aktivních) vláken v ÚŘE (od r. 2007 Ústav fotoniky a elektroniky, ÚFE) AV ČR, která našla aplikace mimo odvětví telekomunikací, resp. by mohla být využita v další generaci optických spojů.

Někteří pracovníci základního výzkumu odešli do zahraničí, jiní se uplatnili ve vedení nově vznikajících společností, nemalý počet z nich však také jako jejich kolegové z aplikovaného výzkumu skončili jako distributoři pokročilých dovážených výrobků.

Na rozdíl od oblasti výzkumu, otevřením hranic pro dovoz vyspělé techniky a technologií a umožněním vstupu zahraničního kapitálu do odvětví čs. telekomunikací se vytvořily podmínky pro zásadní modernizaci a rozšíření čs. telekomunikační sítě. V této nové situaci bylo v r. 1990 rozhodnuto, že transportní síť bude radikálně modernizována pomocí nejnovějších přenosových prostředků [8]. Na základě dvou studií zadaných zkušeným zahraničním firmám byla přijata nová strategie rozvoje čs. telekomunikační sítě s výhledem do r. 2000. Byla přijata koncepce výstavby digitální překryvné sítě DON (Digital Overlay Network) vybavené přenosovými zařízeními SDH (Synchronous Digital Hierarchy) s využitím optických přenosových prostředků, což znamenalo kromě urychlené digitalizace sítě také masivní nasazení optiky do transportní sítě. Nová (překryvná) síť byla budována od páteře, tj. od mezinárodní ústředny a tranzitních ústředěn směrem do nižších úrovní sítě při současném celoplošném fungování stávající analogové sítě.

Koncem r. 1991 byl vypracován a v únoru 1992 schválen velmi ambiciózní tzv. 1. telekomunikační projekt, který definoval základní směry rozvoje čs. telekomunikační sítě. V první etapě realizace tohoto projektu byla zahájena výstavba digitálních ústředěn v Praze, Brně, Ostravě a Olomouci. Optické kabely s jednovidovými vlákny byly v této etapě pokládány zatím jen v městských aglomeracích, celkem v uvedených městech přes 300 km 8 až 40 vláknových kabelů. V Praze bylo vybudováno 42 traktů s přenosovou rychlostí 140 Mb/s, což představovalo kapacitu 80 640 telefonních kanálů. Přenosové kapacity vybudované v této etapě výstavby byly uvedeny do provozu během 1. pololetí 1993.

2.3 Období od začátku roku 1993 dodnes

Dne 31. 12. 1992 se rozdělila tehdejší Česká a slovenská federativní republika na dva samostatné státy. To samozřejmě opět mělo zásadní dopad na obor optického sdělování v ČR. Rozpadly se vazby mezi výrobními podniky i mezi zbylými výzkumnými institucemi. Pracovníci základního výzkumu se více zaměřili na teoretické práce, viz např. [9, 10], nebo koncepční studie, viz např. [11]. Prohloubila se účast pracovišť základního výzkumu na evropských projektech. Např. ÚŘE AV ČR navázal na svoji předchozí účast v projektu COST 239 a inicioval v r. 2000 a po celou dobu své existence koordinoval evropský projekt COST 266 „Advanced infrastructure for photonic transmission networks“

[12]. Zde získané znalosti byly přenášeny do domácího prostředí na různých konferencích, seminářích a ve výuce na českých vysokých školách.

Telekomunikační síť se rozdělila na dvě národní sítě, rozvojové plány na její modernizaci se musely přepracovat.

Významnou hnací silou výstavby optických sítí v Č(SF)R v tomto období byly mezinárodní projekty na výstavbu magistrál pro zajištění mezinárodního tranzitního provozu. Vzhledem k výhodné geografické poloze využila ČSFR příležitosti se do těchto projektů zapojit.

Projekt TEL (Trans-Europe Line) byl iniciován již v r. 1990 německým operátorem DBP Telekom. Původně měla být postavena trasa z Frankfurtu přes Drážďany a Varšavu do Moskvy s odbočkou přes Liberec do Prahy s kapacitou 4 x 140 Mb/s. Ještě před započítáním prací však bylo rozhodnuto prodloužit tuto magistrálu z Prahy přes Brno a Bratislavu do Budapešti. Čs. spoje využily tuto příležitost a vybudovaly přes celé území ČSFR optický spoj až do Bratislavy v té době nejmodernější technologií: Byl osazen systémem SDH 5. řádu (622 Mb/s), z Prahy do Brna dokonce systémem 6. řádu (2,5 Gb/s). Kabel obsahoval 20 až 30 JV vláken, v úseku z Prahy na hranici se Slovenskem byl položen do středního dělicího pásu dálnice. Veškeré zařízení včetně kabelu bylo z dovozu. Tento úsek magistrály dlouhý přes 500 km byl uveden do provozu koncem r. 1993.

Dalším mezinárodním projektem na vybudování optické magistrály vedoucí částečně územím ČR byl projekt NSL (North-South Line). Byl iniciován a podporován dánským telekomunikačním provozovatelem a dánským výrobcem přenosové techniky. Magistrála propojila 20vláknovým optickým kabelem přenosovou rychlostí 622 Mb/s Dánsko s Varšavou a Petrohradem a odbočkou přes Krakov, Cieszyn, Ostravu a Brno také s Vídní.

V následujících letech pokračovalo rychlým tempem „skelnatění“ české telekomunikační sítě od nejvyšší úrovně (tranzitní) národní sítě k propojení všech (již vesměs digitálních) ústředěn a nakonec i vzdálených účastnických jednotek. Pro zvýšení spolehlivosti sítě byla na nejvyšší úrovni sítě realizována polygonální a na nižších úrovních kruhová topologie.

Významným hnacím momentem rozvoje telekomunikačních sítí a služeb poskytovaných prostřednictvím těchto sítí byla liberalizace telekomunikačního trhu. V rámci EU tento proces začal v r. 1998. Umožnil zřízovat a provozovat telekomunikační sítě a poskytovat služby všem subjektům splňujícím stanovené podmínky. Znamenal postupné narušení monopolního postavení národních provozovatelů i v oblasti základní, tj. telefonní služby.

V ČR již v r. 1996 vydal Český telekomunikační úřad několika společnostem pověření ke zřizování a provozování některých (přístupových) částí jednotné telekomunikační sítě. Společnosti SPT TELECOM a.s. zůstal až do r. 2000 monopol na (velmi výnosné) provozování meziměstských a mezinárodních služeb. Částečné uvolnění trhu na úrovni přístupových sítí nemělo u podnikatelů kvůli nízké rentabilitě valnou odezvu. Významným však byl fakt, že mezi držiteli licence se objevili i provozovatelé televizních kabelových rozvodů (TKR). Dnes již i provozovatelé malých TKR běžně poskytují veškeré služby elektronických komunikací.

V dalších letech byla liberalizace telekomunikačního trhu i v ČR rozšířena na celou síť a na veškeré služby založené na přenosu informace. Z pohledu rozvoje oboru optického sdělování nejdůležitějším důsledkem tohoto vývoje byl vznik tzv. alternativních operátorů, kteří svoje dříve privátní (specializované) sítě začali modernizovat masivním nasazováním optických spojů a nabízet své služby zájemcům v konkurenci s dominantním operátorem. Pionýrem v tomto směru byl Výzkumný ústav energetický Brno, který již v r. 1981 instaloval optický kabel ve vysokonapěťové rozvodně Sokolnice u Brna [13]. Od devadesátých let pak tehdejší provozovatel čs. energetické sítě postupně vybuďoval rozsáhlou optickou síť sestávající ze závažných optických kabelů realizovaných jako kombinované zemnicí lano. Tato síť se později stala základem páteřní optické sítě významného alternativního provozovatele GTS

Novera a.s. Podobně vznikly optické sítě dalších alternativních operátorů, např. ČD-Telematika a.s. (pokládka optických kabelů podél železničních tratí), TransgasNet Praha a.s. (pokládka optických kabelů podél plynovodů), apod.

Zvláštní kapitolu tvoří využití optických spojů pro přenos televizního signálu. Veřejnosti byl poprvé předveden tento způsob přenosu TV signálu po optickém kabelu položeném na Karlově mostě v Praze mezi Starým Městem a Malou Stranou již na jaře 1984. Akci, jejímž cílem byla osvěta, přenášela československá televize. První odborné experimenty, jak již bylo zmíněno, byly provedeny na prvním čs. optickém spoji mezi ústředními v Praze-Dejvicích a Praha - střed.

Koncem osmdesátých let navrhli a ve spolupráci s Tesla VÚST vyvinuli pracovníci ÚŘE ČSAV optický vysílač a přijímač pro přenosu TV signálu studiové kvality v analogové formě. Po jejich úspěšném odzkoušení v TV studiu v Praze na Kavčích horách bylo v Tesle Hloubětín vyrobeno několik kusů tohoto zařízení, které tam pak od podzimu 1989 sloužily bez větších závad více než 15 let. Na základě dobrých zkušeností s tímto způsobem přenosu TV signálů se ve studiovém komplexu Kavčí Hory od té doby pro tento účel instalují pouze světlovodné spoje. S rozšiřováním produkce pořadů s vysokým rozlišením, jejichž přenos vyžaduje extrémně velkou šířku pásma (až 3 Gb/s), je využívání optického přenosu těchto signálů naprostou nutností.

Komplex TV studia na Kavčích horách je napojen světlovodnými kabely i přímo na některé významné budovy v ČR, např. na Senát, Poslaneckou sněmovnu, Pražský hrad, apod. TV signály mimo město, např. k TV vysílačům, dopravuje po své optické síti vybraný telekomunikační operátor. Signály jsou nejdříve zakódovány do digitálního tvaru, pak jsou komprimovány do formátu MPEG-2 nebo MPEG-4 (pro HDTV). Kromě této distribuční sítě je podobně koncipována i síť kontribuční, přes kterou jsou z různých strategicky umístěných přípojních bodů (např. u sportovních stadionů, divadel apod.), po optických kabelech přiváděny TV signály do TV studií. Optickými spoji jsou propojeny také TV studia ČT v Praze, Brně, Ostravě a některá regionální studia.

Jiným příkladem optického přenosu TV signálů z poslední doby je distribuce svých TV (včetně HDTV) programů ze studia TV Nova provozovatelům televizních kabelových rozvodů (TKR) a poskytovatelům připojení koncových uživatelů k internetu (ISP). Přenosová rychlost pro jeden TV program se pohybuje od 8 Mb/s (komprimovaný signál ve formátu MPEG-4, standardní kvalita) do 1,5 Gb/s (nekomprimovaný signál HDTV studiové kvality).

Optický přenos TV signálů pronikl již i přímo do TKR, viz např. [14]. Pionýrský experiment v této oblasti provedli pracovníci Výzkumného ústavu spojů v Banské Bystrici již v r. 1984 [15]. V dnešní době se v první fázi připojují hlavní stanice TKR k optické páteřní síti, nebo se hlavní stanice v rozsáhlejších TKR propojují mezi sebou, takže stačí úplně vybavit pouze jednu nebo dvě (jako záložní) hlavní stanice, resp. si TKR mohou mezi sebou vyměňovat TV programy. Optifikace vlastních TKR probíhá postupným nahrazováním koaxiálních kabelů v primární síti kabely optickými, zatímco v nižších úrovních TKR jsou ponechány koaxiální kabely (systém Hybrid-Fibre-Coax – HFC). V další fázi se optické kabely instalují až k jednotlivým budovám, v nichž jsou pak TV signály zatím nejčastěji rozváděny po koaxiálních kabelech, ale v některých případech již i po optických vláknech uložených v mikrotrubičkách. Takové TKR lze již klasifikovat jako jistý druh optických přístupových sítí (FTTx – Fiber-To-The-x, vlákno až do určitého místa poblíž koncových uživatelů). V ČR inzerovalo na svých webových stránkách v r. 2009 využívání optických spojů již více než 100 provozovatelů [16].

Jelikož se dominantní operátor, ani celostátně působící alternativní operátoři zatím nerozhodli plošně nasazovat optiku až do přístupových sítí, vznikla a i byla realizována řada projektů z iniciativy menších společností a místních i regionálních samospráv. Takto byly vybudovány optické „metropolitní“ sítě (tento pojem zahrnuje v našich podmínkách obecně i sítě v menších obcích)

v řadě českých měst a obcí umožňující koncovým zákazníkům např. připojovat se k internetu rychlostí až 100 Mb/s nebo přijímat až 100 TV programů atd. [17].

V tomto období probíhalo další zvyšování přenosové kapacity optických spojů využíváním vlnového multiplexování a zvyšováním datových toků na jednotlivých vlnových délkách (běžně 10 Gb/s). Co se týče přístupových sítí, dominantní operátor (Telefónica O2, a.s.) ani alternativní operátoři se zatím nerozhodli je hromadně optifikovat. Po vzoru některých měst a obcí v zahraničí, se iniciativy v této oblasti ujaly některé samosprávy – začaly samy budovat „metropolitní“ (spíše místní), resp. regionální optické sítě, viz např. [18].

Pro rozvoj a využívání optického sdělování mají význam i akademické sítě propojující akademické instituce ve vybraných městech i na celostátní úrovni mezi sebou s napojením do zahraničí. Nejvýznamnější z nich je česká akademická síť CESNET [19].

Pokračuje zahušťování a zvyšování přenosové kapacity telekomunikačních sítí. Dominantní operátor (společnost Telefónica O₂, a.s.) i celoplošně působící alternativní operátoři dnes standardně provozují optické spoje rychlostí 10 Gb/s na jedné vlnové délce, přičemž postupně podle potřeby zvyšují celkovou přenosovou kapacitu svých spojů využíváním optického (vlnového) multiplexování. Společnost TO₂ zatím nespustila masivní „sklenatění“ svých přístupových sítí. Podobně jako většina evropských operátorů nadále vyčkává, zda ze zákona povinné zpřístupnění jeho (metalických) přístupových sítí se bude vztahovat i na optické přípojky. Přenosovou kapacitu těchto přípojek, která je prakticky neomezená, by musel umožnit využívat i svým konkurentům, zatímco on by do nich nainvestoval obrovské prostředky a byl by je nucen provozovat a udržovat. Proto společnost TO₂ realizovala zatím jen pilotní projekty. Brzdícím faktorem je také skutečnost, že v ČR byla poměrně nedávno vybudována kvalitní síť z účastnických metalických přípojek, které po vybavení obou jejich konců speciálními modemy (xDSL - x Digital Subscriber Line, některá z variant digitální účastnické přípojky) umožňují přenášet data řádu desítek Mb/s, což zatím naprostě většině uživatelů stačí – např. i pro přenos digitální televize na bázi internetového protokolu (IPTV).

3. VÝHLED ROZVOJE OPTICKÝCH SDĚLOVACÍCH SÍTÍ V ČR

Předpovídat vývoj v čemkoliv lze jen s jistou pravděpodobností. Tím, že investoři a provozovatelé telekomunikačních sítí v ČR mají přístup k nabídce výrobků předních světových výrobců technologie pro optické sdělování, lze spekulovat o rozvoji tohoto oboru v celosvětovém kontextu.

Není pochyb o tom, že i v ČR budou světlovody pronikat stále blíže ke koncovým uživatelům, včetně do domácností. Přenosová kapacita světlovodných spojů se i nadále bude zvyšovat – již dnes výrobci nabízejí technologie umožňující aplikací vlnového multiplexování (více než sto vlnových délek do jednoho vlákna) a rychlé elektroniky v koncových zařízeních (až 40 Gb/s do jednoho optického kanálu) realizovat přenosovou kapacitu jednoho světlovodu přesahující 1 Tb/s. V laboratorních podmínkách byla dosažena rychlost přenosu jedním světlovodem již přes 10 Tb/s. Ani tím není přenosová kapacita světlovodů vyčerpána. Předmětem výzkumu jsou složitější modulační metody než je intenzitní modulace, které umožní ještě lépe využít přenosový potenciál světlovodů. Je to ve skutečnosti návrat k metodám koherentního přenosu signálů, které byly předmětem výzkumu již asi před dvaceti léty. Tento výzkum byl přerušen, když se objevily prakticky použitelné relativně levné optické vláknové zesilovače, pomocí kterých bylo možné dosáhnout zvýšení překlenutelné vzdálenosti jednodušším způsobem a levněji než využitím koherentního sdělování. Teprve nyní se pozornost znovu obrací na koherentní systémy, které, kromě vyšší citlivosti přijímače, díky jeho téměř neomezené selektivitě, umožňují umístit prakticky libovolný počet vlnových délek do určitého pásma, omezeného např. šířkou pásma optických zesilovačů zařazených do přenosové trasy. Aplikací komplexních modulačních metod, využitím obou polarizací signálu šířícího se jednovidovým

světlovodem a sofistikovaných metod elektronického zpracování signálu v přijímači lze (zatím v laboratorních podmínkách) přenášet na jedné vlnové délce signál rychlostí až 100 Gb/s.

Další pokrok v rozvoji optického sdělování lze očekávat využíváním ryze optického přepojování v uzlech nejvyšší úrovně sítí. Elektronika totiž již dosáhla svých mezí pro zajištění této funkce a elektronické ústředny se stávají úzkým místem v superrychlých optických sítích. Optické přepojování je stále zatím využíváno především pouze pro přesměrování signálových toků v případě výpadku některého spoje. Jsou však již na trhu výrobky, které umožňují v uzlech sítí i pružně odbočovat nebo do určených směrů vkládat signálové toky v optickém formátu. Činnost optických přepínačů tohoto druhu je založena na manipulaci s vlnovými délkami zpracovávaných signálů.

Na široké praktické využití v optickém sdělování ještě stále čekají nelineární jevy v některých opticky aktivních materiálech. Očekává se, že budou využity v nové generaci optických sítí pro generování, zesilování a rychlé přepojování optických signálů.

4. ZÁVĚR

Cílem tohoto článku nebylo vyčerpávajícím způsobem zmapovat dění v oblasti optického sdělování v Č(S)R. Nevešlo by se to do jednoho článku a je otázkou, zda by to mělo smysl. Cílem bylo pohlednout se, zamyslet se a poučit se z minulosti, i když ta se sotva bude někdy přesně opakovat. Jednotlivé reference byly zvoleny namátkově, pro ilustraci situace a problémů v dané době v jednotlivých oblastech výzkumu, vývoje, výroby a aplikací v oblasti optického sdělování.

Závěrem lze konstatovat, že zejména do konce roku 1989 bylo v Č(S)R vykonáno pro rozvoj oboru optického sdělování ohromné množství práce a v daných podmínkách bylo dosaženo mnoha vynikajících výsledků. Z důvodu silných diskontinuit v politickém vývoji a následně i radikálních změn v ekonomickém klimatu, tyto výsledky zdaleka nebyly zužitkovány. V tomto období však vyrostly kádry vysoce kvalifikovaných odborníků, kteří podstatným způsobem přispěli rychle dohnat zpoždění ČR ve využívání výhod optického sdělování v praxi. Není pochyb o tom, že optické telekomunikační sítě jsou nyní u nás na evropské úrovni.

Literatura

- [1] Kucharski M.: Začátky optických komunikací v Československu. Rozpravy Národního technického muzea v Praze 191, „Z dějin rozhlasu, televize a filmu 1“, NTM Praha, 2005, str. 183 až 191.
- [2] Telekomunikace č. 6/1984 a Švanda L.: Stavba optoelektronické trati. Telekomunikace č. 9/1985, str. 152 až 156
- [3] Joachimsthaler M.: Výstavba optoelektronických přenosových systémů v MTO Praha. Telekomunikace č. 8/1989, str. 118 až 119.

- [4] V. Keler: Výroba optických kabelů v KABLO Děčín. Telekomunikace č. 2/1990, str. 32 až 33.
- [5] M. Schlitter: Stavba tras optických kabelů. Telekomunikace č. 2/1990, str. 21 až 24.
- [6] D. Nohavica a kol.: 1,07 – 1,67 mm GaInAsP/InP DC PBH Injection lasers. Sborník konf. FOTONIKA 92, str. 247 – 253
- [7] J. Čtyroký a kol.: Model of Ti:LiNbO₃ two-mode-interference polarization independent switch and polarization splitter. J. of Optical Communication 13 (2), 1992, str. 63 - 68
- [8] Lišý V.: Současný stav v nasazování optických komunikací v ČR. Sborník referátů konference Optické komunikace 1994, str. 30 až 40. Vydal TECH-MARKET, 1994
- [9] M. Karásek: Numerical analysis of Pr³⁺-doped fluoride fibre amplifiers. IEEE Photonics Technology Letters č. 4, 1992, str. 1266 - 1269
- [10] M. Karásek: Optimum design of Er³⁺-doped fluoride fibre amplifiers pumped at 820 nm and 1480 nm. IEEE Proceedings. J. of Optoelectronics No. 141/3, 1994, str. 167 - 172
- [11] A. Kuchar: An all-optical pan-European network based on star topology – its potential and limitation. COST Workshop '94, Université de Nice, April 1994, sborník str. 303 - 306
- [12] A. Kuchar, R. Inkret, B. Mikac: COST 266 Final Report - Advanced Infrastructure for Photonic Networks. Published by University of Zagreb, September 2003. 236 stran, ISBN 953-184-064-4
- [13] V. Klumpar: Optické spoje v energetických objektech. Sborník III. celostátního semináře „Optické komunikace“, ČS VTS, Praha 1982, str.89 - 90.
- [14] A. Kuchar, J. Purš: Zkušenosti z výstavby a provozu mnoho-funkční sítě ve městě Šumperk“. Konference „Optické komunikace 2007“, Praha 25.-26.10.2007, Pořadatel: Agentura Action-M. Sborník str. 65-70, ISBN 978-80-86742-21-2
- [15] J. Klima: Realizácia televíznych kábelových rozvodov optickými prenosovými systémami. Sborník konference Optické komunikace 1984, str. 105. Vydal VÚV ES ČSVTS pod ev.č. 60/556/64
- [16] A. Kuchar: Širokoúhlý pohled na broadband v ČR. Konference „Optické komunikace 2007“, Praha 22.-23.10.2009, Pořadatel: Agentura Action-M. Sborník na CD ROM
- [17] M. Fišer, Z. Havlišťová, A. Kuchar: “Case study: MAX-PROGRES multi-service network 99 in the city of Brno, Czech Republic“. BReATH Workshop, Geneva, 11.12.2006. Organized by BReATH consortium. <http://www.ist-breath.net/events/eventE8.html>. Viz také www.maxprogres.cz/ a www.apkt.cz/ Události/Privátní virtuální síť APKTnet se dále rozrostla
- [18] www.rowanet.cz
- [19] www.cesnet.cz

Ing. Anton Kuchar, CSc., PhD., tel.: 266 773 408, e-mail: kuchar@ufe.cz

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 - Kobylisy

LASER World of PHOTONICS CHINA 2010

Pátý prodejní veletrh LASER World of PHOTONICS China 2010 se uskutečnil mezi 16. a 18. březnem letošního roku v novém mezinárodním výstavním centru v čínské Šanghaji. Přilákal 275 vystavovatelů ze 17 zemí a více než 25 tisíc návštěvníků, kteří se mohli seznámit s celým spektrem výrobků fotonického průmyslu, komplexním laserovým zpracováním a optickými výrobními technologiemi. Rovněž napomohl k rozšíření znalostí prezento-

vaných významnými odborníky na konferencích věnovaných pokročilým metodám mikro i makro-laserového obrábění, optickým prvkům, laserovým systémům a bezpečnosti (LPC 2010 - Laser Processes and Components a The Optics Frontier 2010). Příští veletrh se bude konat na stejném místě 15. až 17. března 2011. Podrobnosti lze nalézt na <http://www.world-of-photonics.net/link/en/23259642#23259642>.

Rozhovor s jubilantem doc. RNDr. Miroslavem Milerem, DrSc.

Docent Miroslav Miler se narodil 11. dubna 1935 v Olomouci. V roce 2005, kdy slavil sedmdesátiny, uveřejnil časopis JMO v č. 10/05 velmi obsáhlý článek dr. Vladimíra Malíška k významnému životnímu jubileu doc. Milera. Nyní, u příležitosti jeho 75. narozenin, přinášíme rozhovor JMO s jubilantem, který se rozhodujícím způsobem zasloužil o náplň tohoto čísla, které je věnováno vláknové optice jako odezva na udělení Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2009 Charlesi K. Kaovi.

JMO: Je o Vás známo, že jste se narodil v Olomouci, v tomto městě jste vyrůstal a studoval. Záhy však jste se ocitnul v Praze. Jak se to stalo?

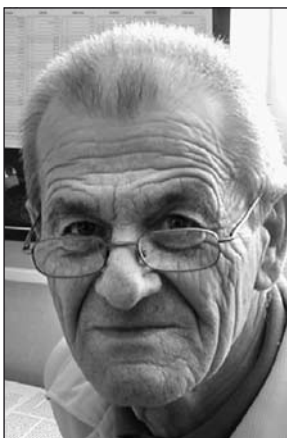
Na konci střední školy, na které jsem v důsledku školské reformy ministra Kahudy maturoval již o prázdninách po třetím ročníku, jsem se hlásil, jak ostatně značná část mých spolužáků, na studium lékařství. Po přednášce prof. J. Fuky, který navštívil náš ročník a přemlouval ke studiu na právě vzniklé Vysoké škole pedagogické, jsem přidal také přihlášku na tuto školu. Nakonec jsem se zúčastnil pohovoru pouze na toto studium, kam jsem byl přijat na obor fyzika a matematika. Ten jsem absolvoval po čtyřletém studiu. Nutno podotknout, že pro rozptylování vojenskou katedrou a marxismem-leninismem a pouhých čtyř let studia jsme se příliš do hloubky oboru nedostali.

Na druhé straně, nedávno jsem narazil na své záznamy z přednášek a nestačil jsem se divit, co všechno jsme museli nastudovat.

Při státní závěrečné zkoušce jsem asi nějak dobře zapůsobil na zkoušející profesory Fuku a Metelku a ti se shodli na tom, že bych mohl po krátkém působení na některé blízké škole nastoupit jako asistent na fakultu. Začal jsem působit na Jedenáctileté střední škole v Lipníku nad Bečvou. V prvním pololetí druhého roku se už zřejmě shromažďovaly posudky a různé materiály na mou osobu a posudek psala i škola. Příslušná zástupkyně ředitele mi jednou dala otázku, zda stále ještě chodím do kostela. Stačilo říci dvě slabiky: „už ne“ a měl jsem před sebou zářnou kariéru vysokoškolského pedagoga. To jsem však nebyl s to udělat a hned se ukázaly následky. Jednak mi vzápětí odebrali některé hodiny fyziky na třetím stupni a dali hodiny matematiky na druhém stupni a jednak to šlo s mým posudkem na fakultu, kde se samozřejmě ihned stranická organizace postavila proti mému příchodu na fakultu, jak jsem byl informován odborným asistentem V. Rudolfem při náhodném setkání v Olomouci. Potom jsem ovšem jednou, snad náhodou nebo ne, na přerovském nádraží potkal prof. Havelku. Ten mi nabídl místo v tehdejší Laboratoři optiky ČSAV v Praze s tím, že „tam se na to tak nehleď“. Vyzval mě, abych si přišel na fakultu pro kádrový dotazník. Trochu jsem se však Prahy zalekl a dlouho jsem si pro něj nešel, až sám pan profesor poslal asistenta J. Kunzfelda s dotazníkem k nám domů.

Mezitím přišel konec školního roku a já jsem hned v červenci 1959 nastoupil v Praze do Oddělení infračervené optiky vedoucího Dr. A. Vaško. Přitom jsem se také přihlásil na externí aspiranturu pod vedením prof. Havelky. Odborným školitelem byl dr. Vaško. Vyšetřoval jsem optické vlastnosti sklovitých materiálů určených pro infračervenou oblast spektra.

JMO: Laboratoř optiky ČSAV však byla v r. 1963 zrušena a její pracovníci se rozutekli na různá jiná pracoviště. Je zajímavé, že toto opatření přišlo právě do období silného rozmachu optiky ve světě zejména v důsledku vynálezu laseru, ale též pro aplikaci teorie informace na optickou oblast. Co jste dělal vy?



Nedělal jsem nic a přešel s oddělením dr. Vaško do Ústavu radiotechniky a elektroniky ČSAV, který právě nedávno před tím postavil novou budovu v Kobylisích a vedení přešlo z rukou zakladatele ústavu Dr. S. Djadkova do rukou Ing. V. Zimy. Přitom jsem se ale velmi uctivým dopisem omluvil prof. Havelkovi, že nepřestoupím do nově vznikajícího pracoviště na fakultě v Olomouci. Jednak proto, že jsem získal jako jeden z prvních v Praze družstevní byt, a jednak proto, že se mi nechťelo jít na pracoviště vysoké školy, která mě předtím odmítla.

Jeden rok jsem ještě pracoval na pracovišti dr. Vaško, které se nacházelo u Karlova nám. Přitom, nevím už z jakého důvodu, se naše vztahy nějak zhoršovaly. Ředitel ústavu toho chtěl využít pro sesazení dr. Vaško z vedoucího místa a k mému dosazení na toto místo. To ovšem předpokládalo vstup do KSČ. To jsem po počátečním váhání, vždyť šlo zase o možnost nástupu kariéry, ale nakonec neudělal. Požádal jsem o převedení do nově vznikajícího oddělení laserového sdělování. Tam jsme např. realizovali vzdušný spoj směřující nad pražskou kotlinou do Výzkumného ústavu sdělovací techniky na Lhotce, na který byl tehdy od našeho ústavu přímý dohled. Mezitím jsem napsal kandidátskou disertační práci, ve které jsem využil řadu měření provedených ještě v laboratoři dr. Vaško. Když jsem se mnoho měsíců po jejím odevzdání na našem sekretariátu ptal po jejím osudu, vytáhl ji sekretář ze spodního šuplíku zpod stohu materiálů. Naštěstí se tehdy již dva roky před jarem 1968 začaly projevat liberální tendence v politice a já jsem se také trochu „angažoval“ na odborářském poli. Takže práce byla postoupena dále a já jsem ji v r. 1966 obhájil a získal vědeckou hodnost CSc.

V té době ovšem končilo nadšení pro optické sdělování vzduchem a bylo třeba si najít jiný nosný program. Ten jsem viděl v holografii, která tehdy dobývala laboratoře. Později se ke mně přidali ostatní pracovníci oddělení optického sdělování. Po získání počátečních zkušeností jsme se zaměřili především na holografickou interferometrii. Viděli jsme její možný přínos pro mnohé technické obory a agitovali jsme pro ni různé podniky, např. výrobce akustických přístrojů pro možnost vyšetřování kmitů, letecké a jiné podniky pro studium deformací apod. Většinou však spolupráce končila proměřením nějakých vzorků. Žádný podnik si svou vlastní holografickou laboratoř nezřídil. Tak uběhlo desetiletí od Pražského jara a témata o holografické interferometrii se zdála být vyčerpána.

V tu dobu se však projevil nový zájem o aplikaci holografie. Tehdejší Vývojové dílny ČSAV stavěly kapalinové chromatografy pro analýzu např. krve. Možnosti této metody se měly rozšířit použitím optické rozkladné mřížky namísto úzkopásmových optických filtrů. Byli jsme požádáni o vývoj takových mřížek. Obdrželi jsme argonový laser pro holografický osvit fotorezistu a naše snahy byly korunovány úspěchem. V druhé polovině osmdesátých let jsme dodávali Vývojovým dílnám až desítky mřížek ročně. Toho si povšiml podnik Laboratorní přístroje, protože i on měl ve výrobě

kapalinové chromatografy. Koncem osmdesátých let jsme i jim dodávali mřížky ve stovkách kusů ročně.

Samozřejmě jsme paralelně prováděli i fundamentálnější výzkum, z něhož stojí za zmínku především vynalezení fokusujících vazebních mřížek pro navazování homocentrického laserového svazku do planárních optických vlnodů.

JMO: Zatím není zřejmé, že byste měl kdy nějaký vztah k vláknové optice. Chopil jste se ale úkolu redakčně připravit toto číslo našeho časopisu věnované vláknové optice pěstované ve vašem ústavu v souvislosti s udělením Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2009 Charlesi K. Kaovi. Pracoval jste také v této oblasti?

V osmdesátých letech se v ČSAV opět jako již několikrát předtím začaly projevovat snahy přiblížit akademickou vědu více praxi a ředitel ústavu dr. Zima, tehdy již člen korespondent ČSAV, prosazoval do ústavu vláknové sdělování. Zdálo se mu, že nejsem pořád dostatečně vytižen a nejsou dosti využity mé optické znalosti. Po tom, co se dohodl se Společnou laboratoří silikátů ČSAV a VŠCHT, že oni se budou věnovat tažení vláken a na nás bude vyvíjet pomocné přístroje pro měření v oblasti vláknové optiky, mi uložil vyvinout přístroj na bezdotykové průběžné laserové měření průměru vytažovaného vlákna. Zpětnou vazbu z měřených údajů na režim tažení zajišťoval jiný pracovník ústavu.

Tehdy ještě nebyly tak rozšířeny integrované řádky detektorů, které by se mohly použít pro analýzu difrakce na vláknu a zjišťování průměru vlákna z ní. Zvolili jsme cestu rozmítání laserového paprsku napříč vláknem a měření doby zastínění. Z postupné rychlosti a z doby zastínění se pak vypočítával průměr vlákna. K rozmítání jsme nejprve použili úhlově kmitající zrcátko připevněné na planžetě a postavili několik přístrojů s analogovým zpracováním dat. V důsledku nelineárního průběhu kmitu však byl měřicí prostor velmi malý a dostatečně nepokrýval možné „mávání“ vlákna v měřicím poli, které není možno vést stále středem.

Brzy jsem našel řešení v použití holografického rozmítače s pravidelným rozložením mřížek ve výsečích kotouče, kdy linie mřížek o stejné periodě ve všech mřížkách jsou orientovány rovnoběžně s tečnami v bodech na osách výsečí. Při vhodném úhlu dopadu a úhlu difrakce laserového paprsku HeNe laseru vzhledem k vlnové délce je paprsek rozmítán po křivce velmi blízké přímce a rychlost rozmítání je konstantní ve značné délce rozmítání. S osmi výsečemi se také osmkrát zvětšil počet měření za jednotku času, aniž by byla potřeba zrychlit rotaci. Jeden kolega navrhl jednoduchou kolimační optiku typu $f-\theta$, která se vyznačuje tím, že lineární úhlové rozmítání se převádí optikou na lineární rozmítání postupně. Jiný spolupracovník vyřešil přenos rotace z motorku na kotouč rozmítače tak, aby se kompenzovalo trhání vlivem přitahování jednotlivými pólovými nástavci statoru. Na rozdíl od prvního typu měřidla měl tento typ s holografickým rozmítačem digitální zpracování údajů, jehož autorem byl další kolega. Přístroj měřil v rozsahu od 100 μm do 1 mm, odkud pocházel jeho název Diameter Holodia 1100. Na jeho panelu byla také identifikace polohy vlákna v měřicím poli. Tyto přístroje se měly vyrábět pro všechny zájemce u nás popř. ve východním bloku. Největší zájem byl z Výzkumného ústavu sklářského v Hradci Králové, kde měla stát baterie tažiček vláken pro vojenské účely: přenos obrazu po pixlech na kratší vzdálenost. Byly vyrobeny demonstrační kusy, které zájemci zkoušeli. Přístroj stál více než dvouapůlnásobek tehdejší ceny škodovky.

Ze Sklo Unionu Teplice byl také požadavek na měřidlo, kterým by se mohl měřit průměr preformy o průměru několika milimetrů k následnému tažení vláken. Preforma se sama měla táhnout z masivního ingotu. Protože bylo třeba postavit tento přístroj urychleně, sám jsem jej kompletoval a vyráběl i některé jednodušší komponenty. K instalaci tohoto přístroje se váže velmi těžká nehoda, která ale naštěstí skončila bez následků pro obsluhu.

Jak vyprávěl jeden náš spolupracovník, který přístroj na místě oživoval, rozžhavený ingot se v jednom okamžiku utrhł ze závěsu, propadł naším přístrojem, který náhodou nebył stavěn na těsno, a při dopadu na zem se sklovina rozprskla na všechny strany. Náhodou byli všichni přítomni v tom okamžiku tak rozestaveni, že se nikomu nic nepřihodilo.

Kromě stavby a výroby měřidel průměru vlákna jsem dostal i úkol navrhnout a dohlížet na postavení přístroje k vizuální inspekci křemenných trubek, z kterých by se vybíraly trubky vhodné pro přípravu preformy k tažení optických vláken. Tehdy měly tyto trubky velké nedostatky v homogenitě materiálu, přímosti a tloušťce stěn. Navrhl jsem přístroj ve formě soustruhu, v jehož lehkých sklíčidelech se pomalu otáčela trubka a podél ní se posouval laserový paprsek, který trubku prosvětoval. Na stínítku, které se posouvalo společně s laserovým paprskem, pak pracovník pozoroval stopu laserového svazku a posuzoval její kvalitu.

JMO: Jak byly nakonec využity všechny tyto výsledky vaší práce? Mezitím totiž nastaly zásadní politické změny ve veřejném životě.

Nutno hned říci, že se vlastně nijak dál nevyužily. Po sametové revoluci se podniky, pro které byly určeny výsledky našeho výzkumu, pokládaly jeden za druhým. Sklo Union Teplice se začal soustřeďovat výhradně na výrobu automobilových skel a zařízení pro vláknovou optiku rozprodal. Laboratorní přístroje se rozpadly na řadu menších provozoven, které se věnovaly dílčím otázkám a údržbě stávajících přístrojů. Kapalinové chromatografy totiž vyráběly přední světové firmy a jim je na otevřeném světovém trhu těžko konkurovat. Jako první se však položila Tesla Elstroj, pro kterou jsme vyvíjeli velkoplošné zkřížené holografické mřížky k měření souřadnic polohy stolků zařízení pro litografickou kameru. Plocha mřížky měla být stejných rozměrů jako křemíkový salámek k výrobě integrovaných obvodů. Tehdy to byl průměr 4", ale velikost salámků se velmi rychle zvětšovala. Zakázky na výrobu našich komponentů a přístrojů klesly najednou na nulu. Takže v té turbulentní době jsme neviděli jiné východisko, než tyto aktivity ukončit. Možná, že jsme se unáhli. Kdybychom snad založili firmu, mohli bychom možná po přežití prvotních asi velmi těžkých let začít prosperovat. Teď je ovšem „pozdě bycha honiti“.

Začali jsme se věnovat holografické difrakční optice a transformaci svazků pomocí holografických elementů. Zejména šlo o převádění vysoce divergentního svazku vystupujícího z hranově emitujících polovodičových laserů, který navíc má eliptický průřez a s tím související astigmatismus, na kolimovaný svazek s kruhovým průřezem. Jeden takový holografický prvek pracující v mimoosovém režimu může nahradit celou skupinu klasických optických prvků, které jednotlivě kompenzují uvedené charakteristiky svazku. Během let jsme dostali několik grantů Grantové agentury Akademie věd a Grantové agentury České republiky. Dnes již ovšem několik let není náklonnost k takovému výzkumu. Naštěstí už nejsem v aktivním věku, takže mě nedostatek financí na výzkum tolik netíží.

JMO: Čím se teď vlastně zabýváte, když jak jste uvedl, již nejste v aktivním věku?

Zatím pracoviště, kde jsem vlastně prožil celý svůj aktivní život, využívá mých zkušeností, takže působím jako nějaký poradce či konzultant. To ale neznamená, že již nic nezkoumám. Stále mě baví vědecky pracovat, zabývat se novými myšlenkami, ale také dokončovat některé dřívější projekty. U počítače teď pracuji mnohem víc než dříve.

Děkujeme za rozhovor.

Redakce JMO

Z technické knihovny

Kenyon, I. R.: The Light Fantastic: A Modern Introduction to Classical and Quantum Optics. 1st ed., Oxford University Press, New York, 2008, 630 s., ISBN 978-0-19-856645-8. Cena: 60 USD

Hlavním cílem této knihy, jak autor uvádí v předmluvě, je podat čtenáři základní poznatky z oblasti optiky a umožnit mu pochopení fundamentálních principů, které mu usnadní sledování budoucího vývoje v této rapidně se rozvíjející oblasti. Text je sestaven tak, aby jednotlivé celky byly uzavřené a umožňovaly využití této knihy jako doplňku k vysokoškolským kurzům, zabývajících se jednotlivými partii optiky. V souhrnu potom celý text tvoří kompendium, které podává celkový přehled o oblasti optiky ze všech aspektů (geometrický, vlnový a kvantový pohled).

Knihu je možno rozdělit na tři základní části: první část (kapitoly 2-4) se zabývá paprskovou optikou, druhá část (kapitoly 5-11) vlnovou optikou a poslední část (kapitoly 12-18) potom optikou kvantovou.

V první části, zabývající se geometrickou optikou, je nejprve v kapitole 2 na základě Huygensova principu provedeno odvození základních zákonů geometrické optiky pro šíření vlnění na rozhraní dvou prostředí – zákon lomu a zákon odrazu. Následující kapitola se potom zabývá zobrazením pomocí zrcadel a čoček včetně popisu pomocí maticové optiky. Jsou zde vysvětleny základní aberace optických soustav a jednoduché metody pro jejich redukci na přijatelnou úroveň. Dále jsou popsány principy funkce a návrhu základních optických přístrojů a prvků (mikroskop, dalekohled, fotografický objektiv, zoom, gradientní a sférické čočky atd.).

Druhá část, zabývající se vlnovou optikou, začíná kapitolou, ve které je nejprve uveden princip superpozice a poté jsou popsány interferenční jevy pomocí základních interferenčních pokusů (Youngův dvouštěrbinový pokus, Michelsonův interferometr). Jsou vysvětleny základní pojmy teorie koherence a jsou schematicky uvedeny principy různých typů interferometrů, které se využívají v praxi. Kapitola 6 se poté zaměřuje na problematiku difrakce světla (Fresnelova a fraunhoferova difrakce, Babinetův princip, mřížky atd.), spektrometrie a gaussovských svazků. Sedmá kapitola se zabývá základy Fourierovské optiky a jsou ukázány a vysvětleny principy holografie či systémů pro optické zpracování informace (filtraci prostorových frekvencí). V kapitole 8 jsou uvedeny některé moderní aplikace optiky v astronomii. Jedná se zejména o návrh astronomických dalekohledů, principy adaptivní optiky, teleskopy se syntetickou aperturou a interferometrické detektory gravitačních vln. Devátá kapitola podává základy klasické elektromagnetické optiky (Maxwellovy rovnice, vlnová rovnice, Fresnelovy vztahy) a aplikace této teorie v oblasti interferenčních filtrů a optických vlnodů. Kapitola 10 se podrobně zaměřuje na problematiku polarizace světla, přičemž jsou popsány různé polarizační jevy

a vlastnosti látek (dvojlom, optická aktivita látek, tekuté krystaly, atd.) Základy interakce záření s hmotou (absorpce, disperze, rozptyl) jsou popsány z hlediska klasické teorie v kapitole 11.

Poslední část knihy tvořená kapitolami 12-18 se zabývá kvantovou optikou. V kapitole 12 je stručně podán přehled jevů, které nebylo možné vysvětlit klasicky a které vedly k vzniku a vývoji kvantové teorie (záření černého tělesa, Comptonův jev, fotoelektrický jev). Jsou popisovány základní pojmy a hypotézy z oblasti kvantové teorie (Bohrův model atomu, de Broglieho hypotéza, Heisenbergovy relace neurčitosti, vlnový balík atd.). Navazující kapitola poté popisuje strukturu atomu z hlediska kvantové mechaniky. Kapitola 14 je zaměřena na stručný výklad základů teorie laserů a uvádí též přehled jednotlivých typů laserů, jejich parametrů a různých aplikací. Patnáctá kapitola knihy se zabývá relativně stručně detektory optického záření, zejména pak polovodičovými detektory jako jsou např. fotodiody, lavinové fotodiody, fotonosbiče, CCD, CMOS apod. Vláknová optika a její aspekty jsou stručně podány v kapitole 16. Předposlední kapitola knihy se zabývá problematikou vybraných kvantových jevů, např. chováním atomů v okolí rezonančních frekvencí, jevy jako elektricky indukovaná průhlednost nebo zpomalení světla, principy optických hodin apod. Závěrečná kapitola podává nástin kvantové teorie elektromagnetického pole a prezentuje některé speciální kvantové jevy (např. entanglované stavy) a ukazuje jejich možné využití.

Uvedená publikace představuje pokus o vytvoření kompendia zahrnujícího úvod do problematiky moderní optiky. Kniha je psána „učebnicovou“ formou, každá kapitola obsahuje v závěru řadu otázek a úloh k zamyšlení a je třeba ocenit i řadu uvedených praktických příkladů moderních aplikací optických jevů v různých oblastech vědy a techniky. Svým obsahem kniha pokrývá prakticky celou oblast optiky, z čehož však jako negativní důsledek plyne, že hloubka zpracování jednotlivých témat musí být omezena a není tedy dostatečně vyčerpávající. Pro hlubší porozumění dané problematice je proto nutno použít další odbornou literaturu. Nicméně budeme-li brát tuto knihu skutečně jako „úvod“ do problematiky pak můžeme konstatovat, že svůj účel splní. Kniha je doplněna vhodnými grafickými ilustracemi, jež dokreslují význam probírané problematiky. Výklad je podáván srozumitelnou formou a v rámci každé kapitoly je uvedeno několik úloh vztahujících se k probírané látce. Text publikace je rozšířen osmi doplňky, které uvádí některé doplňující partie teorie, seznam fyzikálních konstant a řešení k doplňujícím úlohám.

Knihu je tak možno doporučit vysokoškolským studentům optiky a souvisejících oborů jako studijní literaturu, resp. příručku, kde lze nalézt relativně stručně vysvětlení danou problematiku s vazbou na aplikace v nejrůznějších oblastech vědy a techniky.

P. Novák



**4. mezinárodní odborný veletrh
pro automatizaci a mechatroniku
8. - 11. 6. 2010, Výstaviště Mnichov**

CONTENTS

Introduction to this issue (M. Miler) 95

Amper 2010 95

The Nobel Prize in Physics 2009 (M. Miler, P. Honzátko) 96

Fiber optics at the Institute of Photonics and Electronics
(V. Matějec) 99

The paper summarizes results of more than thirty years of research of preparation and characterization of optical fibers at the Czechoslovak Academy of Sciences (CAS) and Academy of Sciences of the Czech Republic (AS CR), namely at the Institute of Chemistry of Glass and Ceramic Materials of CAS and Institute of Radio Engineering and Electronics of CAS (AS CR), nowadays the Institute of Photonics and Electronics AS CR, v.v.i. (ÚFE). This research can be characterized by two periods. In the first period till the end of 1989 the research was focused to fibers for telecommunications. Transmission properties published in the paper show that they were fully comparable with world ones. The second period from 1990 to present has been characterized by the investigation of fibers for fiber lasers and amplifiers and fiber-optic sensors. Some original structures of optical fibers designed and prepared in ÚFE are described in the paper.

New trends in preparation of preforms by the MCVD method
(I. Kašík, V. Matějec, O. Podrazký, P. Peterka, J. Mrázek) 102

The paper deals with progress in the field of preparation of preforms for drawing of optical fibres by the MCVD method. „Groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication“ were appreciated in 2009 by the Nobel prize for K. C. Kao and this paper comes from experience acquired in this field. Attention is focused namely at novel materials and fiber structures and their preparation in the field of special optical fibers for fiber amplifiers, lasers and sensors.

Drawing of optical fibers at the Institute of Photonics and Electronics (V. Matějec, O. Podrazký, J. Mrázek, P. Peterka, M. Hayer) 107

The paper deals with the process of optical-fiber drawing and shows research results achieved at the Department of Optical Fibers, Institute of Photonics and Electronics AS CR, v.v.i. (ÚFE). It presents description of basic processes in glass materials during drawing of optical fibers from preforms as well as description of experimental devices used in the ÚFE. It shows examples of results of drawing of optical fibers doped with rare-earth elements both with circular and non-circular cross-sections intended for fiber lasers and amplifiers. It also deals with drawing of special optical fibers for fiber-optic sensors, such as sectorial s-fibers, inverted-graded index fibers, fibers from soft optical glasses, chalcogenide fibers and microstructure fibers. Continuous preparation of optical fibers coated with anatase nanoparticles is also discussed in the paper.

Tapered optical fibres (T. Martan) 111

The paper deals with tapered optical fibres, their preparation and applications for sensing. Enhancement of evanescent wave overlap with an analyte is possible to achieve by tapering telecommuni-

cation fibres or steering-wheel microstructured optical fibres. It leads to increasing of sensitivity of detection in comparison to untapered fibre structure. Tapered optical fibre with immobilized optical-chemical transducer on the tip was used as a probe for local pH detection. Tapered single-mode or microstructured optical fibres were successfully prepared by a PC-controlled fibre puller of the own construction.

Fibre lasers - principles and applications (P. Peterka, P. Honzátko, M. Karásek, J. Kaňka, I. Kašík, V. Matějec) 115

Success of erbium doped fiber amplifiers in telecommunications recently stimulated spectacular progress of fiber lasers that can be now considered as a substitute for conventional solid-state lasers in many applications. In the contribution we review basic principles of fiber lasers, including high-power fiber lasers that utilize cladding pumping. We summarize also important applications of these new sources of laser radiation and we present in more detail research results in this field in the Institute of Photonics and Electronics.

All optical processing of data streams

(P. Honzátko, M. Karásek) 121

Activities of the Laboratory of nonlinear and fibre optics in the field of all-optical processing of data streams is presented. We demonstrated an all-optical modulation format converter RZ-to-NRZ, based on the cross-phase modulation with walk-off in the nonlinear loop mirror and a high conversion efficiency wavelength converter based the conversion of the cross-phase modulation into amplitude modulation in the fibre Bragg grating. Both devices have been tested at transmission rates of 10, 20, and 40 Gb/s. For testing the network devices at a repetition rate of 107 Gb/s, we developed the combination of optical multiplexer and demultiplexer.

Past, present of and prospects for optical communications in the Czech Republic (A. Kuchar) 124

The paper describes evolution of optical communications in the Czech Republic in three distinct periods of political development in the CR: from emergence of this communications branch in the CR till the end of 1989, during years 1990 to 1992 and from the beginning of 1993 till today. The paper deals with the developments in the basic and applied research, provides information on production of the relevant components and equipment, on some major optical network projects and applications. The paper concludes with discussion about prospects of optical communications in the CR.

LASER World of PHOTONICS CHINA 2010 128

Interview with doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc. 129

Dr. Miroslav Miler was born on 11 April 1935 in Olomouc. When he celebrated his seventieth birthday five years ago Dr. Vladimír Malíšek published in JMO 10/2005 a commemorating comprehensive text. On the occasion of Dr. Miler's 75th anniversary we present nowadays an interview with him. He plays a decisive role in editing the contents of this journal issue devoted to fibre optics and reflecting the Nobel prize in physics for 2009 awarded to Charles K. Kao.

From technical library (P. Novák) 131

AUTOMATICA 131

Vytvrzovací zařízení Omnicure LX400 UV LED poskytuje vysokou flexibilitu v sériové výrobě za pomoci UV záření. Nový vytvrzovací systém vykazuje velký vyzařovací výkon současně s výhodami a spolehlivostí LED technologie.

“OmniCure LX400 UV LED vytvrzovací systém je výsledkem rozsáhlého průzkumu trhu a spolupráce s našimi zákazníky. Průzkum se zabýval současnými trendy v sériové výrobě, a v částečně a plně automatizované výrobě. Zjištěné nedostatky jsme se rozhodli překlenout přechodem od technologie obloukových lamp k technologii LED. Řešením je nová všestranná platforma Omnicure LX400.” říká Allan Firhoj, viceprezident a generální manažer divize Life Sciences and Industrial společnosti EXFO. „Novými produkty OmniCure® LX společnost EXFO naplňuje svůj záměr stát se lídrem na trhu UV systémů a poskytovat svým zákazníkům co možná účinná a efektivní řešení.“



Vlastnosti a hlavní přednosti:

- Vyzařovací **výkon až 9,500 mW/cm²** (pro hlavici s vlnovou délkou 385 nm)
- **Životnost přes 20 000 hodin**
- Možnost ovládat až **4 UV LED hlavice zároveň** (buď nezávisle, nebo souběžně)
- Vyzařovací **hlavice UV LED jsou dostupné ve 3 provedeních** (365 nm, 385 nm, 405 nm)
- možnost u každé z hlavic **nezávislého nastavení vyzařovacího výkonu a to s 1% přesností a ozařovací doby** pro dosažení vyšší kompatibility s danými adhezivními materiály
- **Vše je formováno do malého kompaktního provedení**
- **Vyšší úroveň kontroly** a současně **jednoduchý a cenově efektivní** montážní proces
- **Všestranné, vysoce účinné a lehce použitelné** UV LED vytvrzovací zařízení
- **Kompaktní a jednoduchý** dizajn
- **O 20 % nižší spotřeba** elektrické energie oproti standardním UV systémům

Možnosti použití:

- **Medicína:** sestavování katédrů, kanyl a endoskopů, spojování trubiček a spojek, aj.
- **Photonica:** spojování komponentů vláknové optiky
- **Elektronika a elektrotechnika:** mobilní telefony, digitální projektory, LCD a LMC displeje, automobilová elektronika, optické paměti dat
- **Smart karty:** bankovníctví, prodeje, telekomunikace, bezpečnost, zdravotnictví, doprava a státní služby
- **General assembly:** lepení plastů, nerezové oceli, skla, gumy a dalších materiálů
- **Letectví:** masky pilotů, nátěry čelních skel u letadel
- **Automobily:** zrcátka, světlomety, čelní skla, vnitřní obložení stěn vozidel
- **Výzkum a vývoj:** laboratorní zkoušky UV lepidel, nátěrů a UV měření
- **Kódování:** snímače čárových kódů a skenovací výbava
- **Spotřební zboží:** mřížky reproduktorů, nátěry spotřebičů a nábytku, trofeje a plakety, štítky, obtisky, hračky, klenoty
- **Sklo a křišťál:** okamžité slepení a oprava

Více informací o produktu:

<http://www.profiber.cz/Systemy-pro-vytvrzovani-UV-zarenim/Spot-curing-system-Omnicure/>



UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
FYZIKÁLNÍ ÚSTAV AV ČR, v.v.i.
ve spolupráci s hvězdárnami v Prostějově,
Valašském Meziříčí a Vsetíně

u příležitosti
Mezinárodního roku astronomie
představují novou bakalářskou
studijní specializaci



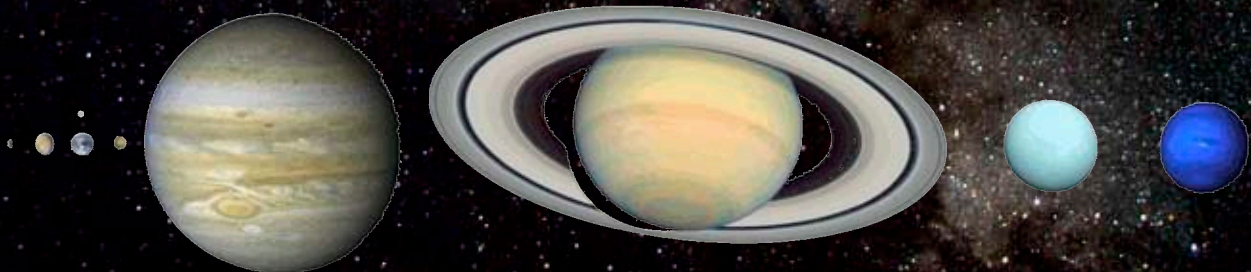
PŘÍSTROJE PRO ASTRONOMII A ASTROFYZIKU

v rámci studijního oboru
PŘÍSTROJOVÁ FYZIKA

Základy fyziky, matematiky a informatiky
Úvod do astronomie a astrofyziky
Astronomie sluneční soustavy
Astronomické přístroje
Praktikum pozorovací astronomie

přednášejí pracovníci
Fyzikálního ústavu AV ČR
a Univerzity Palackého

Michael Prouza
Radomír Šmída
Jiří Grygar
a další...



Studijní specializace se otevírá na Přírodovědecké fakultě UP od školního roku 2009/10
Absolventi mohou pokračovat v magisterském studiu v celé řadě navazujících oborů
Další informace lze nalézt na webových stránkách <http://jointlab.upol.cz/info/pristrojova-fyzika>