

**5-6**  
**2015**

**JMO**

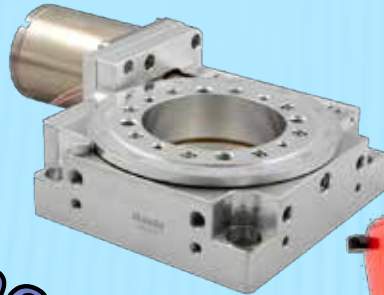
**JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA**  
**FINE MECHANICS AND OPTICS**

**60 let světla**  
**v Ústavu fotoniky a elektroniky**  
**Akademie věd ČR**

- ⇒ **Biosenzory s povrchovými plasmony** str. 158
- ⇒ **Thuliové vláknové lasery** str. 174
- ⇒ **První laserová operace oka** str. 197
- ⇒ **Symposium SPIE Optics + Optoelectronics** str. 204



Optovláknové senzory



Raman

Zdroje záření



Spektrometry



Elipsometry



Vláknová optika



Lasery

Pište, volejte, majlujte, dodáme Vám vše,  
co z optiky potřebujete!

## REDAKČNÍ RADA

**Předseda:** RNDr. Miloslav VYCHODIL, CSc., Meopta-optika, s.r.o., Přerov, mobil: 731 439 380

**Členové:** RNDr. Ing. Ján BARTL, CSc., ÚMSAV, Bratislava, prof. RNDr. Dr. Zdeněk BOUCHAL, UP, Olomouc, doc. RNDr. Monika BOŽIKOVÁ, Ph.D., SPU, Nitra, Ing. Ondřej ČÍP, Ph.D., UPT AV ČR, v.v.i., Brno, Ing. Alexandr DEJNEKA, Ph.D., FZÚ AV ČR, v.v.i., Praha; doc. RNDr. Ondřej HADERKA, Ph.D., SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, prof. Ing. Pavol HORŇÁK, DrSc., STU, Bratislava, doc. Ing. Jan HOŠEK, Ph.D., ČVUT Praha, 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 KRĚSÁLEK, CSc., UTB, Zlín, Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s.r.o., 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, doc. RNDr. Miroslav MILER, DrSc., ÚFE AV ČR, v.v.i., Praha, prof. Ing. Jiří NOVÁK, Ph.D., ČVUT, Praha, prof. RNDr. Jan PEŘINA, DrSc., UP, Olomouc, Mgr. Sylvie PETROVÁ, LF MU, Brno, prof. Ing. Jaromír PIŠTORA, CSc., VŠB - TU, Ostrava, RNDr. Michael PROUZA, Ph.D., FZÚ AV ČR, v.v.i., Praha, RNDr. Dagmar SENDERÁKOVÁ, Ph.D., UK, Bratislava, RNDr. Petr SCHOVÁNEK, SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, prof. RNDr. Anton ŠTRBA, CSc., UK, Bratislava, doc. Ing. Olga TŮMOVÁ, CSc., Západočeská univerzita, Plzeň. Čestný člen Ing. Zdeněk MARTÍNEK, Nové město nad Metují

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 SPIE, the international society for optics and photonics v Nakladatelství Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, v.v.i.

**Ředitel FZÚ AV ČR, v.v.i.:** prof. Jan ŘÍDKÝ, DrSc.

**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, 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc,

tel.: 585 631 576, fax: 585 631 531, e-mail: eva.pelclova@upol.cz

**Adresa redakce v Přerově** (šéfredaktor): Kabelíkova 1, 750 02 Přerov,

mobil: 776 011 925, e-mail: eva.pelclova@upol.cz

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 Česko i Slovenskou 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 zasílání 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:** RNDr. Dagmar Senderáková, Ph.D., katedra experimentální fyziky FMFI UK, Mlynská dolina F2/149, SK-842 48 Bratislava, tel. 00421 260 295 391, e-mail: senderakova@fmph.uniba.sk

**V Slovenské republice rozšiřuje a objednávky přijímá:**

prof. Ing. Ivo Čáp, CSc., JSMF pobočka Žilina, ul. 1. mája 32, 010 01 Žilina, e-mail: ivo.cap@fel.uniza.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.: 581 243 441, mobil: 776 011 925, e-mail: eva.pelclova@upol.cz

Odborné články jsou lektorovány.

© JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA 2015

# JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS  
ROČNÍK 60 5 - 6/2015

## OBSAH

**Úvodní slovo ředitele Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i. (J. Homola)...** 155

**Detekce chemických a biologických látek pomocí biosenzorů s povrchovými plazmony (H. Lísalová Vaisocherová, M. Vala, J. Homola).....** 158

**Vliv hustoty pokrytí kovových nanočástic na výkonnost SERS-aktivních optických vláken (J. Kaňka).....** 161

**Generace záření ve střední infračervené oblasti v nelineárních krystalech s použitím vláknových laserů (Y. Baravets, P. Honzátka, F. Todorov, P. Gladkov).....** 164

**Teorie a modelování vlnodných fotonických struktur (J. Čtyrky).....** 166

**Aktivní vlákna dopovaná nanočásticemi (J. Mrázek, I. Kašík, O. Podrazký, J. Aubrecht, J. Cajzl, J. Proboštová, P. Peterka).....** 170

**Thuliem dopovaná vlákna a optické vláknové součástky pro vláknové lasery na vlnových délkách v okolí 2 μm (P. Peterka, P. Honzátka, I. Kašík, O. Podrazký, F. Todorov, J. Cajzl, P. Koška, Y. Baravets, J. Aubrecht, J. Mrázek).....** 174

**ÚFE na veletrhu AMPER 2015 (A. Michková).....** 177

**Vláknově optický senzor pH pro in-vivo měření v mikroskopických biologických vzorcích (O. Podrazký, J. Mrázek, T. Martan, S. Vytykáčková, J. Proboštová, I. Kašík, D. Sedmera, K. Hoyerová).....** 178

**Nizkoteplotní fotoluminiscenční spektroskopie krystalických a skelných polovodičů (P. Gladkov, J. Zavadil).....** 182

**Jednodimenzionální nanostruktury ZnO (J. Grym, R. Yatskiv, J. Vaniš, O. Černožský, J. Lorinčík).....** 185

**Bioelektrodynamika: vysokofrekvenční elektromagnetické procesy v biologických systémech (O. Kučera, D. Havelka, M. Cífra).....** 189

**Přenos přesného času pomocí optických vláken (A. Kuna).....** 191

**Doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc. jubluje (P. Peterka).....** 194

**Začátky výzkumu optické holografie (M. Miler).....** 196

**První laserová operace oční sítnice v Československu (J. Blabla, V. Trkal).....** 197

**Komunikace pomocí laserového svazku v atmosféře – jedno z prvních uplatnění laseru (M. Chomát, M. Miler).....** 199

**60 let světla v Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i. (P. Peterka, J. Zavadil).....** 200

**Symposium SPIE Optics + Optoelectronics zaznamenalo rekordní zájem.....** 204

**Elita v oboru polovodičových materiálů a optiky pro střední infračervenou spektrální oblast se sešla v Praze (F. Todorov, P. Nováčková).....** 205

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, 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 631 576, e-mail: eva.pelclova@upol.cz.

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.), Monika BOŽÍKOVÁ - Slovak Univ. Agricul., Nitra (Slovak Rep.), Ondřej ČÍP - Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Science, Brno (Czech Rep.), Alexandr DEJNEKA - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Ondřej HADERKA - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Pavol HORŇÁK - Slovak Tech. Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Jan HOŠEK - Czech Tech. Univ., Praha (Czech 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 KRŠÁLEK - Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., 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.), Miroslav MILER - Inst. of Photonics and Electronics of Academy of Sciences, v.v.i., Praha (Czech Rep.), Jiří NOVÁK - Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Jan PEŘINA - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Sylvie PETROVÁ, Fac. of Medicine, Masaryk Univ. (Czech Rep.), Jaromír PIŠTORA - Tech. Univ., Ostrava (Czech Rep.), Michael PROUZA - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (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.), Anton ŠTRBA - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Olga TŮMOVÁ, University of West Bohemia, Plzeň (Czech Rep.), Honorary member Ing. Zdeněk MARTÍNEK, Nové město nad Metují (Czech 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 SPIE, the international society for optics and photonics 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, 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:** Dagmar Sendaráková, Department of Experimental Physics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Mlynská dolina F2/149, 842 48 Bratislava, Slovak Republic, tel. 00421 260 295 391, e-mail: senderakova@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, e-mail: eva.pelclova@upol.cz  
Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2015

# FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL

VOLUME 60

5 - 6/2015

## CONTENTS

<b>Introduction from the director of the Institute of Photonics and Electronics of the CAS, v. v. i. (J. Homola)</b> .....	155
<b>Plasmonic biosensors for detection of chemical and biological agents (H. Lisalová Vaisocherová, M. Vala, J. Homola)</b> .....	158
<b>Effect of the coverage density of metal nanoparticles on the performance of SERS-active optical fibers (J. Kaňka)</b> .....	161
<b>Generation of mid-infrared radiation in nonlinear crystals using fiber lasers (Y. Baravets, P. Honzátko, F. Todorov, P. Gladkov)</b> .....	164
<b>Theory and modeling of guided-wave photonic structures (J. Čtyroký)</b> .....	166
<b>Nanoparticle-doped active optical fibers (J. Mrázek, I. Kašík, O. Podrazký, J. Aubrecht, J. Cajzl, J. Proboštová, P. Peterka)</b> .....	170
<b>Thulium-doped fibers and fiber-optic components for fiber lasers at around 2 μm (P. Peterka, P. Honzátko, I. Kašík, O. Podrazký, F. Todorov, J. Cajzl, P. Koška, Y. Baravets, J. Aubrecht, J. Mrázek)</b> .....	174
<b>ÚFE at the fair trade AMPER 2015 (A. Michková)</b> .....	177
<b>Vláknově optický senzor pH pro in-vivo měření v mikroskopických biologických vzorcích (O. Podrazký, J. Mrázek, T. Martan, S. Vytykáčová, J. Proboštová, I. Kašík, D. Sedmera, K. Hoyerová)</b> .....	178
<b>Low-temperature photoluminescence spectroscopy of crystalline and glass semiconductors (P. Gladkov, J. Zavadil)</b> .....	182
<b>One-dimensional ZnO nanostructures (J. Grym, R. Yatskiv, J. Vaníš, O. Černohorský, J. Lorinčík)</b> .....	185
<b>Bioelectrodynamics: High-frequency electromagnetic processes in biological systems (O. Kučera, D. Havelka, M. Cifra)</b> .....	189
<b>Time transfer using optical fiber links (A. Kuna)</b> .....	191
<b>The jubilee of Prof. Miroslav Miler (P. Peterka)</b> .....	194
<b>Beginnings of optical holography research (M. Miler)</b> .....	196
<b>The first laser surgery of eye's retina in Czechoslovakia (J. Blabla, V. Trkal)</b> .....	197
<b>Free space optical communication using lasers - one of the first laser applications (M. Chomát, M. Miler)</b> .....	199
<b>60 years of light in the Institute of Photonics and Electronics (P. Peterka, J. Zavadil)</b> .....	200
<b>Symposium SPIE Optics + Optoelectronics: record attendance</b> .....	204
<b>The Elite in the field of semiconductor materials and optics for the mid-infrared spectral region met in Prague (F. Todorov, P. Nováčková)</b> .....	205

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, 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 631 576, e-mail: eva.pelclova@upol.cz.

Price for single copy: 40 Kč incl. VAT

# Úvodní slovo ředitele Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i.

Vážení čtenáři,

tohoto čísla časopisu *Jemná mechanika a optika* je věnováno Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd České republiky, v. v. i. (ÚFE). Je mi potěšením, že vám mohu na úvod tohoto zvláštního čísla naše pracoviště představit.

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i. (dříve Ústav radioelektroniky a elektroniky ČSAV) patří mezi výzkumné ústavy Sekce aplikované fyziky Akademie věd České republiky. V současnosti ÚFE zaměstnává 100 pracovníků, z nichž většina působí ve výzkumných útvarcích. Vedle výzkumných útvarců má ÚFE i podpůrné útvarcy jako např. ekonomické oddělení, oddělení služeb a zásobování, oddělení IT nebo dílnu. Od roku 2013 je výzkumná činnost ÚFE soustředěná do pěti výzkumných útvarců, které tvoří čtyři výzkumné týmy a jedna specializovaná laboratoř. Výzkumné týmy

- *Optické biosenzory*,
  - *Vláknové lasery a nelineární optika*,
  - *Příprava a charakterizace nanomateriálů*,
  - *Bioelektrodynamika*
- provádějí základní a aplikovaný výzkum v různých oblastech fotoniky, optoelektroniky a elektroniky. Specializovaná laboratoř
- *Laboratoř Státního etalonu času a frekvence* se zabývá velmi přesným měřením času a frekvence.

Výzkumný tým *Optické biosenzory* se zabývá výzkumem a vývojem optických afinitních biosenzorů. Optické afinitní biosenzory jsou zařízení, která kombinují velmi citlivé optické metody s vysokou afinitou a selektivitou, se kterou jsou některé biomolekuly (např. protilátky) schopny rozpoznávat jiné molekuly. Výsledkem tohoto spojení optiky a biologie je technologie, která umožňuje zkoumat (bio)molekuly a jejich interakce, detekovat jejich přítomnost či stanovit jejich koncentraci. Na rozdíl od tradičních laboratorních technik jsou biosenzory schopny detekovat látky přímo v místě jejich výskytu, navíc velmi rychle. Proto se mohou velmi dobře uplatnit při ochraně životního prostředí, v lékařské diagnostice, kontrole kvality a nezávadnosti potravin, obraně proti biologickému terorismu a dalších důležitých oblastech. Výzkumný tým *Optické biosenzory* se zabývá především výzkumem optických biosenzorů založených na speciálních elektromagnetických vlnách – povrchových plasmonech. Na tomto výzkumu se na ÚFE podílí odborníci z různých oblastí fyziky, chemie a biologie. Právě díky tomuto i v mezinárodním srovnání ojedinělému multidisciplinárnímu přístupu je výzkumný tým *Optické biosenzory* schopen realizovat výzkum a vývoj optických biosenzorů v jeho plné komplexnosti od výzkumu fotonických a plasmonických (nano)struktur a funkčních biomolekulárních souborů, přes vývoj optických měřicích metod a systémů, až po jejich využití pro studium biomolekulárních interakcí a detekci chemických a biologických látek. Tým vyvinul biosenzory umožňující stanovit hladiny biomarkerů Alzheimerovy nemoci

# Introduction from the director of the Institute of Photonics and Electronics of the CAS, v. v. i.

Dear readers,

This special issue of *Fine Mechanics and Optics* is dedicated to the Institute of Photonics and Electronics of the Czech Academy of Sciences (in Czech Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd České republiky, v. v. i. or ÚFE in an abbreviated form). It is my pleasure to open this special issue with a brief introduction to our Institute.

The Institute of Photonics and Electronics of the Czech Academy of Sciences (formerly the Institute of Radio Engineering and Electronics of the Czechoslovak Academy of Sciences) belongs to the Section of Applied Physics of the Czech Academy of Sciences. Currently, ÚFE has 100 employees, the majority of whom work in research. Since 2013, research activities at ÚFE are carried out in five research units, which consist of four research teams and one specialized laboratory. The research teams at ÚFE are:

- *Optical Biosensors*,
- *Fiber Lasers and Non-Linear Optics*,
- *Synthesis and Characterization of Nanomaterials*, and
- *Bioelectrodynamics*.

These teams pursue fundamental and applied research in different areas of photonics, optoelectronics, and electronics. In addition to these teams, there is one specialized laboratory:

- *Laboratory of the National Time and Frequency Standard*.

This laboratory focuses on highly accurate measurements of time and frequency.

The *Optical Biosensors* research team pursues the research and development of optical affinity biosensors. Optical affinity biosensors are devices that combine very sensitive optical techniques with special biomolecules (e.g. antibodies), which are able to recognize and capture other molecules with high affinity and selectivity. The result of this combination of optics and biology is a technology that enables the study of (bio)molecules and their interactions as well as a determination of their concentrations. Unlike traditional laboratory techniques, biosensors are capable of rapid detection of target substances directly in the place of their occurrence. Because of these capabilities, biosensors are attractive for applications in a variety of important areas, including environmental monitoring, medical diagnostics, food quality and safety control, and defense against bioterrorism. Specifically, the team focuses on the research of optical biosensors based

on special electromagnetic waves: surface plasmons. This research brings together experts from various areas of physics, chemistry, and biology. This multidisciplinary approach makes the team unique on an international level, and allows the team to conduct research into optical biosensors in its full complexity: from the research of photonic and plasmonic (nano)structures and functional biomolecular coatings, to the development of optical measuring methods and systems, and the use of these systems for the study of both biomolecular interactions and the detection of chemical and biological substances. The team has developed optical biosensors that are able to detect a wide variety of biological compounds,



Prof. Jiří Homola, ředitel ÚFE AV ČR, před vstupem do hlavní budovy ústavu v Praze – Kobylisích

či různých druhů rakoviny, zachytit znečištění životního prostředí látkami, jako jsou pesticidy či polycyklické aromatické uhlovodíky, či přítomnost nebezpečných bakterií a toxinů v potravinách. Originální biosenzory vyvinuté týmem *Optické biosenzory* dnes využívají univerzity, výzkumné instituce a firmy v USA, Evropě i Asii. Významné výsledky dosažené týmem *Optické biosenzory* byly oceněny národními i mezinárodními cenami, jako jsou Roche Prize for Sensor Technology, Česká hlava (kategorie Invence), Premium Academiae či Cena ministra školství, mládeže a tělovýchovy za mimořádné výsledky výzkumu, experimentálního vývoje a inovací. Tým je v současnosti rovněž hlavním řešitelem Projektu excelence „Nanobiofotonika pro medicínu budoucnosti“ Grantové agentury České republiky.

Výzkumný tým *Vláknové lasery a nelineární optika* provádí výzkum a vývoj zaměřený na výkonové vláknové lasery a jejich využití v materiálovém průmyslu, medicíně a nelineární optice. V rámci základního výzkumu se tým zabývá studiem mechanismu kombinování laserových svazků, generováním a zesilováním nano, piko a femtosekundových pulzů, či přenosem světla a jeho interakcí s různými materiály. Tyto poznatky jsou dále využity při vývoji vláknových laserů, které nacházejí uplatnění v lékařské praxi při dentistických zákrocích, očních operacích nebo rozbíjení močových kamenů. Výkonové vláknové lasery vyvíjené týmem mohou rovněž nalézt uplatnění v materiálovém průmyslu pro gravírování, řezání, sváření nebo povrchové úpravy materiálů. Zatímco pro řezání a sváření kovových plátů se obvykle používají ytterbiové lasery, pro zpracování plastů jsou vhodnější thuliové lasery. V oblasti nelineární optiky věnuje tým pozornost především využití výkonových vláknových laserů pro generátory záření ve střední infračervené oblasti. Generátory tohoto typu se uplatňují v laserové spektroskopii při analýze stopových množství různých látek a mohou proto nalézt využití v oblastech, jako je zajištění bezpečnosti chemických provozů, sledování kvality ovzduší nebo lékařská diagnostika. Pro vývoj vlastních vláknových laserů a parametrických generátorů tým rozvíjí technologii výroby speciálních optických vláken, optických vláknových součástek a pólování nelineárních krystalů. Výzkumný tým *Vláknové lasery a nelineární optika* úzce spolupracuje s řadou průmyslových partnerů. Výsledek jedné z takových spoluprací byl v roce 2013 oceněn cenou Technologické agentury České republiky v kategorii Originalita řešení.

Výzkumný tým *Příprava a charakterizace nanomateriálů* se dlouhodobě zabývá přípravou a studiem vlastností polovodičových materiálů se zaměřením na elektronické a optické jevy na povrchu a rozhraní nanomateriálů, vyvolané dopadem fotonů, iontů, elektronů nebo adsorpcí plynů, a na využití těchto nanomateriálů pro senzorické aplikace, vylepšení nanodiagnostických schopností analytických metod nebo jako zdrojů a detektorů světelného záření. Jednou z hlavních oblastí zájmu tohoto týmu je příprava usměrňujících (Schottkyho) kontaktů na sloučeninových polovodičích. Na základě teoretické a experimentální analýzy Schottkyho struktur, připravených depozicí koloidního grafitu a elektroforetickou depozicí kovových nanočástic, byl například detailně popsán transport elektrického náboje rozhraním grafit/polovodič a kovové nanočástice/polovodič. Tým *Příprava a charakterizace nanomateriálů* využil vlastní vysoce kvalitní Schottkyho kontakty pro realizaci senzoru vodíku a demonstroval jeho schopnost detekovat velmi nízké koncentrace. Neméně důležitou oblastí je výzkum jednodimenzionálních nanostruktur sloučeninových polovodičů s cílem připravit jejich periodická pole a pochopit děje odehrávající se při jejich nukleaci a růstu. Výzkumný tým rovněž vyvíjí pokročilé metody elektrické a optické charakterizace polovodičových nanostruktur a navazuje tak na předchozí úspěchy při konstrukci unikátních balistických elektronových emisních mikroskopů a fotoluminiscenčních spektrometrů pro práci v širokém rozsahu teplot a vlnových délek.

Výzkumný tým *Bioelektrodynamika* je juniorský výzkumný tým, který se zabývá aktivními a pasivními elektrodynamickými

including biomarkers of both Alzheimer's disease and different types of cancer, environmental pollutants and harmful bacteria and toxins in foods. The optical biosensors developed by the team are used at universities, research institutions, as well as companies situated in the USA, Europe, and Asia. The *Optical Biosensors* team has been awarded multiple national and international prizes, including the Roche Prize for Sensor Technology, the Czech Head Award (Inventions category), the Premium Academiae of the Czech Academy of Sciences, and the Minister of Education, Youth and Sports Award for Outstanding Research, Experimental Development and Innovation. The team is currently coordinating the center of excellence "Nanobiophotonics for medicine of the future," supported by the Czech Science Foundation.

The *Fiber lasers and non-linear optics* research team carries out the research and development aimed at high-power fiber lasers and their applications in material industry, medicine, and non-linear optics. Within basic research, the team focuses on the study of the mechanism of laser beam combining, the generation and amplification of nano, piko and femtosecond pulses, and the transmission of light and its interactions with different materials. These findings are utilized in the development of fiber lasers that can be used in various medical practices, including dental procedures, eye surgery, and the breaking of urinary stones. The power fiber lasers developed by the *Fiber lasers and non-linear optics* research team can also be used in the material industry for engraving, cutting, welding, and the surface treatment of materials. Ytterbium lasers are typically used for cutting and welding metal plates, while thulium lasers are better for processing plastics. In the field of non-linear optics, the team primarily focuses on the use of high-power fiber lasers for radiation generators operating in the mid-infrared region. These types of generators can be applied in laser spectroscopy for the analysis of trace amounts of various substances and can therefore be used in areas such as air quality monitoring, ensuring the safety of chemical operations, and medical diagnostics. The *Fiber lasers and non-linear optics* research team develops the manufacturing technology of special optical fibers, optical fiber components, and non-linear crystal poling for the development of their own fiber lasers and parametric generators. The research team maintains close cooperation with a number of industrial partners. A result of one of those collaborations was awarded the Technology Agency of the Czech Republic Award in the category of Original solutions in 2013.

The *Synthesis and Characterization of Nanomaterials* research team has focused on the preparation and study of the properties of semiconductor materials. Specifically, the team focuses on electronic and optical phenomena at the surfaces and interfaces of nanomaterials caused by the impact of photons, ions, electrons, or the adsorption of gases. Further focus is on the use of these nanomaterials for sensor applications, the development of light sources and detectors, and the enhancement of nanodiagnostic capabilities of analytical methods. One of the main areas of interest of this team is the preparation of rectifying (Schottky) contacts on compound semiconductors. For example, the team recently described the transport of an electric charge through a graphite/semiconductor and a metal nanoparticle/semiconductor interface. This work was based on a theoretical and experimental analysis of Schottky structures prepared by both the deposition of colloidal graphite and electrophoretic deposition of metal nanoparticles. The team used their own Schottky contacts in a hydrogen sensor and demonstrated its ability to detect low hydrogen levels. Equally important is the team's research of one-dimensional compound semiconductor nanostructures, specifically to prepare their periodic arrays as well as to understand the phenomena that take part during their nucleation and growth. The research team also develops advanced methods for the electrical and optical characterization of semiconductor nanostructures. This work follows previous success in the construction of unique ballistic electron emission microscopes and photoluminescence spectrometers.

a elektronickými vlastnostmi biomateriálů od úrovně molekul až po úroveň tkání. Cílem tohoto výzkumu je přispět k poznání endogenních elektrodynamických jevů v buněčné fyziologii a signalizaci a jejich využití v medicíně. Významným aktuálním výzkumným tématem je analýza elektromagnetických vlastností proteinových nanostruktur se zaměřením na mikrotubuly. Kromě jejich významu pro samotnou mechanickou stabilitu buněk mají mikrotubuly klíčovou funkci v buněčném dělení a podílejí se také na vnitřní samoorganizaci buněk. Výzkum elektromagnetických vlastností mikrotubulů a možností jejich ovlivňování tak přispívá k vývoji nových terapeutických postupů pro léčbu nádorových onemocnění. Dále se aktivity týmu zaměřují na výzkum endogenních radiofrekvenčních a optických biosignálů. Jedná se o novou třídu biosignálů, jejichž detekce je neinvazivní, nevyžaduje vložení kontrastních chemických látek do diagnostikovaných tkání nebo buněk, ani vnější stimulaci např. ozářením. Tyto biosignály mohou být proto perspektivně využity k šetrné lékařské diagnostice. Zejména měření endogenních optických biosignálů, známých také pod názvem ultraslabá fotonová emise, již nachází využití v oblastech biomedicíny, ve kterých je potřeba neinvazivně měřit aktivitu volných radikálů, které hrají roli při stárnutí a kardiovaskulárních a degenerativních onemocněních. Aktivity týmu zahrnují jak experimentální činnost, pro kterou si tým zajišťuje i vývoj experimentálních zařízení a senzorů vyráběných s využitím nanotechnologických metod přímo v ÚFE, tak navazující teoretickou analýzu zaměřenou na modelování elektrodynamických procesů.

Specializovaná *Laboratoř Státního etalonu času a frekvence* je v rámci národního metrologického systému jako přidružená laboratoř Českého metrologického institutu pověřena správou Státního etalonu času a frekvence. Laboratoř fyzicky realizuje jednotku času – sekundu a vytváří národní časovou stupnici, tedy přesný čas v České republice. *Laboratoř Státního etalonu času a frekvence* je nejvyšší metrologickou jednotkou v zemi v oblasti času a frekvence. Laboratoř provádí náročné kalibrace primárních a sekundárních zdrojů času a frekvence (kvantové etalony), zdrojů vysoce stabilní frekvence nebo zařízení pro porovnávání časových stupnic. Laboratoř navazuje dostupné atomové zdroje času a frekvence na národní časovou stupnici a přispívá tak k tvorbě světového koordinovaného času UTC. Laboratoř Státního etalonu času a frekvence se dále zabývá výzkumem v oblasti měření frekvenční stability signálů, zejména velmi přesného měření délky časového intervalu a času událostí, a dále časovým transferem (porovnáváním časových stupnic) prostřednictvím satelitních navigačních systémů, optických vláken a plně optických sítí. Výsledky tohoto výzkumu byly využity právě při vývoji aparatur pro porovnávání časových stupnic s využitím signálů satelitních navigačních systémů, např. GPS, GLONASS, GALILEO nebo EGNOS. Tyto aparatury našly následně uplatnění po celém světě; jsou jimi vybaveny mnohé národní metrologické laboratoře času a frekvence. Aparatury realizované *Laboratoří Státního etalonu času a frekvence* také používá několik významných vědeckých institucí, např. NASA v projektu Lunar Research Orbiter, či ESA pro navazování systémového času GALILEO. Tato aparatura mimo jiné posloužila při nezávislé recalibraci časové linky v projektu OPERA (měření rychlosti neutrin).

Více o historii ÚFE, jeho významných osobnostech či výzkumných aktivitách a úspěších se můžete dozvědět na následujících stránkách. Věřím, že vás zaujmou a přeji vám příjemné čtení.

prof. Ing. Jiří Homola, CSc., DSc.  
ředitel ÚFE

The *Bioelectrodynamics* research team is a junior team which focuses on both active and passive electrodynamic and electronic properties of biomaterials, from the molecular up to the tissue level. The aim of this research is to contribute to the knowledge of endogenous electrodynamic phenomena in cell physiology and signaling and their use in medicine. Currently, a significant research topic is the analysis of the electromagnetic properties of protein nanostructures, with a focus on microtubules. In addition to their importance for the mechanical stability of cells, microtubules have a key role in cell division and are also involved in internal self-organization of cells. The research of the electromagnetic properties of microtubules and the possibilities of influencing them via electromagnetic field contributes to the development of new therapeutic approaches for tumor treatment. Furthermore, the team activities include the research of endogenous radiofrequency and optical biosignals. These belong to a new class of biosignals: detection is completely non-invasive and does not require the insertion of contrast chemicals into the diagnosed tissues or cells, nor does it require any external stimulation (e.g. irradiation). These biosignals can therefore be used for gentle medical diagnostics. Specifically, the measurement of endogenous optical biosignals (also known as ultra-weak photon emission) is already being used in biomedical areas that have need of non-invasive activity measurement of free radicals, which play an important role in aging and cardiovascular and degenerative diseases. The experimental research of the *Bioelectrodynamics* team takes advantage of experimental devices and sensors created via the array of nanotechnological methods at ÚFE. The team also conducts related theoretical analyses focused on the modeling of a variety of electrodynamic processes.

The specialized *Laboratory of the National Time and Frequency Standard* is a designated institute of the Czech Metrology Institute within the National Metrology System and is entrusted with the management of the National Time and Frequency Standard. The laboratory physically realizes the unit of time, the second, and generates the national time scale: the legal time in the Czech Republic. The *Laboratory of the National Time and Frequency Standard* is the highest metrological authority in the country in the field of time and frequency. The laboratory performs demanding calibrations of primary and secondary time and frequency standards (atomic clocks), ultrastable frequency sources, and equipment for comparing time scales. The laboratory links available time and frequency sources to the national time scale and thus contributes to the calculation of the Coordinated Universal Time. The laboratory also conducts research in the field of measuring the frequency stability of signals, particularly very accurate measurements of time intervals, event times, and time transfer (time scales comparisons) using satellite navigation systems, optical fibers, and fully optical networks. The results of this research have been used in the development of systems for the comparisons of time scales using the signals of satellite navigation systems, e.g. GPS, GLONASS, GALILEO, and EGNOS. This equipment is subsequently being used all around the world, many national metrology laboratories of time and frequency use it. The equipment partly developed by the laboratory is used by several important research institutions, e.g. NASA in its Lunar Reconnaissance Orbiter project, or ESA for establishing the GALILEO system time. This equipment was also used for the independent timeline calibration within the OPERA project (measuring the speed of neutrinos).

You can learn more about the history of the Institute, its eminent personalities, research activities and achievements on the following pages. I hope you will find it interesting and wish you a pleasant reading.

prof. Ing. Jiří Homola, CSc., DSc.  
director of ÚFE

# Plasmonic biosensors for detection of chemical and biological agents

*This paper reviews recent advances in research into plasmonic biosensors made at the Institute of Photonics and Electronics of the CAS, especially, the advances in the development of plasmonic sensor instrumentation and functional coatings. Examples of applications of plasmonic biosensors for detection of selected chemical and biological agents are provided.*

**Keywords:** optical biosensor, surface plasmon, SPR, functionalization, biodetection

## 1. INTRODUCTION

Biophotonics presents an emerging field of research that combines physical, chemical and life sciences. The integration of photonics, biology, and nanotechnology leads to a new generation of devices that make it possible to characterize chemical and other molecular properties, and furthermore, discover novel phenomena and biological processes occurring at the molecular level.

Since their conception in the 1990s, a great deal of attention has been given to optical biosensors based on surface plasmons, usually referred to as surface plasmon resonance (SPR) biosensors or plasmonic biosensors. SPR sensors have become an important tool for the study of biomolecules and their interactions; these sensors have been shown to hold potential for rapid and sensitive detection of a wide range of chemical or biological agents with relevance to medical diagnostics, environmental monitoring, food safety, and security [1, 2].

SPR biosensors exploit a special mode of an electromagnetic field, a surface plasmon that can be excited on thin metallic films or metallic objects of nanoscopic dimensions. In SPR biosensors, special biomolecules (biorecognition elements) that are able to recognize and capture target molecules are immobilized on the surface of a metal. When a sample is brought in contact with an SPR sensor, target molecules bind to the biorecognition elements and generate a local change in the refractive index. This change is probed by the surface plasmon and can be quantified by measuring changes in the characteristics of an optical wave coupled to the surface plasmon. These characteristics include the position of the resonant feature in the angular (or wavelength) spectrum, or the amplitude, phase, or polarization of the optical wave.

## 2. ADVANCES IN SPR BIOSENSOR INSTRUMENTATION

Most of the SPR sensor instruments used today are designed for applications in biomolecular interaction analysis in centralized laboratories. They are complex and bulky instruments that often offer a degree of automation. The best SPR sensors are able to measure changes in refractive index down to  $10^{-7}$  refractive index units (RIU). They typically rely on spectral (angular or wavelength) interrogation of surface plasmons and therefore offer high accuracy, usually at the expense of the limited number of measurement channels they can provide. Therefore, among other factors, research into SPR sensor instruments has recently been driven by the need for SPR systems with a large number of sensing channels for high-throughput screening applications and portable SPR sensors for field use. Researchers at the Institute of Photonics and Electronics have pursued the development of novel approaches to SPR sensing and new SPR sensor instruments related to these needs. Two examples of this developmental effort are given below: a high-throughput sensor based on SPR imaging and a compact system based on a new approach to the spectroscopy of surface plasmons utilizing a special diffraction grating.

The high-throughput SPR sensor is based on SPR imaging in polarization contrast. In this type of sensor, the sensing surface is imaged onto a spatially resolved 2D detector (fig. 1), which receives SPR signals originating from different areas of the sensor surface. The intensity of light reflected from each different area is proportional to the amount of the bound analyte. This allows the sensor to acquire signals from up to several hundreds of different areas on the surface, and in conjunction with appropriate spatially resolved functionalization, to simultaneously monitor hundreds of different molecular interactions [3]. This type of SPR sensor has been demonstrated to provide a refractive index resolution comparable with high-resolution spectroscopic SPR systems [4]. Recently, this SPR imaging sensor has been combined with a nanostructured plasmonic structure consisting of an array of gold nanorods, and comparable analytical performance was demonstrated [5].

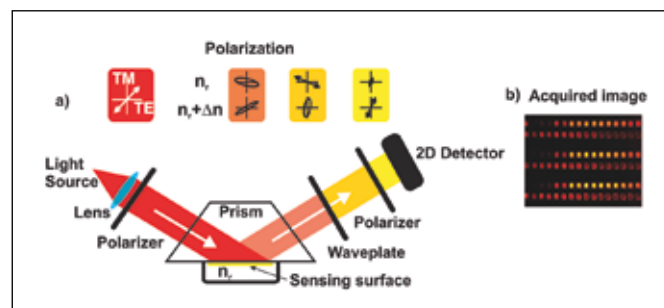


Fig. 1 Principle of the high-throughput SPR imaging sensor based on polarization contrast. a) Arrangement of the sensor optics showing polarization states in different parts along the optical path for two different refractive indices at the sensor surface; and b) example of an acquired image with 96 sensing spots

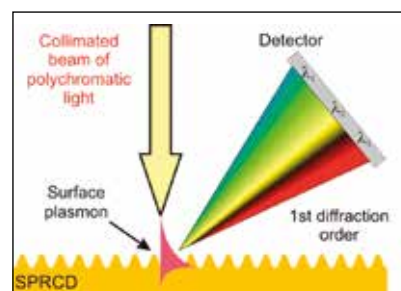


Fig. 2 Principle of the surface plasmon resonance coupler and disperser diffraction grating. A portion of the incident light is coupled to a surface plasmon through the 2<sup>nd</sup> diffraction order, which is manifested as a dip in the spectrum of light dispersed through the 1<sup>st</sup> diffraction order



Substantial effort has also been dedicated to the miniaturization of SPR sensors and the development of a new generation of SPR sensors for field use. We developed a novel approach to spectroscopy of surface plasmons in which a diffraction grating having a special design, denoted as surface plasmon coupler and disperser (SPRCD), is used to both couple the incident light to a surface plasmon as well as disperse the diffracted light to enable its spectroscopic analysis (*fig. 2*).

We constructed a laboratory prototype of a compact SPR sensor based on this approach and demonstrated the achievement of a refractive index resolution as low as  $2 \times 10^{-7}$  RIU in four [6], and later in six independent channels. The prototype used a disposable plastic cartridge consisting of microfluidic chip and hot-embossed gold-coated plastic SPRCD element (*see fig. 3*).



Fig. 3 Photograph of a prototype of the compact SPR biosensor based on SPRCD element incorporated in a plastic cartridge

### 3. ADVANCES IN FUNCTIONAL COATINGS

Functional coatings that recognize and capture target analytes present an important part of plasmonic biosensors: providing them with the desired specificity towards an analyte. Typically, it is a planar surface (e.g. a glass substrate coated with a thin gold film) onto which biorecognition elements (e.g. antibodies) are immobilized. The biorecognition elements specifically recognize and capture target analyte, thus producing a sensor response. However, in detection applications involving complex real-world samples (e.g. undiluted blood plasma or food extracts), the adsorption of non-target molecules to the sensor surface (biological “fouling”) may occur, giving rise to a false positive response. In addition to SPR biosensors, this effect presents a major challenge for all label-free biosensors. Therefore, the development of functional coatings having a high degree of resistance to fouling presents an important direction in SPR biosensor research [1, 7].

Historically, the most widely used low-fouling functionalization methods involve the formation of close-packed oligo (ethylene glycol) (OEG)-based alkanethiolate self-assembled monolayers (AT-SAMs) containing molecules with end-tethered functional groups [8, 9]. However, the ability of the OEG-based AT-SAMs to resist fouling has been found to be rather limited when exposed to real-world complex media, such as undiluted blood plasma or crude food extracts [7, 9].

Polymer brushes combine the advantages of SAMs (high surface density, ease of fabrication) and polymers (providing 3D network for the immobilization of biorecognition elements), and therefore represent an attractive alternative. In collaboration with the Institute of Macromolecular Chemistry CAS in Prague and the University of Washington in Seattle (USA), we have developed several functionalizable low-fouling polymer brushes: poly(2-hydroxyethyl methacrylate) (pHEMA), poly(2-hydroxypropyl methacrylate) (pHPMA), and carboxy-functional poly(carboxybetaine acrylamide) (pCBAA). We have demonstrated that these polymer brushes can be effectively functionalized with various biorecognition

elements via NHS/EDC chemistry (*fig. 4*). The resistance to fouling from undiluted food extracts such as milk, cucumber, and hamburger was studied both on bare and functionalized brushes. We found that the hydroxy-functional brushes (pHEMA, pHPMA) lost their resistance capabilities after the activation of the hydroxyl groups. These results also indicated that the original pCBAA structure was recovered by the regeneration of carboxyls in the zwitterionic groups of pCBAA after the activation of carboxyls, and the coating maintained its capability to resist fouling from real-world complex media [9]. High levels of immobilization on pCBAA brushes have been achieved for both antibodies as well as DNA probes [9, 10].

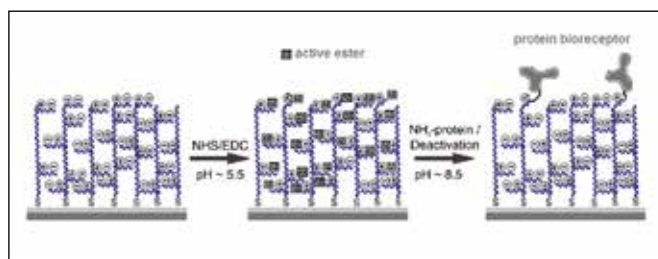


Fig. 4 A scheme of the activation, protein immobilization, and deactivation of a pCBAA brush [7]

We have also pursued the transfer of functionalization procedures (previously developed for continuous coatings) to nanostructured surfaces [8, 11]. For example, we have researched the functionalization of gold nanoparticles (AuNPs) in order to enable their use in both optical platforms for localized surface plasmon resonance (LSPR) sensors as well as to enhance the response of conventional SPR biosensors [8]. Thiol chemistry was also investigated as a potential approach to functionalize plasmonic biosensors based on an array of trapezoidal nanoantennas developed at Imperial College London (UK) [11].

### 4. BIOANALYTICAL APPLICATIONS

To date, plasmonic biosensors have been used for a large variety of bioanalytical tasks. The following section provides several representative examples of such applications.

A potentially important application area for SPR biosensors is medical diagnostics. The monitoring of levels of biomolecules (by means of biosensors) related to the onset or progression of a disease (disease biomarkers) provides a promising avenue for the early diagnosis of severe diseases, such as Alzheimer’s disease or various types of cancers, as well as an assessment of the response of a patient to treatment [10, 12–14].

Researchers at the Institute of Photonics and Electronics developed an SPR biosensor for the detection of microRNAs (miRNAs) related to myelodysplastic syndromes (MDS). MDS are a group of disorders of the clonal hematopoietic stem cell characterized by ineffective blood production and a propensity to transform to acute myeloid leukemia. To enable detection of low levels of miRNAs in erythrocyte lysate (EL), low-fouling functional coatings based on pCBAA and amino-modified oligonucleotide probes were used. A two-step detection assay was employed in which hybridization of target miRNAs with probe-functionalized pCBAA was followed with the capture of streptavidin-functionalized AuNPs to biotinylated probes. *Fig. 5* shows the sensor response to the last step of the assay for different miRNA concentrations. It was estimated that the biosensor is capable of detecting multiple miRNAs in EL at levels as low as 0.5 pM [10]. This biosensor was employed to screen three clinical EL samples for the levels of four different naturally-present miRNAs. The results confirm the potential of SPR biosensors for the parallelized detection of miRNA without time-consuming sample pretreatment and RNA extraction.

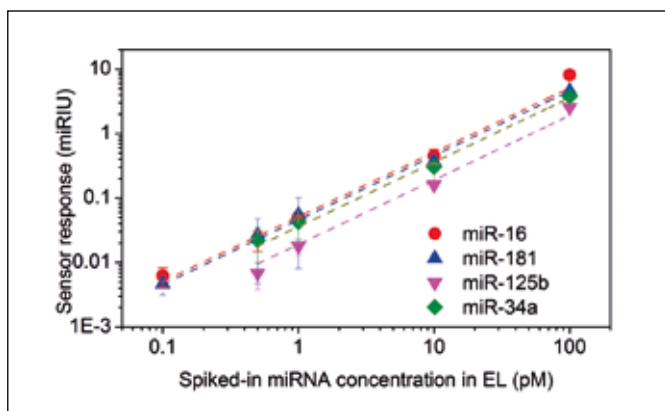


Fig. 5 Sensor response as a function of miRNA concentration for four different miRNAs (miR-16, miR-181, miR-34a, and miR-125b) in erythrocyte lysate

One of the targets related to food safety pursued by researchers at the Institute of Photonics and Electronics was a small chemical compound: bisphenol A (BPA). BPA has been found to seep into food or beverages from containers that are made of a certain class of plastics. Exposure to BPA is a concern, mainly due to possible health effects of BPA on the endocrine systems of infants and children. An SPR biosensor for rapid detection of BPA based on the SPRCD sensor platform and a binding inhibition detection format was developed and used to detect BPA in both drinking water and wastewater. The detection experiments revealed that the biosensor is capable of detecting BPA in drinking water and wastewater at concentrations as low as 0.04 and 0.14 ng/ml, respectively [15, 16].

Tetrodotoxin (TTX) is an extremely potent marine neurotoxin carried by pufferfish. A SPR biosensor was developed to detect TTX in pufferfish matrix using a binding inhibition assay format. An inter-laboratory pre-validation study was conducted to demonstrate both the robustness of the approach as well as its performance characteristics, such as selectivity, reproducibility, and accuracy. This approach was demonstrated to be capable of detecting TTX in pufferfish matrix with a limit of detection of 1.5 ng/ml [17].

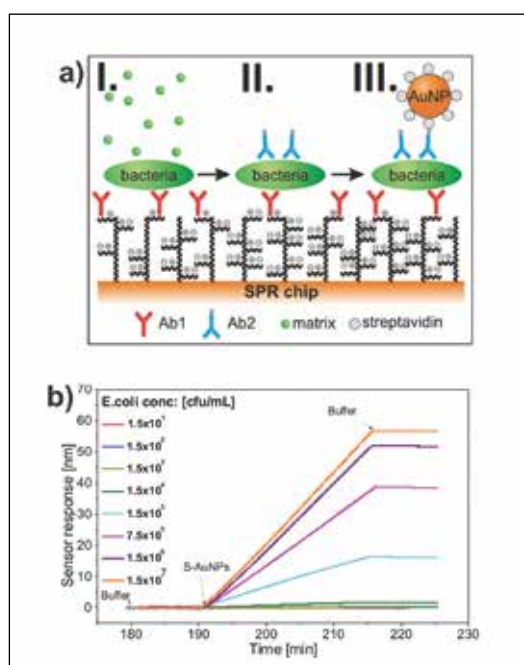


Fig. 6 a) A scheme of three-step assay for the detection of bacterial pathogens in crude food samples. b) SPR sensor response to S-AuNPs for eight different concentrations of *E. coli* O157:H7 in cucumber sample

Bacterial pathogens are the main cause of foodborne illnesses that are a serious health issue and economic burden for the society. Researchers at the Institute of Photonics and Electronics used a SPR biosensor having an optimized functional pCBAA coating along with functionalized gold nanoparticles (AuNPs) for rapid and ultra-sensitive detection of foodborne pathogens: *E. coli* O157:H7 and *Salmonella sp.* present in crude food samples (cucumber and hamburger extracts). The detection assay used in this study consists of three steps: (I) bacterial pathogens are captured by the antibody-functionalized pCBAA surface, (II) secondary biotinylated antibody ( $Ab_2$ ) binds to bacteria, and (III) streptavidin-coated AuNPs bind to  $Ab_2$ -coated surface to enhance the sensor response (fig. 6). The SPR biosensor was demonstrated to be capable of detecting *E. coli* O157:H7 and *Salmonella sp.* in crude food samples with extraordinary sensitivity, in time periods of less than 1 hour. Specifically, the limit of detection for *E. coli* was determined to be 31 cfu/mL and 24 cfu/mL in cucumber and hamburger extracts, respectively.

## 5. OUTLOOK

The advances in instrumentation, functionalization, and detection strategies allowed plasmonic biosensors not only to become an important tool for the investigation of biomolecular interactions, but also to be used in analytical applications, where biological or chemical agents were detected in pure or moderately complex samples. Presently, the main goal is to expand this technology to enable investigation of biomolecules and their interactions in their native environment (with a broad range of other biomolecules present) and detection of biological or chemical agents in complex real-world samples (bodily fluids, foods, etc.). We envision that this goal will be addressed through a concerted effort involving technological advances in numerous areas. These include the exploitation of new plasmonic structures and phenomena as well as advances in optical instrumentation and microfluidic systems. Further developments in field functional coatings will be particularly important.

*This research was supported by Praemium Academiae of the Academy of Sciences of the Czech Republic and the Czech Science Foundation (contract # P205/12/G118).*

## References

- [1] Homola, J.: **Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species**. Chemical Reviews **108/2** (2008) 462–93.
- [2] Homola, J.: **Surface plasmon resonance based sensors**. Springer Verlag 2006.
- [3] Piliarik, M. and J. Homola: **Self-referencing SPR imaging for most demanding high-throughput screening applications**. Sensors and Actuators B-Chemical **134/2** (2008) 353–5.
- [4] Piliarik, M., Bockova, M. and Homola, J.: **Surface plasmon resonance biosensor for parallelized detection of protein biomarkers in diluted blood plasma**. Biosensors & Bioelectronics **26/4** (2010) 1656–61.
- [5] Piliarik, M., et al.: **High-resolution biosensor based on localized surface plasmons**. Optics Express **20/1** (2012) 672–80.
- [6] Piliarik, M., et al.: **Compact and low-cost biosensor based on novel approach to spectroscopy of surface plasmons**. Biosensors & Bioelectronics **24/12** (2009) 3430–5.
- [7] Vaisocherova, H., E. Brynda, and Homola, J.: **Functionalizable low-fouling coatings for label-free biosensing in complex biological media: advances and applications**. Anal Bioanal Chem 2015, accepted.

- [8] Springer, T., et al.: **Enhancing sensitivity of surface plasmon resonance biosensors by functionalized gold nanoparticles: size matters.** *Anal Chem* **86/20** (2014) 10350–6.
- [9] Vaisocherova, H., et al.: **Functionalized ultra-low fouling carboxy- and hydroxy-functional surface platforms: functionalization capacity, biorecognition capability and resistance to fouling from undiluted biological media.** *Biosens Bioelectron* **51** (2014) 150–7.
- [10] Vaisocherova, H., et al.: **Rapid and sensitive detection of multiple microRNAs in cell lysate by low-fouling surface plasmon resonance biosensor.** *Biosens Bioelectron* **70** (2015) 226–31.
- [11] Aouani, H., et al.: **Ultrasensitive broadband probing of molecular vibrational modes with multifrequency optical antennas.** *ACS Nano* **7/1** (2013) 669–75.
- [12] Kristofikova, Z., et al.: **Protein tau-mediated effects on rat hippocampal choline transporters CHT1 and tau-amyloid beta interactions.** *Neurochem Res* **38/9** (2013) 1949–59.
- [13] Pimkova, K., et al.: **Surface plasmon resonance biosensor for the detection of VEGFR-1--a protein marker of myelodysplastic syndromes.** *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **402/1** (2012) 381–7.
- [14] Springer, T. and Homola, J.: **Biofunctionalized gold nanoparticles for SPR-biosensor-based detection of CEA in blood plasma.** *Anal Bioanal Chem* **404/10** (2012) 2869–75.
- [15] Hegnerova, K., et al.: **Detection of bisphenol A using a novel surface plasmon resonance biosensor.** *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **398/5** (2010) 1963–6.
- [16] Hegnerova, K. and Homola J.: **Surface plasmon resonance sensor for detection of bisphenol A in drinking water.** *Sensors and Actuators B-Chemical* **151/1** (2010) 177–9.
- [17] Vaisocherova, H., et al.: **Surface plasmon resonance biosensor for determination of tetrodotoxin: prevalidation study.** *Journal of AOAC International* **94/2** (2011) 596–604.

RNDr. Hana Lísalová (Vaisocherová), Ph.D., e-mail: lisalova@ufe.cz  
 Mgr. Milan Vala, e-mail: vala@ufe.cz  
 prof. Ing. Jiří Homola, CSc., DSc., e-mail: homola@ufe.cz  
 Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 – Kobylisy

*Jedná se o vědecký článek*

Jiří KAŇKA  
 Institute of Photonics and Electronics CAS, Praha

## Effect of the coverage density of metal nanoparticles on the performance of SERS-active optical fibers

*A numerical-analytical model has been developed to investigate the effect of the coverage density of metallic nanoparticles on the interplay between Raman gain and attenuation of guided mode in SERS-active optical fibers. The model was applied to different types of SERS-active fibers: a single-mode suspended-core photonic crystal fiber with silver nanoparticles immobilized on the walls of cladding channels and multi-mode unclad sapphire fiber with silver nanoparticles on its outer cylindrical surface. The predicted Raman intensity curves as functions of nanoparticle coverage density, covered fiber length and excited modes are in a good agreement with the published experimental results for the contrasting types of SERS-active fibers.*

**Keywords:** fiber optics sensors, surface-enhanced Raman scattering, spectroscopy, Raman

### 1. INTRODUCTION

The Institute of Photonics and Electronics (ÚFE) have been collaborating with the Stevens Institute of Technology, USA, in the field of biochemical and chemical detection based on functionalized optical fibers. The collaboration relies on the U.S. laboratory's excellence in the surface nano-functionalization of optical fibers and on our expertise in the computational modeling of specialty fibers, aimed at an interpretation of experimental results and optimization of fiber-optic sensor platforms. This paper gives an example of the IPE contribution to a joint development of the specialty fibers for detection of chemical and biochemical species employing Surface Enhanced Raman Scattering (SERS).

Three index-guiding solid-core photonic crystal fibers (PCF) of different air-cladding microstructures have been studied using

numerical simulations and hyperspectral Raman imaging to assess their respective potential for evanescent-field surface-enhanced Raman spectroscopy [1]. Silver spherical nanoparticles (Ag NPs) were immobilized in the cladding air channels of PCF making the fiber SERS-active, relying on localized plasmonic excitation on the nanoparticles. One of the advantages in using PCF as a SERS platform is that the light guided in the core can interact with the metal nanoparticles via the evanescent field along the extensive length of the fiber. Another advantage is in the fact that PCF is both a light guide and a gas/liquid transmission cell due to the accessible microscopic air channels making it an inherently robust optofluidics platform. We have found that a suspended-core PCF (SC PCF) consisting of a silica core surrounded by three large air channels conjoined by a thin silica web, has an overwhelming advantage

over the other investigated PCFs in terms of the ultimate limit of detection of an analyte of interest. We have demonstrated that SERS-active SC PCF exhibits unprecedented sensitivity, detecting  $1 \times 10^{-10}$  M R6G in an aqueous solution of only  $\sim 7.3$   $\mu\text{L}$  sampling volume [1]. Shown in Fig. 1 is a scanning electron microscope (SEM) micrograph of a cross-section of SC PCF.

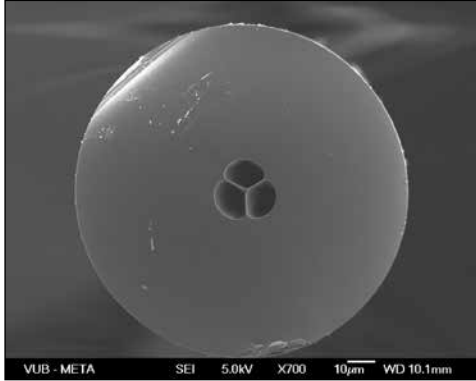


Fig. 1 SEM micrograph showing a cross section of SC PCF

Whereas plasmonic metal particles serve to allow SERS via chemical and electromagnetic enhancements, their very presence also induces attenuation by absorption of guided light and of the Raman signal. The nanoparticle coverage density and fiber length play an important role in the competitive interplay between accumulative Raman signal gain and attenuation loss. Our experiments performed on the SERS-active PCFs indicated a very low tolerance of nanoparticle coverage, on the order of a single particle/ $\mu\text{m}^2$  or less, in order to realize accumulative Raman gain with increased fiber length. We have recently demonstrated the utility of an unclad, multi-mode single crystal sapphire fiber for evanescent-field SERS sensing [2]. Colloidal Ag NPs were immobilized on the fiber. We have found that the multi-mode fiber platform can tolerate a particle coverage density two orders of magnitude higher than its single-mode PCF counterpart, while still exhibiting continued Raman accumulation over fiber length. The sapphire fiber with immobilized Ag NPs at a high coverage density of 120 particles/ $\mu\text{m}^2$  offered SERS sensitivity at  $10^{-8}$  M R6G [2]. To provide insights into the interplay between Raman gain and attenuation loss in the two contrasting types of SERS-active optical fibers we used the simulation approach given in the next paragraph.

## 2. THE SIMULATION MODEL

We have proposed the numerical-analytical model for the output Raman Intensity,  $RI$ , as a function of the NP coverage density,  $CD$ , and NP coverage length,  $L$  [2]:

$$RI \sim \eta_{\text{exc}} \left[ \frac{1 - \exp(\alpha_{\text{exc}} L)}{\alpha_{\text{exc}} L} \right] \times CD W L \times \eta_{\text{det}} \left[ \frac{1 - \exp(-\alpha_{\text{det}} L)}{\alpha_{\text{det}} L} \right], \quad (1)$$

where  $\eta_{\text{exc}}$  and  $\eta_{\text{det}}$  are the modal fractional power overlaps over the effective layer,  $\alpha_{\text{exc}}$  and  $\alpha_{\text{det}}$  are the modal attenuation coefficients, calculated for a given fiber mode at the excitation and detection wavelengths  $\lambda_{\text{exc}}$  and  $\lambda_{\text{det}}$ , respectively. In Eq. 1 the output Raman intensity is expressed as proportional to the product of the average excitation intensity (the left term), the total number of NPs (the center term) and the average SERS signal decay (the right term),  $W$  is the effective NP coverage width for SC PCF and equal to  $2\pi R$  for the sapphire fiber with a radius of  $R$ . Supposing an axial homogeneity of NP coverage density, we averaged the power decay of the propagating fiber mode due to the absorption in NPs by integrating over the fiber NP coverage length. Evanescent coupling and recoupling efficiencies were introduced through the modal fractional overlaps. The modal imaginary effective indexes

and evanescent overlaps were calculated using the Finite Element Method (FEM). The attenuation coefficient is related to the imaginary effective index by  $\alpha = (4\pi/\lambda)\text{Im}[n_{\text{eff}}]$ .

To calculate the attenuation loss from the evanescent interaction of modes with Ag NPs immobilized on the walls of the cladding holes filled with water, we introduce an effective layer of a composite material. The effective permittivity  $\epsilon_{\text{eff}}(\lambda)$  of the composite materials with spherical metal inclusions having the filling factor  $f$  (volume of the silver inclusions per unit volume of the composite material  $f = V_{\text{Ag}} / V_{\text{total}}$ ) is given by the expression

$$\epsilon_{\text{eff}}(\lambda) = \epsilon_n(\lambda) \frac{(\epsilon_i(\lambda) + 2\epsilon_h(\lambda)) + 2f(\epsilon_i(\lambda) - \epsilon_h(\lambda))}{(\epsilon_i(\lambda) + 2\epsilon_h(\lambda)) - f(\epsilon_i(\lambda) - \epsilon_h(\lambda))}, \quad (2)$$

where  $\epsilon_i(\lambda)$  and  $\epsilon_h(\lambda)$  are the complex electric permittivities of the metal (silver) and the dielectric host (water), respectively.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

For the FEM simulation the thickness of the effective layer was set to 35 nm corresponding to an average diameter of Ag NPs. The power flow distribution of the fundamental mode in the SC PCF with the effective layer at an excitation wavelength of 632.8 nm is shown in Fig. 2. From the fundamental mode field distribution over the SC-PCF cross-section it is obvious that in each air-hole an evanescent field effectively overlaps with about a  $1 \mu\text{m}$  wide longitudinal strip area on the air-hole wall. Therefore  $W$  in Eq. 1 was set to  $3 \mu\text{m}$  ( $W$  may also be used as a fitting parameter).

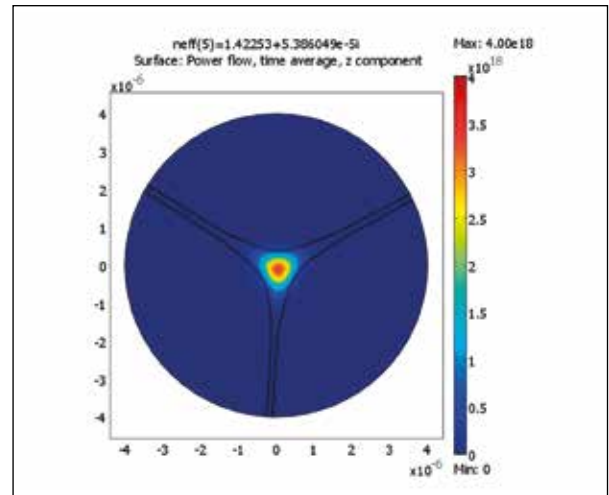


Fig. 2 Fundamental mode field distribution in the suspended-core fiber

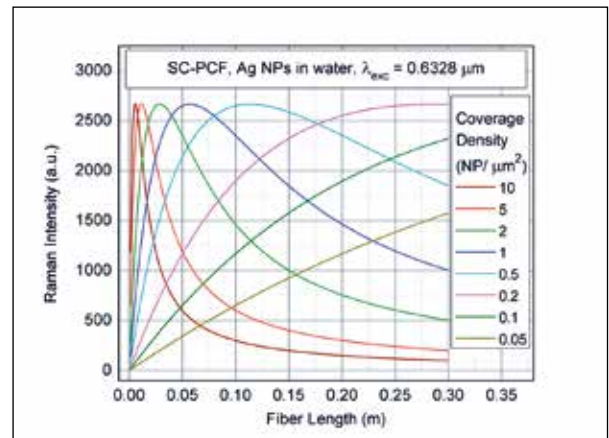


Fig. 3 Simulated Raman intensity as a function of nanoparticle coverage density and covered fiber length detected at the output of SC PCF

Illustrated in *Fig. 3* is the simulated dependence of Raman intensity on nanoparticle coverage density and fiber length detected at a Raman shifted wavelength of 699.7 nm. The shapes of the Raman intensity curves indicate a far higher tolerance of particle coverage length exhibited from the lower particle coverage. Note that the limitation of the nanoparticle density coverage to low values is determined by a strong evanescent overlap in a SC PCF. The fractional power overlap of the fundamental mode with the effective layer was calculated to be 0.021 at the excitation wavelength of 632.8 nm which results in high attenuation due to strong absorption in nanoparticles. *Tab. 1* shows that the modal attenuation coefficient achieves high values even for only a few NPs per  $\mu\text{m}^2$ .

Table 1

CD [ $\text{Np}/\mu\text{m}^2$ ]	$\alpha$ [dB/m]
0.05	5.84
0.2	23.4
2	235

Though the simulation model was initially developed for spherical Ag nanoparticles this modelling approach yielded a good quantitative agreement also with the experiments on the nanotags immobilized in SC PCF [3]. The nanotags are Ag-core-Au shell nanostructures that serve both as an intensity reference via label molecules entrapped inside the metal nanostructure and as SERS-active sites for analyte detection.

In terms of evanescent overlaps and tolerable NP coverage densities, an unclad sapphire fiber [3] and suspended-core PCF are contrasting types of SERS-active optical fibers. Using the experimental parameters [2] as input, we simulated the on-axis excitation of a 100  $\mu\text{m}$  diameter, unclad sapphire fiber with Gaussian beam focused on a waist diameter of 2  $\mu\text{m}$  at a wavelength of 532 nm employing the Beam Propagation Method [4]. The simulation showed that the on-axis-focused Gaussian beam excites the higher order azimuthally symmetric  $\text{LP}_{0,n}$  modes with  $\text{LP}_{0,18}$  as the highest excited mode. The calculated RI curves as a function of the coverage length are plotted in *Fig. 4* for a wide range of  $\text{LP}_{0,n}$  modes. The shapes of the RI curves indicate a higher tolerance of particle coverage length exhibited from the lower order of  $\text{LP}_{0,n}$ .

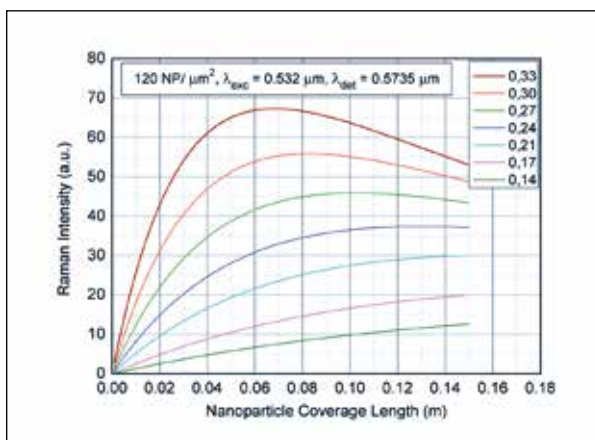


Fig. 4 Calculated dependence of Raman intensity for a range of  $\text{LP}_{0,n}$  modes on sapphire fiber length with immobilized Ag NPs at a coverage density of 120 particles/ $\mu\text{m}^2$

Raman gain prevails at lower order of  $\text{LP}_{0,n}$  over longer coverage lengths when the attenuation is still low, whereas higher order  $\text{LP}_{0,n}$  provides higher Raman gain for short coverage lengths, and the loss overwhelms the Raman gain when the modes propagate over longer coverage length.

The calculated evanescent and attenuation coefficient of selected  $\text{LP}_{0,n}$  modes are summarized in *Tab. 2* [2]. Although the resultant evanescent overlaps are rather low, Raman signal is quite sufficient because of the large number of NPs involved in a case of dense coverage. Moreover, higher order of  $\text{LP}_{0,n}$  modes exhibits the stronger modal fractional overlap, still accompanied by increasing attenuation coefficients, as shown in *Tab. 2*.

Table 2

$\text{LP}_{0,n}$	$\eta_{\text{exc}}$	$\eta_{\text{det}}$	$\alpha_{\text{exc}}$ [dB/m]	$\alpha_{\text{det}}$ [dB/m]
$\text{LP}_{0,33}$	2.79e-5	2.93e-5	102.6	60.6
$\text{LP}_{0,24}$	1.52e-5	1.58e-5	54.2	31.8
$\text{LP}_{0,17}$	8.32e-6	8.56e-6	27.48	15.94

#### 4. CONCLUSION

The numerical-analytical model was developed to investigate the dependence of Raman intensity detected at the output of SERS-active fiber on the metal nanoparticle coverage density and nanoparticle coverage length. The predicted Raman intensity curves agree with the experimental results [1–3] for the two contrasting types of SERS-active fibers. The numerical-analytical model yielded insights into the fiber modes involved in the evanescent-field interaction, as well as the interplay between the Raman gain and attenuation loss of the fiber modes in the presence of silver nanoparticles.

*This work was supported by the Ministry of Education, Youth and Sport of the Czech Republic under grant no. LH 11038 within the U.S.-Czech S&T Cooperation Agreement.*

#### References

- [1] M. K. Khaing Oo, Y. Han, J. Kanka, S. Sukhishvili, H. Du: **Structure fits the purpose: photonic crystal fibers for evanescent-field surface-enhanced Raman spectroscopy.** *Opt. Lett.* **35/4** (2010) 1–4.
- [2] H. Chen F. Tian J. Chi, J. Kanka, H. Du: **Advantage of multi-mode sapphire optical fiber for evanescent-field SERS sensing.** *Opt. Lett.* **39/4-6** (2014) 5822–5.
- [3] P. Pinkhasova, H. Chen, J. Kanka, P. Mergo, H. Du: **Nanotag-enabled photonic crystal fiber as quantitative surface-enhanced Raman scattering optofluidic platform.** *Appl. Phys. Lett.* **106** (2015) 071106; doi: 10.1063/1.4913246.
- [4] H. Chen, F. Tian, J. Kanka, H. Du: **A scalable pathway to nanostructured sapphire optical fiber for evanescent-field sensing and beyond.** *Appl. Phys. Lett.* **106** (2015) 111102; doi: 10.1063/1.4915325.

# Generation of mid-infrared radiation in nonlinear crystals using fiber lasers

*We have developed a narrow-band CW mid-IR generator based on the difference frequency generation (DFG) in periodically poled (PP) KTA and KTP crystals. The crystals are used to mix the beams from high-power fiber laser systems working at 1060 nm and 1550 nm spectral bands. Tunability exceeding the range of 3100 nm – 3620 nm was achieved in a source based on a PPKTA crystal. A prototype of mid-IR generator was built in our institute.*

**Keywords:** fiber laser, difference frequency generation, periodically poled crystal

## 1. INTRODUCTION

It is widely accepted that the mid-infrared (mid-IR) region covers the spectral interval from 3  $\mu\text{m}$  to 8  $\mu\text{m}$ . This range is of particular interest for many applications, especially for spectroscopy of trace gases [1] and military guided missile technology. Fundamental vibration and rotational-vibrational absorption bands of many molecules [2] fall within the mid-IR wavelength range. That allows high-sensitive and selective detection of trace gases. Narrow-band tunable continuous-wave (CW) mid-IR sources are invaluable tool for this purpose. Currently available CW mid-IR laser sources include mainly quantum cascade lasers (QCL), erbium, holmium, and dysprosium-doped fluoride fibers [3], vibronic solid state lasers ( $\text{Cr}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  doped II-VI compounds like  $\text{Cr:ZnSe}$ ), lead salt diode lasers, optical parametric oscillators and difference frequency generation (DFG) sources [4, 5].

The DFG sources based on the quasi-phase matching technique generating in the mid-IR band by mixing fundamental signals from matured Yb- and Er-doped fiber lasers [6] are of special interest to our fiber lasers and non-linear optics research team headed by P. Honzátko. In our laboratory we deal with investigation of high power fiber lasers and their use for material processing, medicine and nonlinear optics. The main research interests are laser beam combining, generation and amplification of optical pulses, guiding the light and its interaction with materials. High laser beam power achievable with fiber lasers enables for study of nonlinear effects like DFG. This article presents the design of the DFG mid-IR laser sources using fiber lasers for high-resolution tunable laser absorption spectroscopy (TLAS). The laser allows more than 100  $\mu\text{W}$  CW power at a maximum within the range of 3100 nm – 3620 nm.

## 2. LASER SETUP

The laser setup is shown in Fig. 1. Periodically poled (PP) nonlinear crystal is used to mix the beams from high-power master-oscillator power-amplifier Yb-doped (YDFL) and Er-doped (EDFL) fiber laser systems working at 1060 nm and 1550 nm bands, respectively.

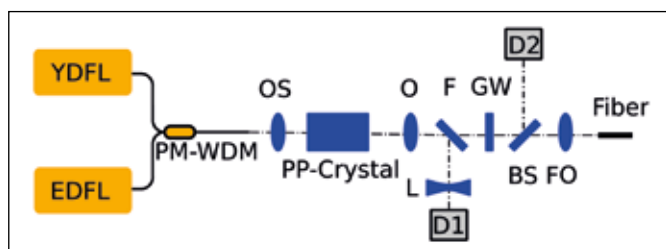


Fig. 1 Laser principal setup

The master-oscillators are built on polarization maintaining (PM) components and fibers in order to achieve high stability and well defined polarization. The active fibers of the master oscillators are pumped by laser diodes working at wavelengths of 976 nm and 980 nm, respectively. Each of the fiber lasers has a computer driven narrow band tunable filter which allows their tuning in spectral range of 1040 nm – 1089 nm and 1530 nm – 1590 nm, respectively. The fundamental wavelengths signals are amplified (Fig. 2) in high-power amplifiers based on double-clad fibers pumped by high power laser diodes by the means of pump signal combiners.

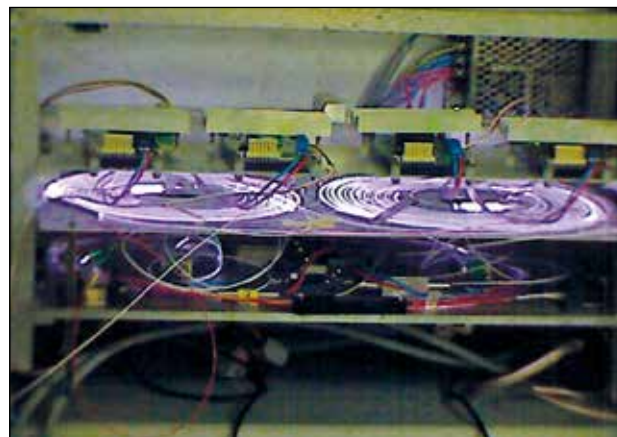


Fig. 2 Working fiber amplifiers

The pump is amplified in an ytterbium-doped double-clad fiber up to a power of 2 W, while the signal is amplified by a PM erbium-ytterbium-doped double-clad fiber up to a power of 0.5 W.

The pump and the signal are combined in a wavelength division multiplexer (PM-WDM). The vertically polarized light from the output of the multiplexer is focused on the face of the PP-crystal using an optical system (OS). The generation passes through an objective (O), and then dichroic filter (F) separates the propagated pump and signal radiation from the idler radiation. A concave lens (L) is used to prevent damage to a control detector (D1). A germanium window (GW) additionally blocks wavelengths shorter than 1.8  $\mu\text{m}$ . A beam splitter (BS) divides idler radiation into two beams. The first one goes to the detector (D2) used for reference and the second beam is directed to an output fiber end using a focusing optical system (FO).

### 3. PERIODICALLY POLED CRYSTALS

To obtain the DFG process in a PP nonlinear crystal, the law of photon energy conservation (1) and the phase matching condition (2) have to meet the following relations:

$$\frac{hc}{\lambda_p} = \frac{hc}{\lambda_s} + \frac{hc}{\lambda_i}, \quad (1)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_p} n_p - \frac{2\pi}{\lambda_s} n_s - \frac{2\pi}{\lambda_i} n_i = \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (2)$$

where  $\Lambda$  is the pattern period and  $\lambda_{p,s,i}$  and  $n_{p,s,i}$  are the wavelengths and the refractive indices of the pump, signal and idler, respectively. Quasi-phase-matching method used at our laboratory is suitable for any wavelength within the transparency region of the nonlinear material alongside the largest element of the tensor of nonlinear susceptibility.

The crystals titanyl phosphate (KTP) and potassium titanyl arsenate (KTA) have been periodically poled with the technology developed in our institute [7]. Quasi-phase matching requires a micrometer-scale periodic structure inside the ferroelectric material (Fig. 3).



Fig. 3 Image of periodic structure inside crystal

We use a photolithographic mask to provide the precise periodic domain size. Two crystals with the different photolithographic patterns are shown in Fig. 4.

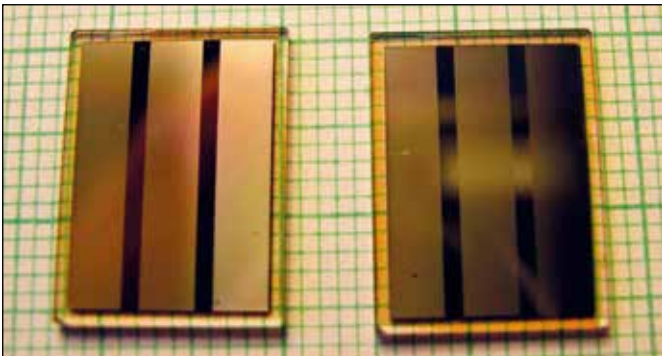


Fig. 4 Photolithographic masks on crystals

Domain reversal is achieved by the use of an external electric field. The polarity of the ferroelectric domain is changed from one stable configuration to the other under the influence of the applied field, which is called the coercive field. We currently fabricate 1 mm thick and 16.5 mm long device-quality PPKTP and PPKTA crystals. In the experiments we use PPKTP and PPKTA crystals with different periods from 35.4  $\mu\text{m}$  to 40.1  $\mu\text{m}$ . The crystals have an effective length of 15 mm and a thickness of 1 mm.

### 4. EXPERIMENTAL RESULTS

The theoretical output wavelength of the developed generator as a function of the pump and signal laser wavelengths is shown in Fig. 5.

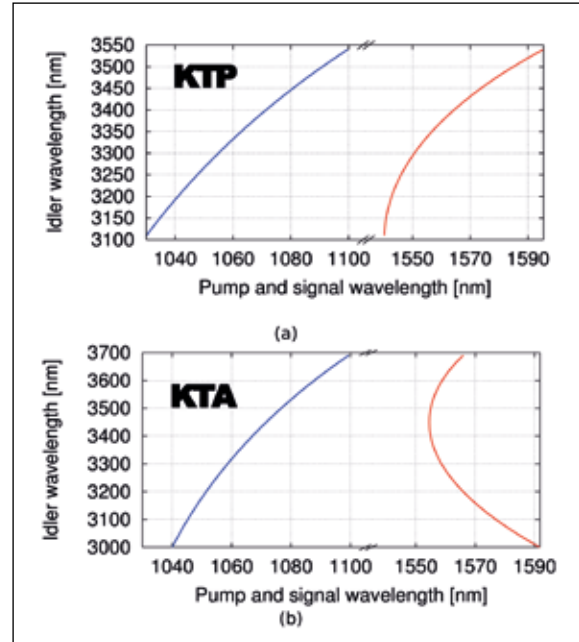


Fig. 5 Output wavelength as a function of pump and signal laser wavelengths for PPKTP crystal with a period  $\Lambda = 35.9 \mu\text{m}$  (a) and for PPKTA crystal with a period  $\Lambda = 38.9 \mu\text{m}$  (b)

It can be seen that during the tuning process the wavelengths of the ytterbium and erbium lasers should be tuned simultaneously in order to maintain the phase synchronism in the PP crystal. In the experiment we achieved tunability over the spectral range of 3225 nm – 3480 nm for the PPKTP crystal with pattern period of 35.9  $\mu\text{m}$ . The tuning law differs for the PPKTA crystal. The DFG generator based on a PPKTA crystal with a period of 39.8  $\mu\text{m}$  covered the spectral range of more than 3100 nm – 3620 nm.

### 5. CONCLUSION

We have designed a narrow-band CW mid-IR generator based on the DFG in a PPKTP and PPKTA crystals. Tunability exceeding the range of 3100 nm – 3620 nm was achieved in a source based on a PPKTA crystal. As a result of our laboratory experiments a prototype and control software were developed (Fig. 6).



Fig. 6 Prototype of mid-IR device

The designed device is useful for many applications, especially for high-resolution tunable laser absorption spectroscopy.

*The work presented in the paper was supported by the Technology Agency of the Czech Republic under Grant No. TA02010825 and by Ministry of Education, Youth and Sports under Grant No. LD14112 in the frame of the COST Action MP1204.*

## References

- [1] *I. T. Sorokina and K. L. Vodopyanov: Solid-State Mid-Infrared Laser Sources.* Springer, Berlin, Germany (2003).
- [2] *R.F. Curl and F.K. Tittel: Tunable infrared laser spectroscopy.* Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. **C98** (2002) 219–72.
- [3] *S.D. Jackson: Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser.* Nature Photonics **6** (2012) 423–31.
- [4] *K. Fradkin, A. Arie, A. Skliar, and G. Rosenman: Tunable midinfrared source by difference frequency generation in bulk periodically poled KTiOPO<sub>4</sub>.* Appl. Phys. Lett. **74** (1999) 914–16.
- [5] *K. Fradkin-Kashi, A. Arie, P. Urenski, and G. Rosenman: Mid-infrared difference-frequency generation in periodically poled KTiOAsO<sub>4</sub> and application to gas sensing.* Opt. Lett. **25** (2000) 743–5.
- [6] *J.H. Chang, Q.H. Mao, S.J. Feng, J. Jiang, X.L. Li, Y.Y. Tian, C.Q. Xu, and W.Q. Liu: Theoretical and experimental investigations of the Mid-IR DFG tuning property based on fiber laser fundamental lights.* Appl. Phys. **B104** (2011) 851–9.
- [7] *M. Thihonen, V. Pasiskevicius, A. Frageman, C. Canalis, and F. Laurel: Ultrabroad band in an optical parametric generator with periodically poled KTiOPO<sub>4</sub>.* Appl. Phys. **B85** (2006) 73–7.

Ing. Yauhen Baravets, e-mail: baravets@ufe.cz

Dr. Ing. Pavel Honzátko, e-mail: honzatko@ufe.cz

Ing. Filip Todorov, Ph.D., e-mail: todorov@ufe.cz

doc. Petar Gladkov, Ph.D., e-mail: gladkov@ufe.cz

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

*Jedná se o vědecký článek*

---

Jiří ČTYROKÝ, Institute of Photonics and Electronics CAS, Praha

# Theory and modeling of guided-wave photonic structures

*Numerical modeling is an indispensable part of theory and design of any guided-wave photonic structure and device. It helps not only save time and money by substituting expensive and time consuming trial and error fabrication and testing by numerical simulations, but – even more importantly – it significantly contributes to proper understanding of physics involved in the operation of the structures or devices under study. In the Institute of Photonics and Electronics, this discipline has been systematically developed for more than three decades. In this communication, after a few examples of the most important achievements, we present fundamentals of the 3-D Fourier modal method recently developed and describe some results of its application to subwavelength grating waveguide structures based on silicon on insulator platform.*

**Keywords:** integrated optics, optical waveguide theory, plasmonics, nanophotonics

## 1. INTRODUCTION

In guided-wave photonics, there are two fundamental classes of problems to be solved. The first one is to find guided modes in a waveguide structure and to analyze their properties, and the second one is to find the optical field distribution in the whole structure, having known the exciting optical field. Any of these tasks require numerical calculation due to the complexity of the problem. Dedicated software tools usually comprise two main categories: mode solvers, the role of which is to calculate field distributions and propagation constants of (guided) modes in a longitudinally uniform waveguides, and evolution algorithms (or beam propagation methods), enabling optical field distribution within the whole photonic structure, having known the excitation field (typically a waveguide mode).

Within years, we have developed several kinds of both these tools. The most important of them will be briefly mentioned in the next three sections. In the third one, selected results of their

application to a special kind of advanced photonic structures – the subwavelength waveguide components – will be presented. Finally, perspectives of further possible development of this field are very briefly outlined.

## 2. EIGENMODES AND MODE SOLVERS

In the beginning of our research into integrated photonics, in agreement with the then fabrication possibilities, our attention was concentrated on graded-index (diffused) planar waveguides. After the development of approximate mode solvers based on the WKB approximation as well as „rigorous“ 1-D mode solvers based on the method of transverse impedance [1], we performed a thorough analysis of dispersion properties of propagating eigenmodes of anisotropic planar Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguides [2, 3]. Detailed knowledge of dispersion properties of these waveguides is required for the design of many passive, acousto-optic, electro-optic and nonlinear



waveguide devices in  $\text{LiNbO}_3$  [4-6]. Our laboratory was also among the first ones where waveguide polarizers based on resonant excitation of surface plasmons were theoretically studied, designed, and fabricated [7, 8]. Experience gathered in this way was later utilized within European COST 240 Action [9] in which we were very deeply engaged [10]. Later, within the EU 5<sup>th</sup> FP project NAIS, we developed an original full-vector mode solver for circularly bent channel waveguides [11, 12] that was then used as a building block of a more general tool for modelling of circular ring microresonators coupled to straight bus waveguides [13].

Rather accidentally, we probably were – to our best knowledge – the first who made the detailed analysis of a photonic waveguide structure with a balance of loss and gain [9, 14]; such structures are presently known as photonic analogues of quantum mechanical structures with  $PT$  symmetry breaking [15–17] – a very hot topic in both physical and optical community.

### 3. FOURIER MODAL METHOD

Various versions of beam propagation methods were developed and mutually compared within COST 240 Action [9] in which we were very deeply engaged. One of the „modelling tasks“ of this Action, originally inspired by some optical sensor structure, concerned wave propagation in a waveguide with a very deeply etched high-contrast grating. It turned out to be a very hard problem that triggered further effort in the development of accurate bi-directional methods [18, 19].

Bi-directional mode expansion propagation method [20, 21] is, in principle, a very accurate and powerful simulation tool for a wide class of photonic structures, components and devices, especially those formed by concatenation of longitudinally uniform segments. However, rather large number of local eigenmodes is to be calculated in all such segments, which is an uneasy and time consuming task, especially for structures exhibiting losses of any kind. In Fourier modal methods (FMM), this problem is transformed into a standard linear algebraic matrix eigenvalue problem by expansion of optical (electromagnetic) field as well as the permittivity profile into Fourier harmonics. The “classical” FMM, originated from diffraction grating theory [22], makes use of complex exponentials as basis functions. Within last years, we have developed its slightly modified version based on sine and cosine functions; it can be also interpreted as expansion into eigenmodes of a rectangular metallic waveguide [23–26]. We carefully took into account the “proper” Fourier factorization [27–29]. Perfectly matched layers formulated in terms of a complex nonlinear coordinate transformation [30] were used as boundary conditions simulating an open space.

### 4. SUBWAVELENGTH GRATING WAVEGUIDES

Although FMM can be efficiently applied for modeling of a very wide class of photonic structures, only one type of them – subwavelength grating waveguide structures – will be considered here for brevity.

While (straight) conventional optical waveguides are longitudinally uniform, subwavelength grating (SWG) waveguides (Fig. 1)

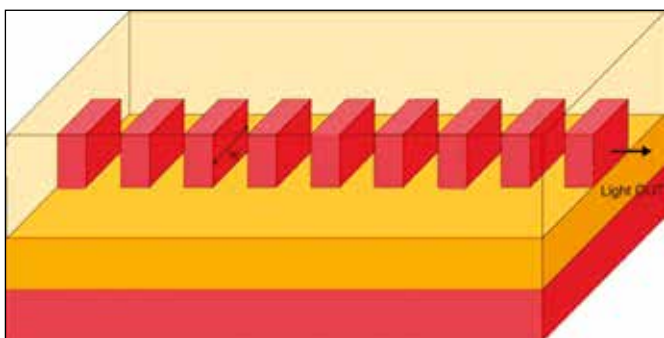


Fig. 1 Subwavelength grating waveguide

represent longitudinally periodic structures composed of segments of subwavelength size with high refractive index (such as Si) embedded into material with lower refractive index (e.g.,  $\text{SiO}_2$ ). These structures, based mostly on silicon on insulator (SOI) platform, were pioneered by the research group of the National Research Council in Canada [31]. Although they can be naively considered as smooth waveguides with a “suitably averaged” refractive index, in fact, they support propagation of Bloch modes, whose dispersion properties are rather different from those of conventional uniform waveguides. Because of their piecewise uniform structure, light propagation in SWG waveguide structures can be very efficiently modeled with Fourier modal methods.

As the first example we present here results of numerical modeling of a SWG mode transformer for telecom band [32], the schematic view of which is shown in Fig. 2.

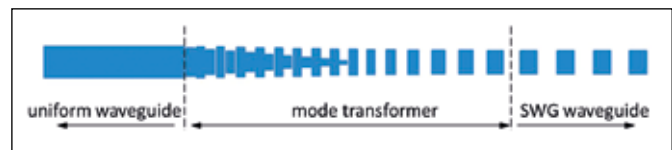


Fig. 2 Mode transformer for SWG waveguides

The role of this photonic component is to ensure spectrally broadband adiabatic transformation of a conventional mode of a uniform dielectric waveguide (at the left side) into a Bloch mode of the SWG waveguide (at the right side) with minimum power loss. According to its original design [32], it consists of two sections – “bridged” (the left part with mutually connected segments) and “unbridged” (the right part of free-standing segments). In the “bridged” section, the widths of the “bridges” are linearly tapered from 450 nm at the input to zero, the widths of the wider segments are only slightly linearly decreased to 416 nm, but the period (200 nm) is kept constant. In the “unbridged” section, the widths of the segments are further slowly linearly decreased to 350 nm at the end while their lengths as well as their separations are linearly slowly increased to 200 nm, to match the 400 nm period of the SWG waveguide. The real transformer consists of 225 segments and its total length is 50  $\mu\text{m}$ . Even if its transversal cross-section is small (the Si thickness was 260 nm), 3-D modeling of such a structure using standard discretization modeling methods is very computationally intensive. Therefore, in cooperation with *P. Cheben* from NRC in Canada we tried to simulate the behavior of the mode transformer using our 3-D FMM [26]. Even if we used only moderate number of terms ( $40 \times 60$ ) in the Fourier expansion to keep the computational effort acceptably low, the results are very consistent. As it is apparent from Fig. 3 (curves with full dots marked as “Long”), the calculated modal transmittance (power transfer

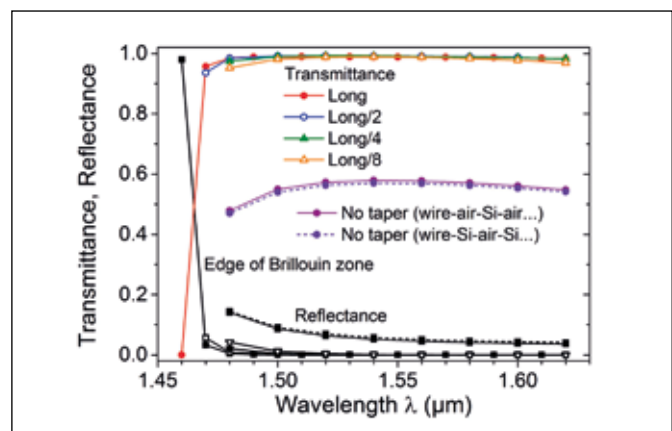


Fig. 3 Spectral dependence of modal transmittances and reflectances of mode transformers of different lengths

from the single-mode smooth Si nanowire to the Bloch mode of the SWG waveguide) is very high – about 0.99 in a rather broad wavelength range between 1470 nm and 1620 nm. Correspondingly, the reflectance in this band is very low, typically below  $10^{-3}$ .

For wavelengths shorter than 1470 nm, the transmittance rapidly falls down effectively to zero and the reflectance jumps up, close to 1.0. This behavior should be expected, since at this wavelength, the long-wave bandgap edge of the SWG waveguide (or equivalently, the Brillouin zone edge) is reached. Just for comparison, we also calculated the transmittance and reflectance of a butt-joint between the uniform Si nanowire waveguide and the SWG waveguide without any mode transformer (curves marked as “No taper”). In this case, the transmittance is reduced to less than 0.6.

Encouraged with these results, we calculated the parameters of the transformers with the total length reduced to one half, one quarter, and even one eighth of the original one, i.e., to 25  $\mu\text{m}$ , 12.5  $\mu\text{m}$  and 6.25  $\mu\text{m}$ , respectively, scaling the linear tapering correspondingly. The results are plotted in Fig. 3, too. Apparently, the results are not changed much. A more detailed inspection shows – in accordance with expectations – that the reduction of the transformer length results primarily in some reduction of the spectral bandwidth.

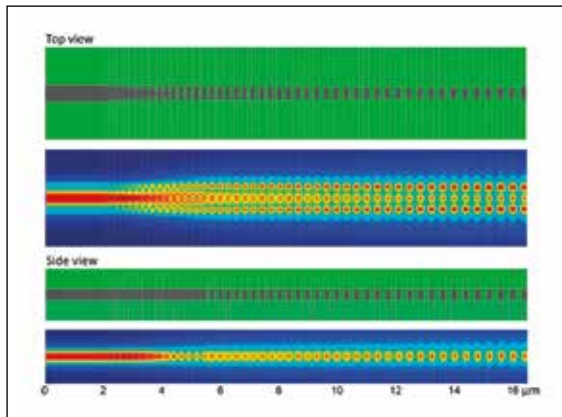


Fig. 4 Waveguide structure and the distribution of the dominant electric field component of the quasi-TE mode

In order to better understand the transformation of the waveguide mode into the Bloch mode, the distribution of the dominant electric field component of the (quasi-)TE mode is plotted in Fig. 4 from both the top and side views; the corresponding views on the waveguide structure are marked green.

As another example, we bring preliminary results of our 3-D simulation of a broadband  $2 \times 2$  multimode interference (MMI) coupler [33] – an important component of modern photonic communication systems utilizing advanced modulation formats. This work is running in close collaboration with the main authors of the original proposal – *P. Cheben* from NRC Canada and *R. Halir* and *A. Ortega Moñux* from the University of Malaga. Apparent contradiction between “broadband” and “interference” is solved there by clever utilization of the dispersion of the central multimode SWG waveguide. The schematic view of the device is shown in Fig. 5.

We tried to re-design the MMI device using our 3-D FMM tool. In Fig. 6 we present first results of numerical modeling of spectral dependences of the most important technical parameters of the device; note that the device has not been fully optimized yet.

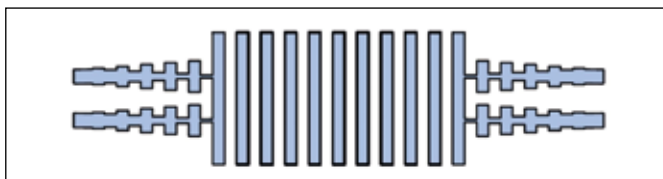


Fig. 5 Broadband SWG MMI coupler

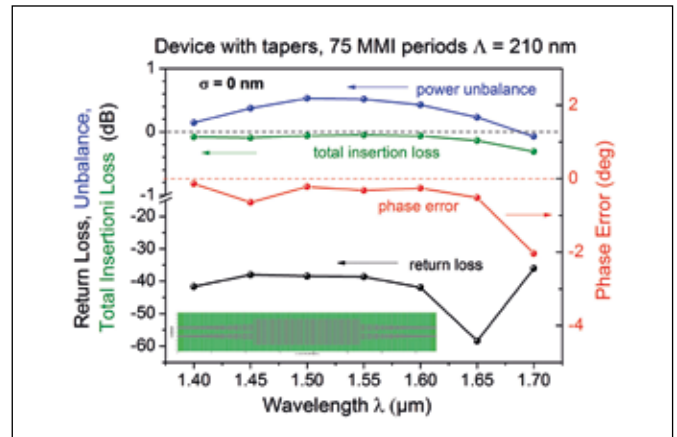


Fig. 6 Spectral dependences of technical parameters of the broadband SWG MMI coupler

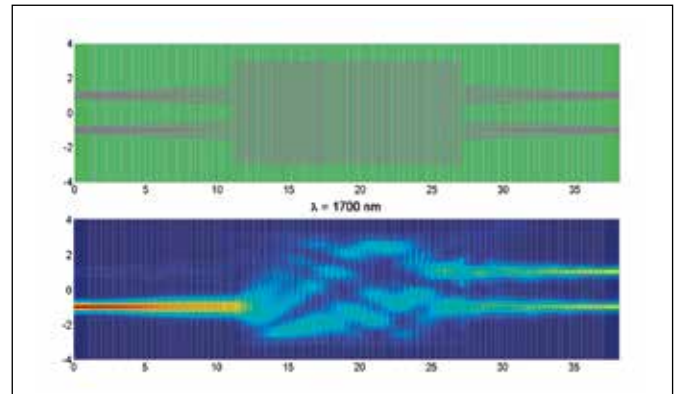


Fig. 7 Waveguide structure and optical field distribution of the complete SWG MMI coupler

The complete SWG waveguide structure and the optical field distribution in the coupler at the wavelength of 1.7  $\mu\text{m}$  is depicted in Fig. 7.

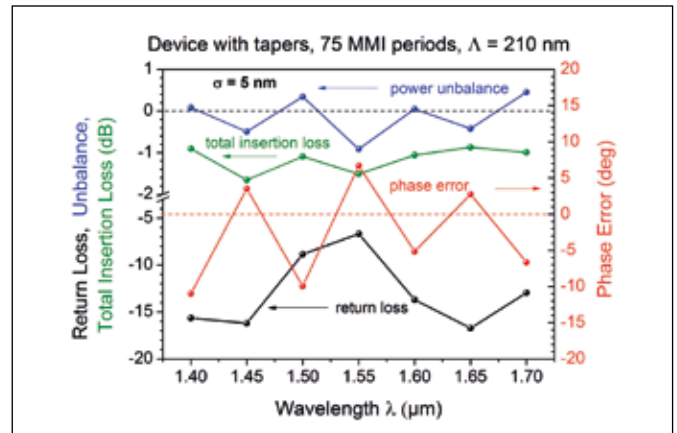


Fig. 8 Parameters of the SWG MMI coupler with random fluctuations and positions of the segments in the MMI section. Standard deviation  $\sigma = 5$  nm.

For SWG waveguide structures, even rather small random deviations from exact periodicity due to fabrication imperfections might affect the device performance. An example of such influence is clearly demonstrated in Fig. 8. These values were calculated for the SWG MMI coupler in which the segments in the central MMI section were subject to normal random fluctuations in width and position, with the standard deviation as small as  $\sigma = 5$  nm. Especially marked increase of return loss and phase error between the two output ports is apparent.

## 5. CONCLUSION

Some general and flexible methods for numerical modeling of various waveguide photonic structures, developed in the Institute of Photonics and Electronics, were very briefly reviewed. Applications of one of them – the 3-D Fourier Modal Method – were demonstrated on two technically important structures – the SWG mode transformer, and the broadband SWG MMI 2×2 coupler. Modeling of a number of other structures like plasmonic waveguide devices and surface plasmon sensing structures, or nonlinear waveguide photonic structures, could not be mentioned here due to space limitation.

## References

- [1] *J. Janta and J. Čtyroký: On the Accuracy of WKB Analysis of TE and TM Modes in Planar Graded-Index Waveguides.* Opt. Comm. **25/1** (1978) 49–52.
- [2] *M. Čada, J. Čtyroký, I. Gregora, J. Schröfel: WKB analysis of guided and semileaky modes in graded index anisotropic optical waveguides.* Opt. Comm. **28/1** (1979) 59–63.
- [3] *J. Čtyroký, M. Čada: Generalized WKB method for the analysis of light propagation in inhomogeneous anisotropic optical waveguides.* IEEE J Quantum Electron. **QE-17** (1981) 1064–70.
- [4] *J. Čtyroký, M. Hofman, J. Janta, and J. Schröfel: 3-D analysis of LiNbO<sub>3</sub>:Ti channel waveguides and directional couplers.* IEEE J. Quantum Electron. **QE-20** (1984) 400–9.
- [5] *D. M. Petrov and J. Čtyroký: Optimum parameters of single-mode waveguides in LiNbO<sub>3</sub> for collinear acoustooptic interaction.* Soviet J. Quant. Electron. **12** (1985), 104–7.
- [6] *J. Čtyroký: Guided wave electrooptic X type switches: symmetry, switching characteristics and cross talk.* J. Mod. Opt. (1988) 1007–15.
- [7] *J. Čtyroký, J. Janta, and J. Schröfel: Thin film polarizer for optical waveguides.* In 10<sup>th</sup> European Conf. on Optical Communication ECOC'84, Stuttgart, Germany (1984) 44–5.
- [8] *J. Čtyroký, H. J. Henning: Thin film polarizer for Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguides at 1.3 μm.* Electron. Lett. **22** (1986) 756–7.
- [9] *G. Guekos, Ed.: Photonic Devices for telecommunications: how to model and measure.* Berlin: Springer (1998).
- [10] *H. Hoekstra, P. V. Lambeck, G. J. M. Krijnen, J. Čtyroký, M. De Minicis, C. Sabilia, et al.: A COST 240 benchmark test for beam propagation methods applied to an electro-optical modulator based on surface plasmons.* J. of Lightw. Technol. **16** (1988) 1921–7.
- [11] *L. Prkna, M. Hubalek, J. Čtyroký: Vectorial eigenmode solver for bent waveguides based on mode matching.* IEEE Phot. Technol. Lett. **16** (2004) 2057–9.
- [12] *L. Prkna, M. Hubalek, J. Čtyroký: Field modeling of circular microresonators by film mode matching.* IEEE J. Sel. Topics in Quantum. Electron. **11/1-2** (2005) 217–23.
- [13] *R. Stoffer, K. R. Hiremath, M. Hammer, L. Prkna, J. Čtyroký: Cylindrical integrated optical microresonators: Modeling by 3-D vectorial coupled mode theory.* Opt. Comm **256/12** (2005) 46–67.
- [14] *H.-P. Nolting, G. Sztэфka, M. Grawert, J. Čtyroký: Wave Propagation in a Waveguide with a Balance of Gain and Loss.* In Integrated Photonics Research '96, Boston, USA (1996) 76–9.
- [15] *R. El-Ganainy, K. G. Makris, D. N. Christodoulides, Z. H. Musslimani: Theory of coupled optical PT-symmetric structures.* Opt. Lett. **32** (2007) 2632–4.
- [16] *J. Čtyroký, V. Kuzmiak, and S. Eyderman: Waveguide structures with antisymmetric gain/loss profile.* Opt. Express **18/10** (2010) 21585–93.
- [17] *J. Čtyroký: Dispersion properties of coupled waveguides with loss and gain: a full-vectorial analysis.* Opt. Quant. Electron. **46/3** (2014) 465–75.
- [18] *J. Čtyroký, S. Helfert, and R. Pregla: Analysis of a deep waveguide Bragg grating.* Opt. Quant. Electron. **30** (1998) 343–58.
- [19] *J. Čtyroký, S. Helfert, R. Pregla, P. Bienstman, R. Baets, R. De Ridder, et al.: Bragg waveguide grating as a 1D photonic band gap structure: COST 268 modelling task.* Opt. Quant. Electron. **34/5-6** (2002) 455–70.
- [20] *G. Sztэфka, H.-P. Nolting: Bidirectional eigenmode propagation for large refractive index steps.* IEEE Phot. Technol. Lett. **5** (1993) 554–7.
- [21] *P. Bienstman: <http://camfr.sourceforge.net/> (2006).*
- [22] *M. G. Moharam, T. K. Gaylord: Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction.* J. Opt. Soc. Am. **71** (1981) 811–8.
- [23] *J. Čtyroký: A simple bi-directional mode expansion propagation algorithm based on modes of a parallel-plate waveguide.* Opt. Quantum Electron. **38/1** (2006) 45–62.
- [24] *J. Čtyroký: Efficient Boundary Conditions for Bidirectional Propagation Algorithm Based on Fourier Series.* J. Lightw. Technol. **27/7** (2009) 2575–82.
- [25] *J. Čtyroký, P. Kwiecien, and I. Richter: Fourier Series-Based Bidirectional Propagation Algorithm with Adaptive Spatial Resolution.* J. Lightw. Technol. **28** (2010) 2969–76.
- [26] *J. Čtyroký: 3-D Bidirectional Propagation Algorithm Based on Fourier Series.* J. Lightw. Technol. **30/12** (2012) 3699–708.
- [27] *L. F. Li: Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures.* J. Opt. Soc. Am. **A13/9** (1996) 1870–6.
- [28] *P. Lalanne and G. M. Morris: Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization.* J. Opt. Soc. Am. **A13** (1996) 779–84.
- [29] *L. F. Li: New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings.* J. Opt. Soc. Am. **A14/10** (1997) 2758–67.
- [30] *J. P. Hugonin and P. Lalanne: Perfectly matched layers as nonlinear coordinate transforms: a generalized formalization.* J. Opt. Soc. Am. **A22** (2005) 1844–9.
- [31] *P. J. Bock, P. Cheben, J. H. Schmid, J. Lapointe, A. Delage, S. Janz, et al.: Subwavelength grating periodic structures in silicon-on-insulator: a new type of microphotonic waveguide.* Opt. Express **18/19** (2010) 20251–62.
- [32] *P. Cheben, P. J. Bock, J. H. Schmid, J. Lapointe, S. Janz, D.-X. Xu, et al.: Refractive index engineering with sub-wavelength gratings for efficient microphotonic couplers and planar waveguide multiplexers.* Opt. Lett. **35/8** (2010) 2526–8.
- [33] *A. Maese-Novo, R. Halir, S. Romero-Garcia, D. Perez-Galacho, L. Zavargo-Peche, A. Ortega-Moñux, et al.: Wavelength independent multimode interference coupler.* Opt. Express **21/3** (2013) 7033–40.

prof. Ing. Jiří Čtyroký, DrSc., e-mail: ctyroky@ufe.cz, Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 – Kobylisy

*Jedná se o vědecký článek*

# Nanoparticle-doped active optical fibers

*The paper presents selected activities of the Institute of Photonics and Electronics in the field of preparation of nanoparticle-doped active optical fibers. Nanoparticle-doped optical fibers were prepared by “in-situ” crystallization of dopants during the thermal processing of the fibers and by embedding the “off-line” generated nanoparticles into the core of the fibers. The background losses of the fibers prepared by the “off-line” method were significantly lowered. “Off-line” deposition of Tm-doped alumina nanoparticles extended the luminescence lifetime of 30 % up to 674 ms comparing with the fibers doped with “in-situ” formed nanoparticles. Selected erbium-doped fiber prepared by the “off-line” deposition was tested as the active medium in a fiber-ring laser.*

**Keywords:** nanoparticles, optical fiber, luminescence, fiber-laser

## 1. INTRODUCTION

During fifty years, which have passed from the realization of the first fiber laser, the fiber lasers and amplifiers have expanded from research laboratories to daily life. They have been established as an inherent part of sophisticated devices which are used in data networks as a part of full optical data processing systems, time metrology, machining etc. [1]. Beside the telecommunications they are widely used in mechanical engineering and industrial processes [2]. Nowadays, they have found their place in medicine as powerful tools for diagnostics and therapy [3].

Most of fiber-lasers are based on the luminescence properties of the rare earth elements (RE) embedded inside the core of the optical fiber. RE primarily determines the operation wavelength of the fiber laser. The power of the fiber laser strongly depends on the concentration of RE inside the core of the fiber. However, the solubility of RE inside a silica glass matrix is limited thus the intensity of the emitted light is low. The increasing concentration of RE inside the silica glass matrix leads to the formation of clusters which support non-radiative transitions thus the intensity of the emitted light may even drop down as is depicted in *fig. 1*. The solubility and the luminescence efficiency of RE can be improved by embedding of nanoparticles inside the silica glass matrix.

Laboratory of optical fibers, a part of the Institute of Photonics and Electronics (ÚFE), has more than 30 years' experience with the processing of optical fibers [4, 5]. Its research is focused to active optical fibers doped with rare earth elements for fiber laser,

nanoparticle-doped optical fibers, capillary fibers and special optical fibers for optical sensors etc. The ÚFE has been a world pioneer in the research of nanoparticle-doped active optical fibers [6]. High scientific level of the laboratory confirms the amount of worldwide co-operations with prestigious research institutions, which deals with fiber-optic technology, such as Optoelectronics Research Centre of the University of Southampton (UK), the Laboratory of condensed matter physics – a joint research unit of University of Nice Sophia Antipolis and CNRS (France), Central Glass and Ceramic Research Institute (India), etc.

In this contribution we present selected activities of the ÚFE in the field of preparation of nanoparticle-doped active optical fibers. Two approaches resulting into formation of nanoparticles inside the fibers are demonstrated. First approach is based on the “in-situ” crystallization of dopants during the thermal processing of the fibers. The “off-line” generated nanoparticles are embedded into the core of the fibers in the second approach. The effects of particular approaches on the structural and optical properties of prepared fibers are demonstrated. Selected nanoparticle-doped fiber is tested in a fiber laser resonator.

## 2. PREPARATION OF NANOPARTICLE-DOPED OPTICAL FIBERS

The common technology of active optical fibers consists of four steps which are depicted in *fig. 2* [4]. At first, a porous silica frit is deposited into a substrate silica tube by a modified chemical vapor deposition (MCVD). Rare-earth elements, which act as active lasing medium in the material, are usually introduced by a solution doping method. Inorganic salt of rare earth element is dissolved in appropriate solvent and the prepared solution is soaked into the deposited silica frit. After a time, the solution is poured out; the preform is dried and thermally treated. The thermal treatment causes the sintering of the doped frit into a compact glassy layer. Such a cylindrical structure is processed at temperatures over 2000 °C. Because of the surface tension, the substrate tube collapses into itself forming compact glass rod with the doped core in the middle, so called preform. Finally, prepared preform is drawn into an optical fiber.

Despite new technologies, such as aerosol deposition, the solution-doping method is still attractive because of its simplicity and broad range of applicable materials, including nanoparticles. The nanoparticles in the fiber can be generated by two basic approaches. In the first approach the nanoparticles are formed

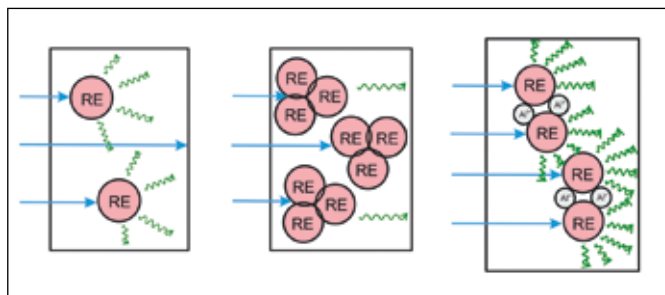


Fig. 1 A schematic image of the effect of clustering of RE ions on their luminescence properties. (a) Low concentration of RE ion and corresponding low luminescence intensity. (b) Increased concentration of RE ions results to the formation of clusters and luminescence quenching. (c) The presence of nanoparticles increases the concentration of RE ions and improves the luminescence properties

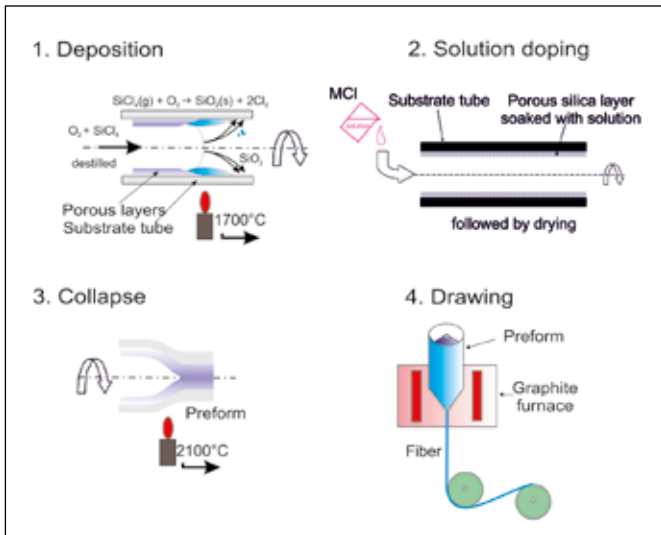


Fig. 2 Principles of fiber optic technology: (a) Deposition of porous silica frit, (b) solution-doping of dopants, (c) collapse into a preform, (d) drawing of a fiber

“in-situ” from the ions introduced by the solution-doping process. Thermally induced crystallization takes place during the processing of the fibers resulting into the formation of nanoparticles which are dispersed in an amorphous matrix [7], as is depicted in *fig. 3a*. The thermal process must be controlled carefully otherwise the formed nanoparticles grow up exceeding the nanoscale dimensions and form opaque, fully crystalline core, as is depicted in *fig. 3b*.

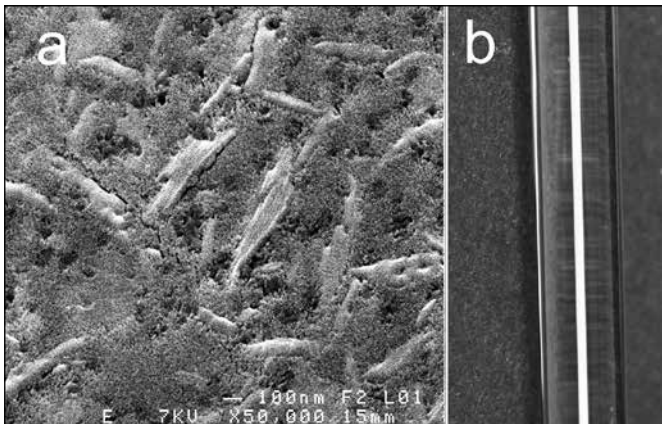


Fig. 3 Example of (a) formed nanocrystals of  $\text{Zn}_2\text{TiO}_4$  distributed in amorphous matrix and (b) fully crystallized core of a preform

In the second approach the nanoparticles are generated “off-line” [6]. Nanoparticles, prepared by chemical routes, are dispersed in the solvent and the dispersion is applied in the solution-doping step of the fiber technology. The advantage of the “off-line” process is a large number of commercially available nanoparticles which can be used. Moreover, a research of novel materials with improved luminescence properties has been realized in the ÚFE. The research is focused to pyrochlore structure of RE doped yttrium titanates with the general formula  $\text{RE}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ti}_2\text{O}_7$  which are thermally and chemically stable up to  $2800^\circ\text{C}$ . The yttrium ions in the matrix act as a spacer preventing the non-radiative energy transfers between RE ions. The variation of the RE element improves the luminescence efficiency.

Beside the increased luminescence intensity the concentration of RE in the matrix strongly affects the lifetime of the radiative transitions as is depicted in *fig. 4*. The size of prepared nanocrystals can be tailored from 20 nm up to 200 nm depending on the thermal processing [8].

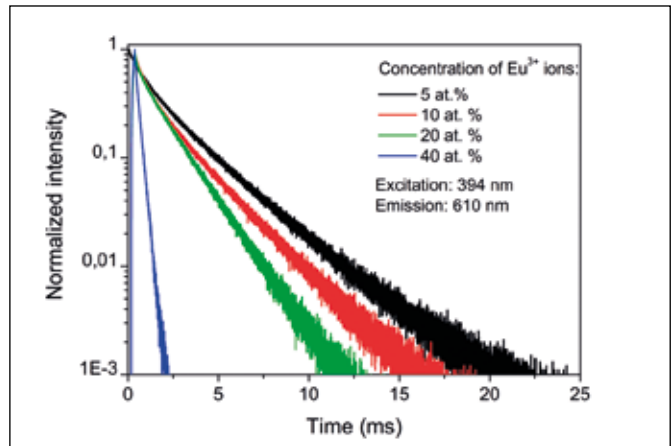


Fig. 4 Concentration effect of  $\text{Eu}^{3+}$  ions on the lifetime of nanocrystalline  $\text{Eu}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ti}_2\text{O}_7$

### 3. STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF NANOPARTICLE-DOPED FIBERS

The key differences between the “in-situ” formation of the nanoparticles and the deposition of “off-line” generated nanoparticles was demonstrated on the fibers doped with nanocrystalline erbium-doped yttrium-aluminium garnet (Er:YAG). Solutions of Er:YAG precursors and dispersion of Er:YAG nanoparticles smaller than 30 nm were prepared by the sol-gel method [9]. Prepared solutions were soaked into silica frits, thermally treated and processed into optical fibers. The “in-situ” approach allows increasing the concentration of dopants and consequently the refractive index of the preform core as is depicted in *fig. 5*.

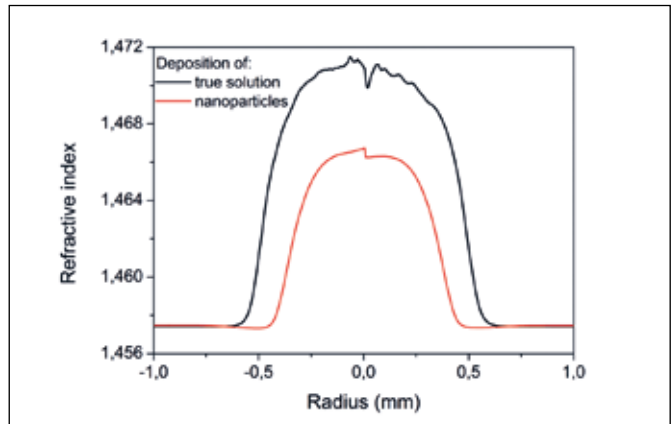


Fig. 5 Refractive index profile of preforms doped with Er:YAG

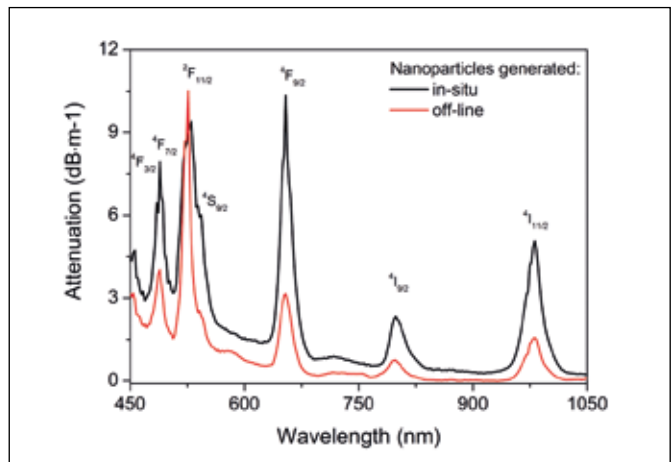


Fig. 6 Spectral attenuation of fibers doped with Er:YAG

Despite this advantage, the fiber prepared by the “in-situ” approach appeared higher background losses than the fibers containing “off-line” generated nanoparticles as is depicted in *fig. 6*.

The reason lies in the homogeneity of prepared preforms. Ions dissolved in solutions penetrate through the silica frit to the substrate tube and there they cause a cracking of the silica frit due to the concentration gradient. The micro cracks form the scattering centers and contributes to the background losses. The penetration of the nanoparticles into the silica frit is limited due to the finite size of frit pores. Therefore the cores of preforms doped with “off-line” generated nanoparticles appeared better uniformity and homogeneity as it is depicted in *fig. 7*. Similar effects had been observed for preforms doped by other materials, e.g., alumina nanoparticles [10]. Such knowledge is fundamental to successfully prepare the nanoparticle-doped optical fibers.

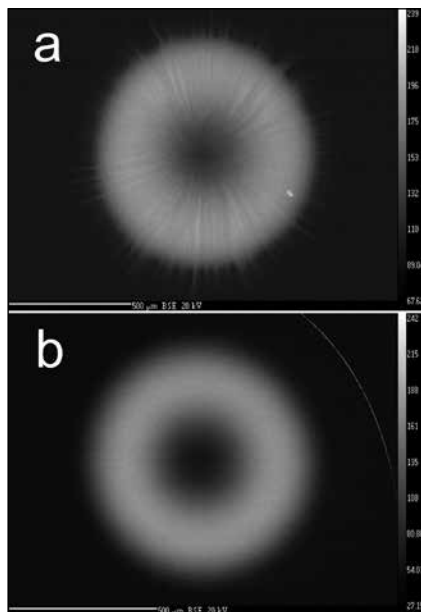


Fig. 7 Cross-sections of preform cores prepared by (a) “in-situ” approach, (b) “off-line” approach

Achieved technology has been successfully extended to other rare-earth elements. For example, the incorporation of “off-line” generated thulium-doped nanocrystalline alumina improved the luminescence properties of prepared fibers and extended the luminescence lifetime of 30 % up to 674 ms comparing with the fibers doped with “in-situ” generated nanocrystals [11] as it is depicted in *fig. 8*.

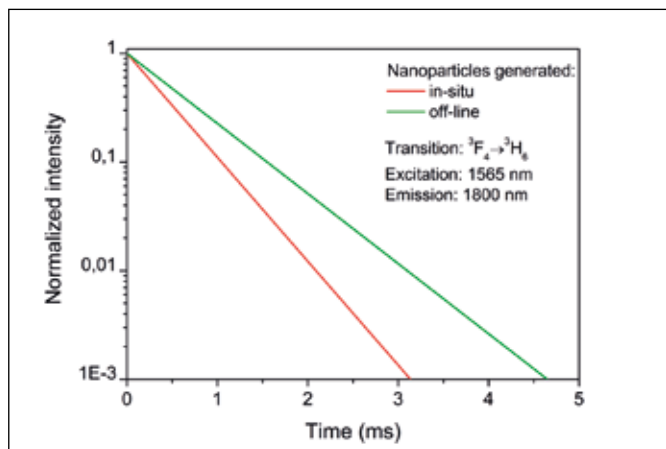


Fig. 8 Lifetime of optical fibers doped with Tm-alumina nanoparticles prepared by (a) “in-situ” approach, (b) “off-line” approach

#### 4. NANOPARTICLE-DOPED FIBER LASERS

Erbium-doped fibers are attractive for their applications in amplifiers for telecommunications around 1550 nm. Preform doped with “off-line” generated Er:YAG nanoparticles was successfully drawn into a step-index single-mode optical fiber with standard outer diameter 125 μm, core diameter 11 μm, numerical aperture 0.16. The concentration of Er<sup>3+</sup> ions in the fiber core was 0,02 at. %. The lifetime of the emission at 1525 nm was 10.2 ms. The fiber was successfully tested as an active medium in a fiber ring laser set-up.

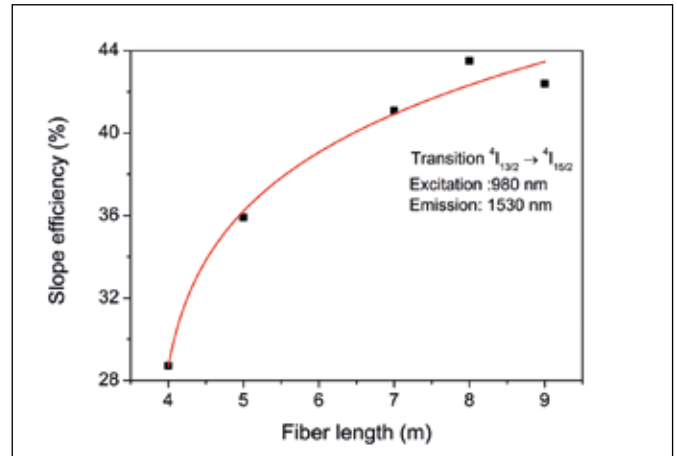


Fig. 9 The effect of the resonator length on the slope efficiency of fiber laser doped with Er: YAG nanoparticles

Slope efficiency  $\eta$  is a characteristic parameter of the laser which is defined as a slope of the ratio of output laser power ( $P^{\text{output}}$ ) over the power of the pumping laser ( $P^{\text{pump}}$ ) according to Eq. (1):

$$\eta = \frac{P^{\text{output}}}{P^{\text{pump}}} \quad (1)$$

Achieved slope efficiency, depicted in *fig. 9*, was better than 40 % and it reached the saturation for the fiber length 7 m.

#### 5. NANOPARTICLE-DOPED ACTIVE FIBERS FOR SENSORS

Beside the potential application as the fiber lasers the active optical fibers can be used as an active part of fiber-optic sensors. A novel type of optical fiber doped by radio-luminescent zinc-silicate nanoparticles was developed in the co-operation with the Institute of Physics CAS. The luminescence efficiency of developed material was close to the reference radioluminescence standard BGO [12] as is depicted in *fig. 10*.

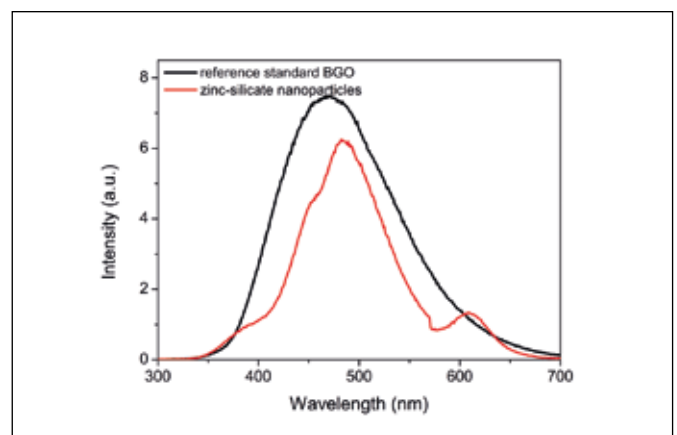


Fig. 10 Radioluminescence spectrum of preform doped with zinc-silicate nanoparticles

Such a fiber is able to convert an X-ray radiation and a deep UV radiation into a visible light. It can be used as a part of sensors monitoring a radiation to improve the safety of the high-energy radiation devices and to reduce the risk of accidents.

## 6. CONCLUSION

Selected activities of the IPE in the field of preparation of nanoparticle-doped active optical fibers were demonstrated. Nanoparticle-doped optical fibers were prepared by “in-situ” crystallization of dopants during the thermal processing of the fibers and by embedding the “off-line” generated nanoparticles into the core of the fibers. It was shown that the “off-line” nanoparticle deposition led to preforms with more homogeneous and more uniform core. As a result the background losses of the fibers prepared by the “off-line” method were significantly lowered. “Off-line” deposition of Tm-doped alumina nanoparticles extended the luminescence lifetime of 30 % up to 674 ms comparing with the fibers doped with “in-situ” formed nanoparticles. Selected erbium-doped fiber prepared by the “off-line” deposition was tested as the active medium in a fiber-ring laser. The slope efficiency of the laser was better than 40 %.

*The research was financially supported by the Academy of Sciences of the Czech Republic project number M100671202.*

## References

- [1] S. W. Harun, K. Dimyati, K. K. Jayapalan, H. Ahmad: **An overview on S-band erbium-doped fiber amplifiers**. Laser Phys. Lett. **4**/1 (2007) 10–15.
- [2] M. E. Fermann, I. Hartl: **Ultrafast Fiber Laser Technology**. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **15**/1 (2009) 191–206.
- [3] A. Tunnermann, J. Limpert, S. Nolte: **Ultrashort Pulse Fiber Lasers and Amplifiers**. Top. Appl. Phys. **96**/4 (2004) 35–53.
- [4] I. Kašík, V. Matějec, O. Podrazký, P. Peterka, and J. Mrázek: **New trends in preparation of preforms by the MCVD method** (In Czech). Jem. mech. opt. **55**/4 (2010) 102–4.
- [5] V. Matějec, O. Podrazký, J. Mrázek, P. Peterka, M. Hay-er: **Drawing of optical fibers at the Institute of Photonics and Electronics** (In Czech). Jem. mech. opt. **55**/4 (2010) 107–10.
- [6] O. Podrazký, I. Kašík, M. Pospíšilová, V. Matějec: **Use of alumina nanoparticles for preparation of erbium-doped fibers**. IEEE LEOS Proc. (2007) 246–247.
- [7] A. Dhar, I. Kašík, O. Podrazký, V. Matějec, B. Dussardier: **Preparation and Properties of Er-Doped ZrO<sub>2</sub> Nanocrystalline Phase-Separated Preforms of Optical Fibers by MCVD Process**. Int. J. Appl. Ceram. Tec. **9** (2012) 341–8.
- [8] J. Mrázek, M. Surýnek, S. Bakaradjieva, J. Buršík, I. Kašík: **Synthesis and crystallization mechanism of europium-titanate Eu<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>**. J. Cryst. Growth **391** (2014) 25–32.
- [9] D. Boyer, G. Bertrand-Chadeyron, R. Mahiou: **Structural and optical characterizations of YAG:Eu<sup>3+</sup> elaborated by the sol-gel process**. Opt. Mater. **26** (2004) 101–5.
- [10] J. Cajzl, O. Podrazký, J. Mrázek, J. Aubrecht, V. Matějec, P. Peterka, P. Nekvindová, I. Kašík: **The influence of nanostructured optical fiber core matrix on the optical properties of EDFA**. SPIE Proc. (2013) 877509, 1–6.
- [11] J. Cajzl, P. Peterka, P. Honzátko, J. Mrázek, O. Podrazký, F. Todorov, P. Gladkov, J. K. Sahu, M. Nunez-Velazquez, P. Nekvindová, I. Kašík: **Characterization of fluorescence lifetime of Tm-doped fibers with increased quantum conversion efficiency**. SPIE Proc. **9450** (2015) 945017, 1–8.
- [12] J. Mrázek, M. Nikl, I. Kašík, O. Podrazký, J. Aubrecht, A. Beitlerová: **Nanoparticle-doped radioluminescent silica optical fibers**. SPIE Proc. **228** (2014) 922805-1, 1–8

Ing. Jan Mrázek, Ph.D., e-mail: mrazek@ufe.cz

Ing. Ivan Kašík, Ph.D., e-mail: kasik@ufe.cz

Ing. Ondřej Podrazký, Ph.D., e-mail: podrazky@ufe.cz

Ing. Jan Aubrecht, Ph.D., e-mail: aubrecht@ufe.cz

Ing. Jakub Cajzl, e-mail: cajzl@ufe.cz

Mgr. Jana Proboštová, e-mail: probostova@ufe.cz

Ing. Pavel Peterka, Ph.D., e-mail: peterka@ufe.cz

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

*Jedná se o vědecký článek*

# Thulium-doped fibers and fiber-optic components for fiber lasers at around 2 $\mu\text{m}$

*Fiber lasers are the youngest and most rapidly developing branch of lasers. Golden era of fiber lasers started only in early 2000's and followed success of fiber amplifiers in telecommunications in nineties. Nowadays, the ytterbium fiber lasers at around 1  $\mu\text{m}$  are the most powerful lasers available, reaching 100 kW of average output power. The 2  $\mu\text{m}$  class fiber based on thulium-doped fibers are getting increasing importance thanks to better eye-safety, relaxed non-linear limits, more efficient processing of various materials, e.g., plastics, and high slope efficiency of up to 70 %. In the paper we review our recent progress in research of novel host materials for enhancements of fluorescence properties of thulium-doped fibers and new fiber-optic components and their applications in monolithic thulium-doped fiber laser. Results of coherent combination of thulium-doped fiber lasers are also presented.*

**Keywords:** fiber lasers, thulium, cladding pumping

## 1. INTRODUCTION

Thulium-doped fiber lasers operating at wavelengths around 2  $\mu\text{m}$  are rapidly developing a new class of coherent light sources with a high slope efficiency reaching 70 %. The 2  $\mu\text{m}$  radiation sources have many advantages over the 1- $\mu\text{m}$  sources, e.g., better eye-safety, relaxed non-linear limits and often more efficient material processing, e.g., plastics. Thulium-doped fiber lasers will find applications in material industry, medicine, environment monitoring, security and safety. Particularly important application of 2- $\mu\text{m}$  fiber lasers is in a highly-efficient generation of wideband mid-infrared radiation through third order nonlinear effects in soft-glass fibers.

In this paper we review recent progress in the research area of thulium-doped fiber lasers in the team of Fiber laser and nonlinear optics of the Institute of Photonics and Electronics (IPE). We are working in the domains of fiber fabrication and basic research of new materials; research of novel fiber-optic components and also novel types, configurations and regimes of thulium-doped fiber lasers. The paper about material research and fiber fabrication and application the fibers in broadband ASE (Amplified Spontaneous Emission) sources was recently published in this journal that is why we describe only one particular case of alumina nanoparticle- and thulium-doped fiber and its application in monolithic fiber laser. More details about fiber fabrication and characterization can be found in [1] and in an invited paper [2]. Then we review specific examples of fiber optic components, the WDM (Wavelength Division Multiplexer) and coherent combination of thulium fiber lasers.

## 2. THULIUM- AND ALUMINA-NANOPARTICLE- DOPED FIBERS AND THEIR APPLICATION IN MONOLITHIC FIBER LASER AT 1951 nm

The thulium-doped fiber devices suffer from relatively high nonradiative decays rates and reduced quantum conversion efficiency (~10 % for the 2  $\mu\text{m}$  laser transition) compared to almost 100 % efficiencies at 1.5- $\mu\text{m}$  erbium- and 1- $\mu\text{m}$  ytterbium-doped fiber devices. In cooperation with colleagues from the University of Nice we have developed a method of modification of local environment of thulium ions by high alumina co-doping and in such a way we increased thulium quantum conversion efficiency

[3]. Particularly high concentration of alumina we achieved by codoping with alumina nanoparticles of <50 nm size. The alumina content was 11.2 mol %. Codoping with germanium oxide was not applied. We measured fluorescence lifetime of 690  $\mu\text{s}$  of the  $^3\text{F}_4$  energy level of thulium, i.e., the upper laser level of the 2- $\mu\text{m}$  transition. It represents more than two-fold increase of the quantum conversion efficiency in regards to standard thulium-doped fibers with about 330- $\mu\text{s}$   $^3\text{F}_4$  fluorescence lifetime. The systematic error imposed by ASE was carefully eliminated in the fluorescence lifetime measurement [4]. We used the fiber in the experimental setup of the monolithic fiber laser [5]. The laser setup is shown in Fig. 1.

The fiber Bragg gratings (FBGs) were inscribed in into the Tm-doped fiber by using a Talbot interferometer and deep ultraviolet source at 266 nm (third-harmonics of Ti: sapphire femtosecond laser) in the Institute of Photonic Technology (IPHT) in Jena.

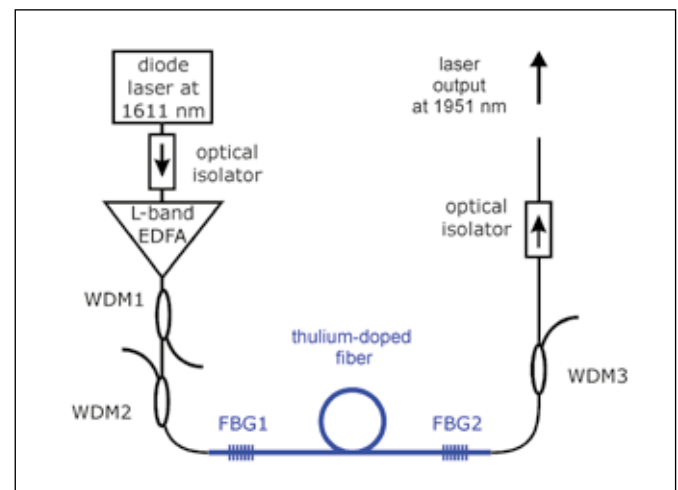


Fig. 1 Setup of the monolithic fiber laser with FBGs (fiber-Bragg gratings) inscribed directly into thulium-doped fiber with enhanced quantum conversion efficiency. EDFA: Er-doped fiber amplifier, WDM: wavelength-division multiplexer



Such monolithic setup offers simplicity as the laser was made of single fiber only and greater reliability as the fusion splices are avoided. The splice may eventually generate failure in the laser resonator. This experiment represents the first rare-earth-doped fiber laser with a FBG pair written by DUV femtosecond laser radiation.

### 3. INCREASED CLADDING ABSORPTION BY COILING AND TWISTING

We have developed numerical methods to describe pump absorption in the coiled double-clad fibers [6, 7]. For the first time, the modified refractive index profile method was applied to describe rigorously the cladding-absorption in bent fibers and we have found that for practical cases of fiber coils the bending effect cannot be neglected as in previous numerical studies. In preliminary studies of the case of ytterbium-doped fiber (pumped at 976 nm) we have found recently, that simultaneous coiling and twisting of the double-clad fiber with hexagonal shape of the inner cladding may lead to substantial increase of the pump absorption along the fiber [7]. The absorption is even higher than the ideal limit of pump absorption given by the doping parameters and ratio of the core and inner cladding areas, see Fig. 2.

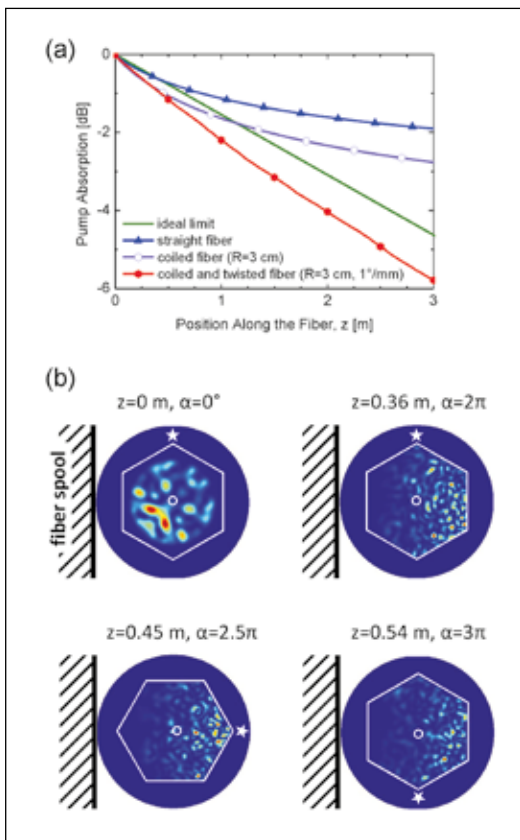


Fig. 2 (a) Numerical modelling of pump attenuation along rare-earth-doped fiber of hexagonal inner cladding for various coiling conditions. (b) Pump-field distribution at several positions along hexagonal fiber coiled on 3-cm radius spool and twisted with rate 1 deg/mm. One particular corner is labeled with a white star. The rotating corners of the hexagon smashes-up the pump field and leads to effective mode-scrambling and improved pump absorption

The advantageous effect of coiling and twisting for pump-absorption enhancement can be explained on this figure. The effective inner cladding area was decreased by the bending (compare the input field intensity profile in Fig. 2b and the speckle pattern shift towards the outer part of the spool in the other figures). If the fiber is not twisted, the effective inner cladding area is smaller than in the straight fiber but its shape is not changed and the mode scrambling

is rather limited. On the other hand, for simultaneously coiled and twisted fiber the rotating horns of the hexagon smashes-up the pump field and leads to effective mode-scrambling and improved pump absorption. Due to large area of the inner cladding and long length of fiber, the numerical modeling is highly time-consuming. Optimization of the proposed method of coiling and investigation of thulium-doped fibers we plan to do in the near future.

### 4. FIBER OPTIC COMPONENTS FOR ‘EYE-SAFE’ SPECTRAL REGION AROUND 2 MICROMETERS

In cooperation with an industrial partner, the company SQS Fiber Optics, we have developed several passive components intended for fiber lasers operated around 2 μm, for example fiber couplers and WDMs for combination of 1.6- and 2-μm radiation [8]. We have tested three types of commercially available fibers were used for the fabrication of the WDMs and we have discussed their advantages and drawbacks the characteristics of the prepared WDMs were compared. Two fibers were designed with for operation around 2 μm and low-bending losses, but their first higher order mode LP<sub>11</sub> cutoff was greater than 1600 nm. Therefore, the WDMs are prone to high insertion losses (up to 3 dB loss increase was observed) under various launching conditions. This loss increase cannot be completely avoided. The standard fibers eliminate the unpredictably insertion losses at 1.6 μm but they suffer from higher bent losses at 2 μm.

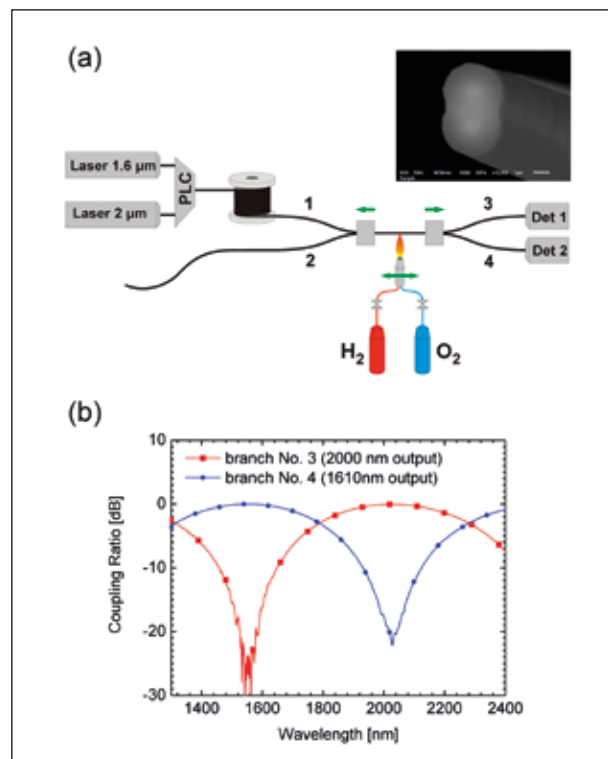


Fig. 3 (a) Setup of the rig for the fused-biconically-tapered fabrication of fiber components. PLC: Planar Lightwave Circuit; Det: detector. Scanning-electron-microscope image of the cross section near the waist position of the tapered region is shown in the top right figure. The waist dimensions are 3.7 μm × 5.5 μm. (b) The spectral transmission of the wavelength division multiplexers (WDM) for combination of the pump and the signal for thulium fiber lasers

We have proposed the fiber refractive profile with cutoff below 1560 nm, low splice losses and low-bending losses even at 2 μm. The manufacturing technology is based on the fused-biconically tapering method in hydrogen-oxygen-flame tapering rig, the setup of which is shown in Fig. 3. We reported a novel mode-field adapter for tapered fused-fiber-bundle pump and signal combiners that

are being used in high-power double-clad fiber lasers [9]. Such an adapter allows optimization of signal-mode-field matching on the input and output fibers. Correspondingly, losses of the combiner signal branch are significantly reduced.

## 5. COHERENT COMBINATION OF THULIUM FIBER LASERS

We have experimentally achieved 20 W at a wavelength of 2000 nm by coherent combination of a pair of thulium-doped fiber lasers [10]. The laser beam combination will allow increasing the radiance (brightness) of the laser systems beyond limits of simple lasers in the future. It is the first reported coherently combined thulium-doped fiber laser working at moderate powers. The laser setup and output power characteristics are shown in Fig. 4.

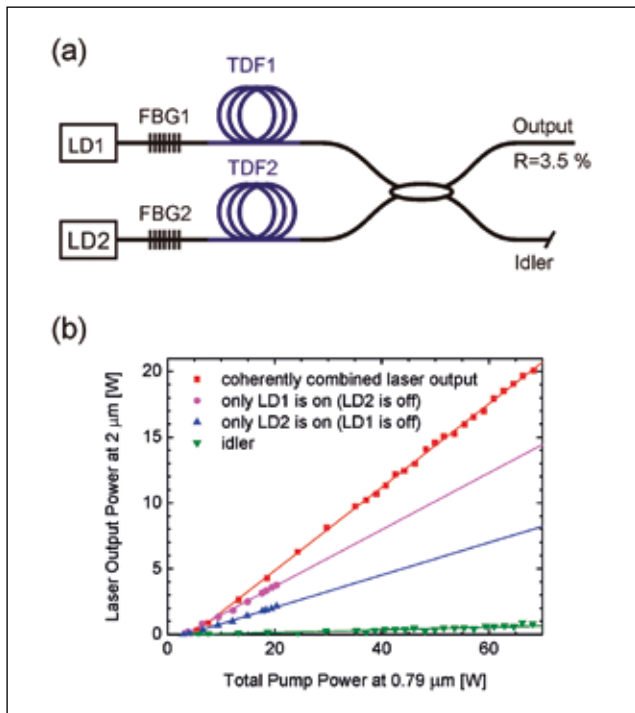


Fig. 4 (a) Laser system consisting of a pair of thulium-doped fibers TDF1 and TDF2 pumped by laser diodes LD1 and LD2. Resonator of the laser is formed by fiber Bragg gratings FBG1 and FBG2, respectively and reflection at the output port of directional fiber coupler. Idler port is angle polished to suppress the reflections. (b) Output power characteristics of the coherently combined output and the idler and of the output of the two fiber laser that oscillates independently of each other

The output of the two coherently combined signal fiber lasers was stable in the whole range of pump powers despite the fact, that the individual lasers were unstable before they were combined together via the polarization-maintaining fiber coupler. The self-pulsing instability accompanied with recently discovered spectacular self-sweeping of the laser wavelength we have reported in the case of the ytterbium-, erbium- and thulium-doped fiber lasers at around 1  $\mu\text{m}$ , and 1.5  $\mu\text{m}$ , and 2  $\mu\text{m}$ , respectively [11–15]. The papers [11, 12] contain the first ever published observations of the self-sweeping effects in the case of the ytterbium- and erbium doped fiber lasers.

## 6. CONCLUSION

We have reviewed selected recent results in the research of thulium fiber lasers we achieved within the team of Fiber lasers and nonlinear optics ÚFE. We have presented more than two-fold increase of the quantum conversion efficiency thanks to alumina nanoparticle codoping of the preform core-layers and application

of such thulium-doped fibers in monolithic fiber lasers. The laser was the first rare-earth doped laser with a pair of FBG inscribed by deep-UV femtosecond fiber laser. It should be noted that the fiber was germanium-free. In collaboration with industrial partner we have developed range of fiber optic components based on fused-biconically-tapered process. We have achieved coherent combination of thulium fiber lasers up to 20 W was reached limited by the available pump power. The output was stable despite the fact that the individual fiber lasers exhibited instabilities.

*The authors acknowledge support from the from the Technology Agency of the Czech Republic project No. TH01010997 and from the Czech Ministry of Industry and Trade, project No. FR-TI4/734. The authors would like to thank for fruitful cooperation to Michael Písařík and other colleagues from the company SQS Fiber optics; Bernard Dussardier, Wilfried Blanc and others from LPMC – Université de Nice in France and Martin Becker from IPHT in Jena in Germany.*

## References

- [1] I. Kašík, P. Honzátko, P. Peterka, J. Mrázek, O. Podrazký, J. Aubrecht, J. Proboštová, J. Cajzl, and F. Todorov: **Special optical fibers – heart of thulium and holmium fiber lasers and amplifiers** (In Czech). *Jem. mech. opt.* **60/1** (2015) 4–7.
- [2] P. Peterka, P. Honzátko, I. Kašík, J. Cajzl, and O. Podrazky, **Thulium-doped optical fibers and components for fiber lasers in 2  $\mu\text{m}$  spectral range** (Invited). *SPIE Proc.* **9441** (2014) 94410B.
- [3] P. Peterka, I. Kašík, A. Dhar, B. Dussardier, and W. Blanc: **Theoretical modeling of fiber laser at 810 nm based on thulium-doped silica fibers with enhanced  $^3\text{H}_4$  level lifetime**. *Opt. Express* **19** (2011) 2773–81.
- [4] J. Cajzl, P. Peterka, P. Honzátko, J. Mrázek, O. Podrazký, F. Todorov, P. Gladkov, J. K. Sahu, M. Nunez-Velazquez, P. Nekvindová, I. Kašík: **Characterization of fluorescence lifetime of Tm-doped fibers with increased quantum conversion efficiency**. *SPIE Proc.* **9450** (2015) 945017.
- [5] P. Peterka, P. Honzátko, M. Becker, F. Todorov, M. Písařík, O. Podrazký, and I. Kašík, **Monolithic Tm-Doped Fiber Laser at 1951 nm With Deep-UV Femtosecond-Induced FBG Pair**. *IEEE Photonics Technology Lett.* **25/16** (2013) 1623–5.
- [6] P. Koska, P. Peterka, I. Kašík, V. Matejec, and O. Podrazky: **Double-clad rare-earth-doped fiber with cross-section tailored for splicing to the pump and signal fibers: analysis of pump propagation**. *SPIE Proc.* **8775** (2013) 87750V.
- [7] P. Peterka, P. Honzátko, P. Koška, O. Podrazký, and I. Kašík: **Transient-fiber-Bragg grating spectra in self-swept Fabry-Perot fiber lasers**. *SPIE Proc.* **9344**. (2015) 934423.
- [8] M. Písařík, P. Peterka, S. Zvanovec, Y. Baravets, F. Todorov, I. Kašík, and P. Honzátko: **Fused fiber components for “eye-safe” spectral region around 2  $\mu\text{m}$** . *Optical and Quantum Electronics* **46** (2014) 603–11.
- [9] P. Koska, Y. Baravets, P. Peterka, J. Bohata, and M. Písařík: **Mode-Field Adapter for Tapered-Fiber-Bundle Signal and Pump Combiners**. *Applied Optics* **54/4** (2015) 751–6.
- [10] P. Honzátko, Y. Baravets, F. Todorov, P. Peterka, M. Becker: **Coherently combined 20 W at 2000 nm from a pair of thulium-doped fiber lasers**. *Laser Phys. Lett.* **10** (2013) 095104.

- [11] P. Peterka, J. Maria, B. Dussardier, R. Slavík, P. Honzátka, and V. Kubeček: **Long-period fiber grating as wavelength selective element in double-clad Yb-doped fiber-ring lasers.** Laser Phys. Lett. **6** (2009) 732–6.
- [12] P. Peterka, P. Navrátil, B. Dussardier, R. Slavík, P. Honzátka, and V. Kubeček: **Self-induced laser line sweeping and self-pulsing in double-clad fiber lasers in Fabry-Perot and unidirectional ring cavities.** SPIE Proc. **8433** (2012) 843309.
- [13] P. Peterka, P. Navrátil, J. Maria, B. Dussardier, R. Slavík, P. Honzátka, and V. Kubeček: **Self-induced laser line sweeping in double-clad Yb-doped fiber-ring lasers.** Laser Phys. Lett. **9** (2012) 445-50.
- [14] P. Honzátka, P. Vojtisek, and B. Vitovec: **Progress in thulium-doped fiber lasers and amplifiers.** SPIE Proc. **8697** (2012) 86971J.
- [15] P. Peterka, P. Honzátka, P. Koška, F. Todorov, J. Aubrecht, O. Podrazký, and I. Kašík: **Reflectivity of transient Bragg reflection gratings in fiber laser with laser-wavelength self-sweeping.** Opt. Express **22** (2014) 30024-31.
- [16] P. Peterka, P. Honzátka, I. Kašík, A. Michková: **Fiber lasers.** ed. Science around us (in Czech), Academia, 2014. www.ufe.cz/sites/default/files/Media/vlaknove\_lasery.pdf

Ing. Pavel Peterka, Ph.D., e-mail: peterka@ufe.cz

Dr. Ing. Pavel Honzátka, e-mail: honzatkan@ufe.cz,

Dr. Ing. Ivan Kašík, e-mail: kasik@ufe.cz

Ing. Ondřej Podrazký, Ph.D., e-mail: podrazky@ufe.cz

Ing. Filip Todorov, Ph.D., e-mail: todorov@ufe.cz

Ing. Jakub Cajzl, e-mail: cajzl@ufe.cz.

Ing. Pavel Koška, e-mail: koska@ufe.cz

Ing. Yauhen Baravets, e-mail: baravets@ufe.cz

Ing. Jan Aubrecht, Ph.D., e-mail: aubrecht@ufe.cz

Ing. Jan Mrázek, Ph.D., e-mail: mrazek@ufe.cz

Fiber lasers and nonlinear optics team, Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 - Kobylisy

*Jedná se o vědecký článek*

## ÚFE na veletrhu AMPER 2015

Veletrh AMPER 2015, který se uskutečnil 24. – 27. března 2015 v Brně, je největším elektrotechnickým veletrhem střední Evropy. Jeho vystavovatelé se prezentují v oborech energetiky, elektroinstalací, elektronických součástek, automatizace, osvětlení, ale i ve specializované sekci OPTONIKA – zahrnující společnosti nabízející optické a fotonické součástky a zařízení. V rámci tohoto programu proběhl i cyklus odborných přednášek Fórum OPTONI-

KA. Podrobná zpráva o veletrhu vyšla v minulém čísle časopisu JMO. Na veletrhu měl výstavní stánek také Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i. (ÚFE). Na fóru OPTONIKA byly zahrnuty 3 přednášky ÚFE na různá témata od výroby optických vláken po měření elektromagnetického pole živých buněk.

Adéla Michková, michkova@ufe.cz



# Fiber-optic pH-sensor for in vivo measurement of microscopic bio samples

*Optical fiber sensors can bring many advantages to biological, medical or environmental applications. They offer small size, immunity to electro-magnetic field and limited unwanted interaction with measured sample. One of the key parameters monitored in biological systems is the acidity of environment expressed as pH. The article deals with development of an optical pH-sensor with tapered fiber probes. The principle of the sensor is based on measurement of fluorescence emission of hydroxypyrene-1,3,6-pyrene trisulfonic acid trisodium salt (HPTS, pyranine) at two different excitation wavelengths (405 nm and 450 nm). The sensor was sensitive to pH in range from 5.5 to 7.5 with resolution of  $\pm 0.15$  pH unit and the tapered fiber probes allowed in-vivo measurement in microscopic biological samples.*

**Keywords:** optical sensors, optical fibers, pH

## 1. INTRODUCTION

Fiber-optic detection based on research in special optical fibers has been investigated in the Institute of Photonics and Electronics for a long time. The goal was to design and fabricate novel fiber structures of as high sensitivity and as low limit of detection (LOD) as possible. At the beginning the work was concentrated on evanescent-wave refractometric detection e.g. of hydrocarbons [1]. Special fibers were produced with modified coatings, [2–4] or of novel structures [5–6] or of inverted graded-index refractive-index profiles [7–8]. Strong point of this approach was robust optical hardware and relatively low cost of sensors. The effort in this field was completed by implementation of suspended-core micro-structured silica fibers for detection of gaseous toluene [9]. Experience acquired in evanescent-wave detection was utilized for fluorescence-based detection of oxygen during bio-processes [10]. Opto-chemical detection of free chlorine was later investigated with the aim to improve monitoring of quality of drinking or swimming pool water [11–12]. Apart from opto-chemical detection sensors based on long period gratings were investigated for health monitoring of buildings, bridges and other civil engineering constructions [13–15].

Fiber-optical detection of pH in near-neutral range can be useful for biological and medical applications because it offers a number of advantages over well-known electro-chemical methods. It offers a fine spatial resolution due to a small diameter of optical fibers (the smallest commercially available optical pH probes have the diameter of 150  $\mu\text{m}$  [16]), probes are robust due to silica glass which the probes are made of, there is low interaction with biological material and the optical sensing is immune to electromagnetic field. The spatial resolution of the sensors can be further reduced down to a micrometer scale by using tapered-fiber probes. Fluorescence-based sensing is quite suitable for point-sensors because the indicator dye can be immobilized onto a tiny tip of a fiber-probe and both the excitation light and the fluorescence emission from the dye can be guided through the probe.

Early fluorescence-based optical pH-sensors, which employed plain emission intensity for sensing, suffered from fluctuations caused by unpredictable changes in optical conditions, photo-bleaching of the indicator dye, instability of the excitation light source, etc. These issues can be solved using a fluorescence lifetime-based

sensing, a ratio-metric sensing scheme or a combination of both of them. Lifetime-based sensing uses on measurement of fluorescence decay instead of the intensity, but it demands rather complicated instrumentation since the decay times are usually in the order of nanoseconds. Ratio-metric methods use another signal, which is not sensitive to the detected parameter, as a reference. Various types of signals can be used as references: e.g. back-reflected excitation light, emission of another fluorophore [17] or another excitation - or emission - band of a “self-referencing” indicator dye [18]. Although there exist a plenty of pH-sensitive fluorescence dyes [19], pH-sensing in the neutral range (i.e. near  $\text{pH} = 7$ ) is a challenging task because the analyte concentrations are in the order micro-mols per liter. One of popular indicator dyes is 8-hydroxypyrene-1,3,6-pyrene trisulfonic acid trisodium salt (HPTS), because it is non-toxic, self-referencing and it is also substantially cheaper. The concept of immobilization of HPTS for optical pH sensing was first introduced by *Wolffbeis et al.* in 1983 [20] and optical sensor based on ion-pair of HPTS with hexadecyltrimethylammonium bromide (CTAB) immobilized by sol-gel method was studied by *Wencel et al.* [21–22] recently.

The paper deals with development of a fiber-optic pH-sensing system for measurement of pH in biological samples with microscopic spatial resolution. The sensor uses ion-pair of HPTS and CTAB as the pH-sensitive dye which is immobilized into xerogel matrix on a tip of a tapered-fiber probe.

## 2. PRINCIPLE OF THE SENSOR

The HPTS is a fluorescent dye with two pH-sensitive absorption bands at 405 nm and 460 nm which decrease and increase respectively with increasing pH value. The excitation spectra of the HPTS measured in different pH are in the *Fig. 1*

The sensor system works on a principle of excitation of the immobilized HPTS by 405 nm and 450 nm laser diodes through an optical tapered-fiber probe, while the emission from the dye is collected through the same probe and led to a photomultiplier tube with a high-pass optical filter installed in front of its input window. Synchronization of the laser diodes with the photomultiplier is provided electronically and the whole system is controlled by a computer. The scheme of the sensing system is in *Fig. 2*

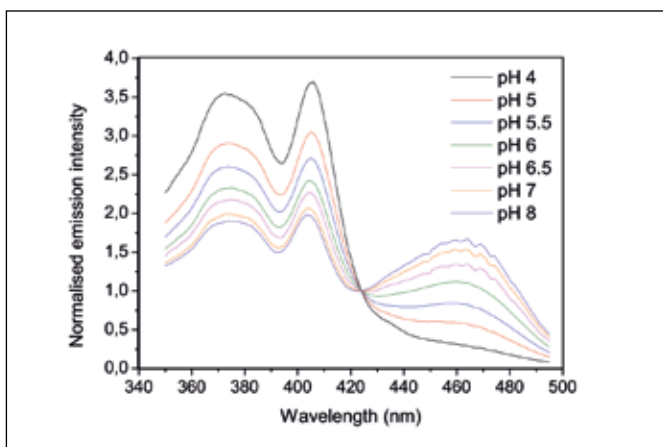


Fig. 1 Normalized excitation spectra of HPTS ( $\lambda_{em} = 508$  nm)

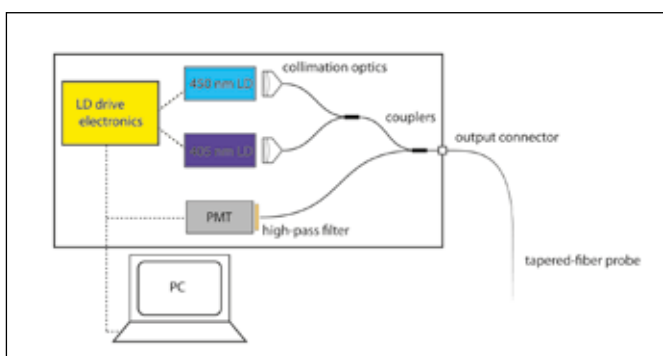


Fig. 2 Scheme of the sensing system

Response of the sensor is defined as the ratio  $R$ :

$$R = I_{450}/I_{405} \quad (1)$$

Where  $I_{450}$  and  $I_{405}$  are the fluorescence intensities detected at excitation by 450 nm and 405 nm diodes, respectively.

### 3. PREPARATION OF SENSING PROBES

Sensing probes are based on a gradient multi-mode silica optical fiber of own production with core/cladding diameters of 50/125  $\mu$ m. The fiber was tapered in SQS VláknoVá optika a.s. company down to a diameter of waist of several micrometers. The fiber-tapers were cut in half and the tip was further shortened in order to get the tip diameter of approx. 15  $\mu$ m. Since the tips were cut by a razor-blade, they were polished at angle of 30 deg. using a polisher of own construction in order to obtain tips of defined shape. An example of polished tip is shown at Fig. 3.

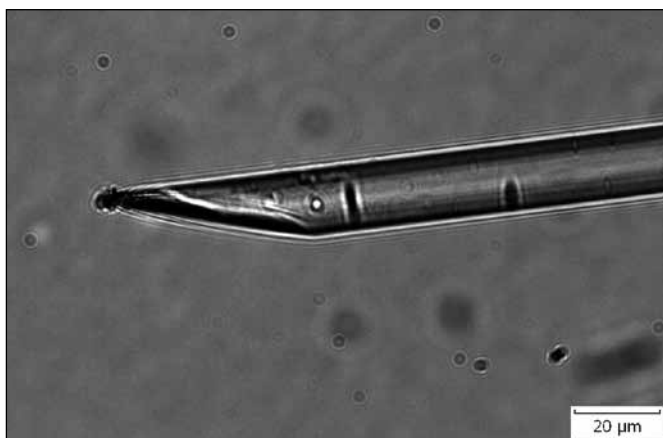


Fig. 3 Detail of a tapered-fiber tip polished at angle of approx. 30 deg

In order to reduce leakage of the dye from the immobilization matrix, the HPTS was let to react with CTAB giving an ion-pair (Fig. 4) which is insoluble in water [21].

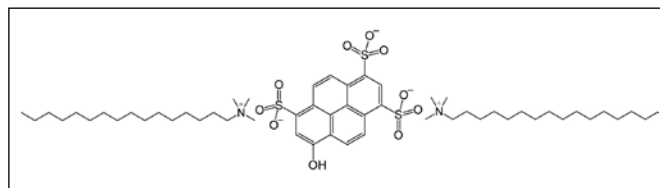


Fig. 4 Structure of HPTS:CTAB ion-pair

The ion-pair was then mixed together with a hybrid sol of ethyltriethoxysilane (ETES) and (3-Glycidyloxypropyl) trimethoxysilane (GLYMO) according to [21]. The mixture was dip-coated onto a tip of a tapered fiber probe under inverted microscope using hydraulic micro-manipulator. Finally, the sensitive layer was cured at 140 °C for 4 h. An example of prepared probe tip compared to a bare 50/125  $\mu$ m optical fiber is depicted at Fig. 5.

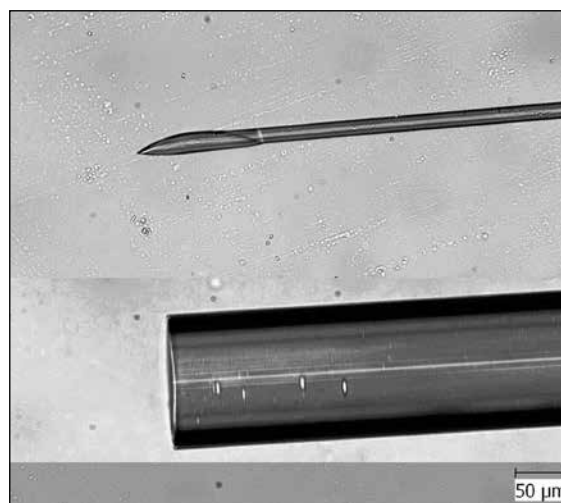


Fig. 5 Example of probe tip compared to a bare 50/125  $\mu$ m optical fiber

### 4. SENSING PROBE CHARACTERIZATION

A comparison of light emission from the probe before and after polishing of the tip is shown at Fig. 6. An output of 450 nm laser diode was coupled into the fiber probes, their tips were dipped

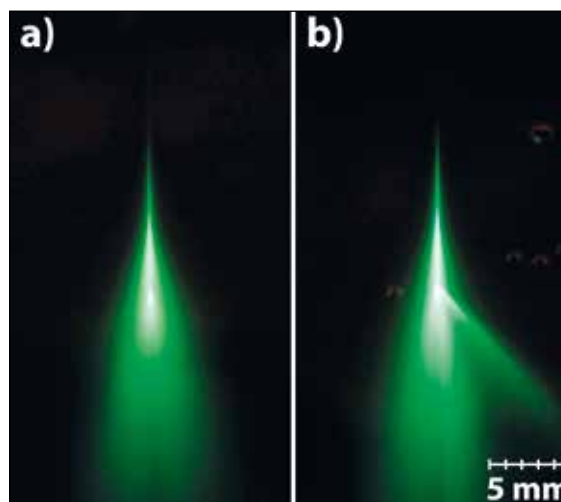


Fig. 6 Emission of light from the tip of a probe: a) before; b) after the polishing

into solution of fluorescein and micro-photographs were taken from a side.

It is obvious that the excitation light begins to exit the tapered-fiber probe several millimeters before the probe tip and thus it is necessary to put the sensitive layer only onto the probe tip in order to achieve fine spatial resolution.

The response of the sensing system to pH was measured by dipping a probe with immobilized sensitive layer into buffer solutions of different pH. The change of the measured response in time is shown in Fig. 7.

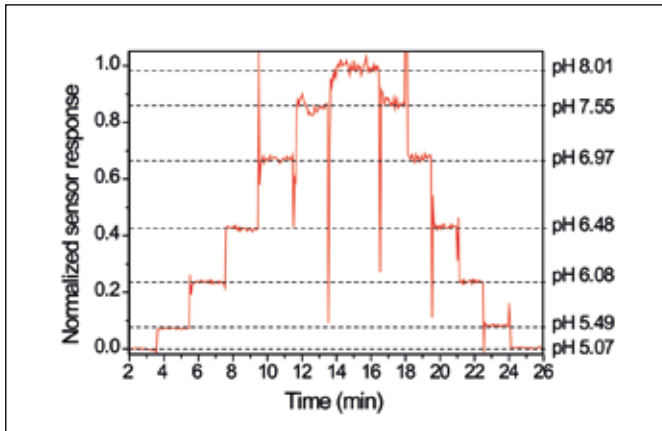


Fig. 7 Normalized response of the sensor to change of pH in time

The response time of the sensor was about 15 s, it can be seen that the response was reproducible for at least 25 minutes of continuous measurement.

A response curve constructed by fitting measured values by Boltzmann function can be seen at Fig. 8.

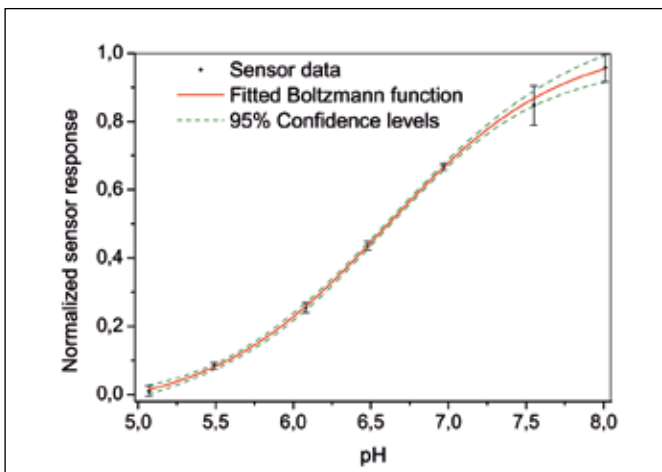


Fig. 8 A response curve of the sensor

A useful sensor range from approx. pH = 5.5 to pH = 7.5 can be conducted from the curve, making the sensor suitable for biological samples.

## 5. IN VIVO EXPERIMENTS

Measurement of pH in plant tissues was performed and possibilities of probe penetration into some animal cells were tested. Experiments in plants were done in *A. thaliana* shoot tissues [18]. The pH measurement had to be done using an inverted microscope equipped with hydraulic manipulators because of small dimensions of the samples (see Fig. 9).

Since the sole probe was not able to get through the hard plant-cell wall, another tool, an *in-vitro* fertilization hatching-needle, had

to be used for making a “hole” into the sample surface. Then the probe was inserted and pH inside the sample was measured. The probe was calibrated prior the sample measurement and pH-values between 5.0 and 5.5 were measured in different parts of plant shoots with a resolution of  $\pm 0.15$  pH unit.)

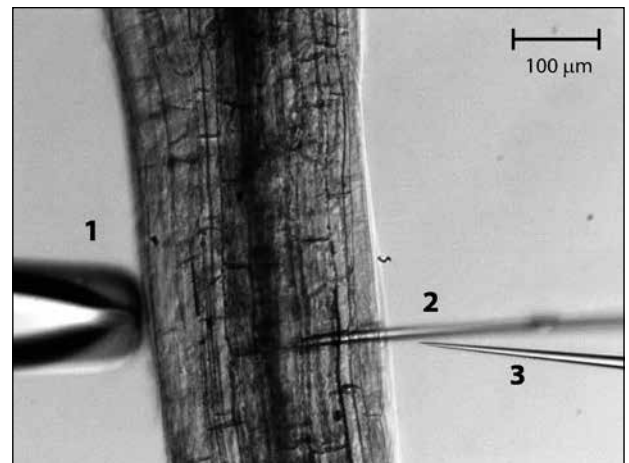


Fig. 9 Measurement in *A. thaliana* shoot: 1) fixation pipette, 2) pH probe, 3) penetrator tool

Unlike plant-cells, the hard cell-wall is not present in most of the animal and human cells. Thus some preliminary penetration experiments were performed with animal tissues. It was found that chicken (Fig. 10) and fish embryos can be successfully penetrated by probes without need of another penetrating tool.

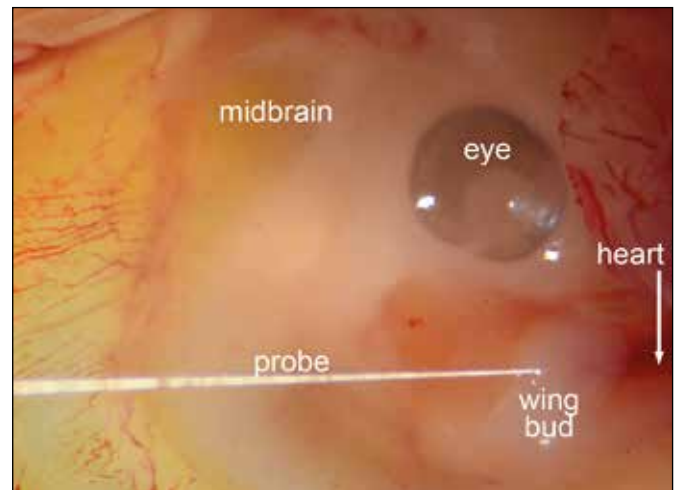


Fig. 10 Penetration experiment in chicken embryo

## 6. CONCLUSION

The developed fiber-optic pH-sensing system was successfully tested for measurement in microscopic biological samples. The range of the system was approx. from pH = 5.5 to pH = 7.5 and the resolution achieved during in-vivo experiments was  $\pm 0.15$  pH unit. The time-response of the sensor is approx. 15 s.

While another tool is needed for penetration of plant tissues the sole probes are capable of penetration of animal cells and tissues.

*This work was supported by the Technology Agency of the Czech Republic, project no. TA04011400. Authors would like to thank also to SQS VláknoVá optika a.s. for preparation of fiber tapers and to Safibra s.r.o. for construction of the opto-electronic part of the custom-made experimental sensor setup.*

## References

- [1] P. Tobiska, M. Chomat, V. Matejec, D. Berkova, I. Hüttel: **Investigation of fiber-optic evanescent-wave sensors for detection of liquid hydrocarbons.** *Sensors and Actuators B51* (1998) 152–8.
- [2] V. Matejec, M. Chomat, D. Berkova, J. Mrazek, R. Ardeleanu, V. Harabagiu, M. Pinteala, B.C. Simionescu: **Detection of toluene dissolved in water by using PCS fibers excited by an inclined collimated beam.** *Sens. Actuators B90* (2003) 204–10.
- [3] V. Matejec, J. Mrazek, J. Skokankova, M. Chomat, I. Kasik: **Optical Properties and Sensitivity of Xerogel Detection Layers for Fiber-Optic Hydrocarbon Sensors.** *J. Sol-Gel Sci. Technol.* **32**(2004) 237–242.
- [4] 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.** *Mat. Sci. Eng. C26* (2006) 208–13.
- [5] V. Matejec, M. Chomat, M. Pospisilova, M. Hayer, I. Kasik: **Optical fiber with novel geometry for evanescent-wave sensing.** *Sens. Actuators B29* (1995) 416–22.
- [6] V. Matejec, M. Chomat, M. Hayer, D. Berkova, M. Pospisilova, I. Kasik: **Improvement of the sectorial fiber for evanescent-wave sensing.** *Sens. Actuators B39* (1997) 334–8.
- [7] M. Chomat, D. Berkova, V. Matejec, I. Kasik, G. Kuncova, M. Hayer: **Optical detection of toluene in water using an IGI optical fiber with a short sensing region.** *Sens. Actuators B87* (2002) 258–67.
- [8] 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 B107* (2005) 93–7.
- [9] T. Martan, J. Aubrecht, O. Podrazky, V. Matejec, I. Kasik: **Detection of hydrocarbons using suspended core microstructured optical fiber.** *Sens. Actuators B202* (2014) 123–8.
- [10] P.J. Scully, L. Betancor, J. Bolyo, S. Dzyadevych, J.M. Guisan, R. Fernandez-Lafuente, N. Jaffrezic-Renault, G. Kuncova, V. Matejec, B. e. a. O'Kennedy: **Optical fibre biosensors using enzymatic transducers to monitor glucose.** *Meas. Sci. Technol.* **18** (2007) 3177–86.
- [11] I. Kasik, J. Mrazek, O. Podrazky, M. Seidl, J. Aubrecht, P. Tobiska, V. Matejec, B. Kovacs, A. Markovics, M. e. a. Szili: **Preparation and characterization of thin transducer layers sensitive to free chlorine in water.** *Mat. Sci. Eng. C28* (2008) 842–7.
- [12] I. Kasik, J. Mrazek, O. Podrazky, M. Seidl, J. Aubrecht, P. Tobiska, M. Pospisilova, V. Matejec, B. Kovacs, A. e. a. Markovics: **Fiber-optic detection of chlorine in water.** *Sens. Actuators B139* (2009) 139–42.
- [13] M. Chomat, D. Berkova, V. Matejec, I. Kasik, J. Kanka, R. Slavik, A. Jancarek, P. Bittner: **Responses of a long-period grating fabricated in a graded-index optical fiber to temperature and refractive-index changes.** *Mat. Sci. Eng. C26* (2006) 457–61.
- [14] M. Chomat, J. Ctyroky, D. Berkova, V. Matejec, J. Kanka, J. Skokankova, F. Todorov, A. Jancarek, P. Bittner: **Temperature sensitivity of long-period gratings inscribed with a CO2 laser in optical fiber with graded-index cladding.** *Sens. Actuators B119* (2006) 642–50.
- [15] 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.** *Sensor Letters* **7** (2009) 979–83.
- [16] Presens.de, [online]: „Fiber Optic pH Microsensors“, <http://www.presens.de>, March 2015.
- [17] I. Kasik, J. Mrazek, T. Martan, M. Pospisilova, O. Podrazky, V. Matejec, K. Hoyerova, M. Kaminek: **Fiber-optic pH detection in small volumes of biosamples.** *Anal. Bioanal. Chem.* **398** (2010) 1883–9.
- [18] I. Kasik, O. Podrazky, J. Mrazek, T. Martan, V. Matejec, K. Hoyerova, M. Kaminek: **In vivo optical detection of pH in microscopic tissue samples of Arabidopsis thaliana.** *Mat. Sci. Eng. C33* (2013) 4809–15.
- [19] J. Han, K. Burgess: **Fluorescent Indicators for Intracellular pH.** *Chem. Rev.* **110** (2010) 2709–28.
- [20] O.S. Wolfbeis, E. Furlinger, H. Kroneis, H. Marsoner: **Fluorimetric analysis.** *Fresen Z. Anal. Chem.* **314** (1983) 119–24.
- [21] D. Wencel, B. MacCraith, C. McDonagh: **High performance optical ratiometric sol-gel-based pH sensor.** *Sens. Actuators B139* (2009) 208–13.
- [22] D. Wencel, M. Barczak, P. Borowski, C. McDonagh: **The development and characterisation of novel hybrid sol-gel-derived films for optical pH sensing.** *J. Mater. Chem.* **22** (2012) 11720.

Ing. Ondřej Podrazký, Ph.D., e-mail: podrazky@ufe.cz

Ing. Jan Mrázek, Ph.D., e-mail: mrazek@ufe.cz

Ing. Tomáš Martan, Ph.D., e-mail: martan@ufe.cz

Ing. Soňa Vytykáčová, e-mail: vytykacova@ufe.cz

Mgr. Jana Proboštová, e-mail: probostova@ufe.cz

Ing. Ivan Kašík, Ph.D., e-mail: kasik@ufe.cz

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

prof. MUDr. David Sedmera, D.Sc., e-mail: david.sedmera@fgu.cas.cz

Fyziologický ústav AV ČR, v. v. i., Vídeňská 1083, 142 20 Praha 4.

Ing. Klára Hoyerová, PhD, e-mail: hoyerova@ueb.cas.cz

Ústav experimentální botaniky AV ČR, v. v. i., Rozvojová 263, 165 02 Praha 6 – Lysolaje.

*Jedná se o vědecký článek*

# Low-temperature photoluminescence spectroscopy of crystalline and glass semiconductors

*Low-temperature photoluminescence spectrometer designed and assembled in the Institute of Photonics and Electronics is described. The spectrometer enables sensitive and high resolution measurements in broad spectral (300 nm – 9000 nm) and temperature (3.5 K – 300 K) ranges. Very broad spectral range gives our laboratory a unique possibility to investigate a wide range of materials. In this contribution we present investigation of semi-insulating bulk GaN and selected special glass systems doped with rare-earth ions.*

**Keywords:** photoluminescence, semiconductors, GaN, chalcogenide glasses, rare-earths ions

## 1. INTRODUCTION

The advent of the laser in 1960 increased the popularity of optical spectroscopy as a useful method for the characterization of materials. This powerful source of coherent, pulsed or continuous light has allowed spectroscopic studies of materials previously unattainable with conventional incoherent light sources. Thus, optical spectroscopy has gained an importance as a powerful method for the characterization of crystalline and glass semiconductor materials and the related optoelectronic devices.

The information contained in the photoluminescence (PL) spectra reflects the physics behind radiative recombination and thus offers information about the important properties of studied materials such as: crystalline status, optical gap, energy levels and type of impurities present in respective matrices as well as the dynamical processes occurring in electronic system of studied materials when excited with short light pulses. The experimental conditions at which the PL experiment is to be performed, such as the spectral range and the temperature range, are predetermined by the electronic structure of studied materials and characteristic energies of relevant electronic transitions. In particular for the study of semiconductors one needs to use the temperature-dependent PL spectroscopy, and measurements bellow 10 K ( $10 k_{\text{B}} T = 8.617 \times 10^{-4}$  eV,  $k_{\text{B}}$  is Boltzmann constant,  $T$  absolute temperature) are absolutely necessary to identify shallow energy levels (of the order of  $10^{-4}$  eV) due to defects or impurities in crystalline semiconductors, as well as to determine narrow semiconductor bandgaps and most of excitonic recombinations.

In this contribution we will demonstrate the power of the low-temperature PL spectroscopy in the study of semi-insulating GaN and special glass materials doped with rare-earth (RE) ions.

## 2. EXPERIMENTAL

The PL spectrometer in the Institute of Photonics and Electronics (IPE) consisting of the Sumitomo optical closed cycle helium optical cryostat and the THR 1000 monochromator (Jobin-Yvon) enables sensitive and high resolution measurements in broad spectral (300 - 1700 nm) and temperature (3.5 K – 300 K) ranges. A specially designed setup consisting of modified FTIR spectrometer Nicolet 5700 that is coupled to the same optical cryostat allows collection of PL spectra in extended infra-red range of 700 nm – 9000 nm ( $14300 \text{ cm}^{-1}$  –  $1100 \text{ cm}^{-1}$ ). He-Ne, (632.8 nm) Ar ion (457 nm, 488 nm, 496.5 nm, 514.5 nm), He-Cd (325 nm) lasers, together with Nd-YAG (1064 nm and 532 nm) and semiconductor diode lasers (650 nm and 840 nm) are available for the PL excita-

tion. Thus the low-temperature PL spectrometer in IPE, that has been built over the years from appropriate optical and electrical components, enables sensitive and high resolution measurements in very broad spectral and temperature ranges, and this gives our laboratory a unique possibility to investigate a wide range of both crystalline and glass semiconductors.

## 3. PL SPECTROSCOPY OF SELECTED MATERIALS

### 3.1 Semi-insulating GaN

Besides the dominant application of GaN in the mass production of high brightness light emitting diodes and lasers, GaN has also significant application in the microwave power electronics. Due to its high electron mobility, high thermal conductivity and capability to work at temperatures up to few hundred degrees, GaN-based field effect transistors are distinctive with the generation of high microwave powers, high voltage operation and power gain cutoff frequencies as high as many tens of GHz.

The realization of high electron mobility field effect transistors (HEMT's) demands an electrical isolation between the transistor conductive channel deposited as a thin film and the lattice matched high thermal conductivity substrate. It has been established that a semiinsulating (SI) bulk GaN is the best suited substrate for high power GaN HEMTs. High resistivity GaN (in the order of  $10^{11} \Omega\text{cm}$ ) is obtained predominantly by doping GaN with the deep acceptor Fe which compensates the inherent shallow donors in GaN when Fe is introduced at concentrations exceeding  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . The doping takes place during the crystal growth process where the Fe atoms are predominantly in the  $\text{Fe}^{3+}$  state [1]. Consequently there is a need for an "ex situ" feed-back control of the doping process in the crystal growth technology. In general this is done with electrical measurements, but these are not a trivial task because of the high specific resistivity. Such measurements are destructive because of the necessity to provide the samples with alloyed metallic Ohmic contacts. Here we present our study of the optical properties of SI GaN, doped with Fe at concentrations above  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , aimed to verify the applicability of optical contactless technique for express control of Fe-doping of SI GaN.

As an example we present results obtained on a series of SI bulk GaN crystals doped with Fe concentration within the range  $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  –  $1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Samples were grown and supplied intentionally for this study by Kyma Technologies Inc. USA within a joint project.

Samples were subjected to an optical characterization including: comprehensive high resolution PL study in the temperature range



4 K – 295 K, optical transmission and photoluminescence excitation (PLE) measurements at room temperature. The PL was excited with 404 nm laser diode and recorded with FTIR spectrometer Nicolet 5700. The optical transmission and the PLE experiments have been made with UV-VIS spectrometer Specord 210 and Horiba-Jobin Yvon FL 3-11 spectrometer, respectively. In all experiments the optical path was parallel to the c-axes of the crystals.

Previous optical transmission experiments have indicated apparent increase in the below band-gap optical absorption with increasing concentration of Fe-doping [1]. The net absorption coefficient of a slab of GaN for energies below the GaN:Fe band-gap was calculated using the relation:

$$T = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) / [1 - R^2 \exp(-2\alpha d)],$$

which accounts for the multiple incoherent reflections within the sample.  $T$ ,  $R$ ,  $\alpha$  and  $d$  are the transmittance, reflectance of the boundary, absorption coefficient and the crystal plate thickness, respectively.

The reflectance spectrum needed for calculation of the absorption coefficient was obtained from the measured refractive index dispersion on our samples.

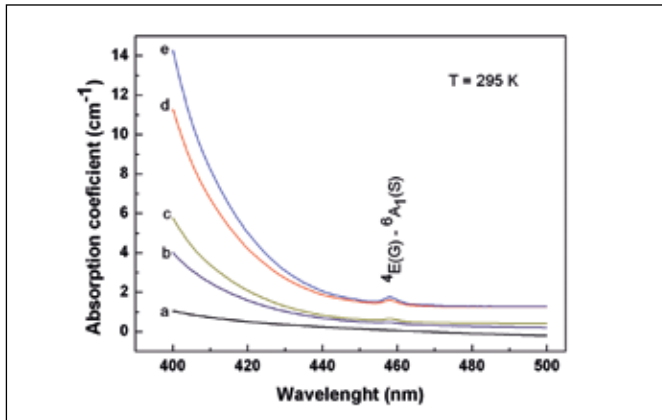


Fig. 1 Calculated absorption coefficient of bulk SI GaN:Fe crystals with various Fe-doping levels. The curves a, b, c, d, and e are from samples with concentrations:  $(1.5 \times 10^{17}, 5.3 \times 10^{17}, 8.4 \times 10^{17}, 1.4 \times 10^{18}, 1.6 \times 10^{18}) \text{ cm}^{-3}$ , respectively. Concentrations are calibrated by SIMS.

Fig. 1 shows the calculated spectral dependence of absorption coefficient for samples with calibrated Fe-doping levels in the range  $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} - 1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Apparently the absorption coefficient rises with both, the doping level and the photon energy. In accordance with [1] we ascribe the peak at 458 nm to the intracenter resonance absorption in the  $\text{Fe}^{3+}$  ion.

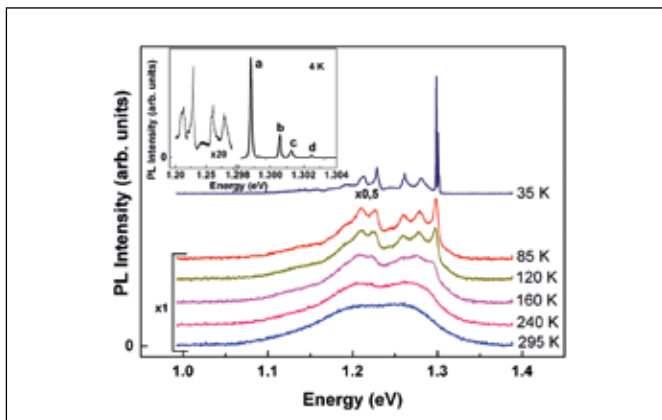


Fig. 2 Temperature dependence of the NIR PL for SI GaN:Fe sample with Fe-concentration of  $7.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . The inset shows a high resolution PL spectrum at 4 K

The temperature dependent PL of a sample with Fe-concentration of  $8.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  is presented in Fig. 2. The inset shows a 4 K PL spectrum of this crystal which is dominated by the zero phonon line (ZPL) of the  $\text{Fe}^{3+}$  internal transition  ${}^4T_1(G) \rightarrow {}^6A_1(S)$  peaking at 1.299 eV with FWHM of 129  $\mu\text{eV}$ . The temperature rise causes gradual decrease of the ZPL intensity accompanied by increase of the intensities of all vibrational replicas which we correlate with the expected increase in the electron-phonon interaction with the increasing temperature. At temperatures above 240 K the PL spectrum converts into a broad-band centered around 1.24 eV. The intensity of the room temperature PL was found to correlate with the Fe-doping level [2].

In addition, we measured the PLE spectrum of the 1.24 eV PL band for a sample with Fe-doping level of  $1.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Fig. 3 shows this spectrum simultaneously with the absorption coefficient dispersion of the same sample as presented in Fig. 1. Above the energy of 2.719 eV both PLE and the absorption follow an exponential dependence which allows to derive the energy of 2.83 eV as an onset of the temperature stimulated charge transfer  $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$  [3] according to:  $\text{Fe}^{3+}({}^6A_1(S)) + h\nu \Rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{extra hole in the valence band}$ . In the reversed process  $\text{Fe}^{2+}$  can capture free hole and relaxes nonradiatively into the  $\text{Fe}^{3+}T_1(G)$  state.

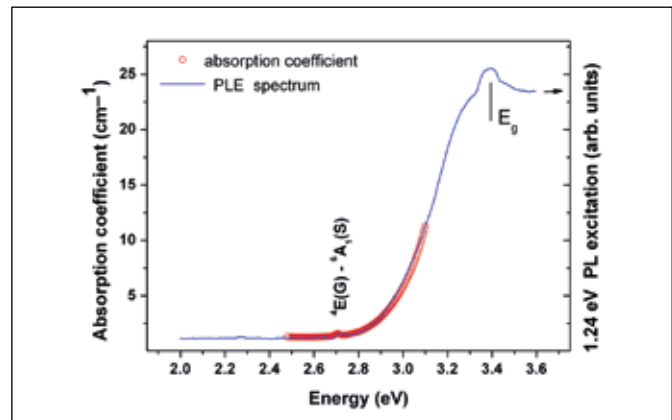


Fig. 3 The PLE spectrum and the absorption coefficient at room temperature of the sample with Fe-doping level of  $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

The simultaneous onset of the absorption coefficient and the PLE intensity enables a conclusion that the absorption coefficient measured well below the band-band transitions region is determined solely by the process in which the  $\text{Fe}^{2+}$  are created directly from  $\text{Fe}^{3+}$  by absorption of photons with energy higher than 2.83 eV. Having this established we can return to results presented in Fig. 1 and especially to the wavelength range 400 nm – 420 nm, where the absorption coefficient can be reliably determined.

Thus, measuring the absorption coefficient  $\alpha(\lambda)$  of a sample with unknown Fe-concentration at any wavelength  $\lambda \in (400, 420)$  nm, enables to evaluate Fe concentration from calibrated data presented in Fig. 1. This procedure represents an express, contactless method [4] for the evaluation of Fe-doping level at room temperature.

### 3.2 Low-temperature PL of glass semiconductors

Chalcogenide and heavy metal oxide glasses (HMO) are promising and widely studied materials because they are transparent in the near- and mid-infrared (NIR and MIR) spectral regions and enable drawing of optical fibers. These glasses are characterized by low phonon energies and high refractive index and could be doped with RE ions. The host-glass low phonon energy is of particular importance for obtaining a high quantum efficiency of the radiative transitions from the doped-in  $\text{RE}^{3+}$  ions, by reducing the probability of non-radiative energy transfer from the excited  $\text{RE}^{3+}$  ions into the surrounding host-glass matrix. This results in the observation of

MIR transitions of the RE<sup>3+</sup> ions doped into special glasses that are normally not present in host materials with higher phonon energy – such as the silica glass.

In the case of glass semiconductors doped with RE ions the low-temperature PL allows to investigate not only the radiative efficiency of RE<sup>3+</sup> ions in various glass matrixes but it also enables simultaneous observation of the luminescence of the host glass (usually observed only at low temperature) with superimposed narrow features due to 4f-4f transitions in the doped-in RE<sup>3+</sup> ions. Low-temperature measurements also enable to identify the fine structure of relevant emission bands of RE<sup>3+</sup> ions, and determine the Stark levels splitting of corresponding 4f manifolds.

In the course of investigation of chalcogenide and heavy-metal oxide glasses our search aimed on gathering experimental evidence for the energy transfer (or the transfer of electronic excitation) between the electronic structure of the host glass and that of doped-in RE<sup>3+</sup> ions. Our laboratory has been the only one, after *Bishop* and *Turnbull* [5], to observe the narrow absorption dips superimposed on the broad-band luminescence of the host glass, and the first to come with a proper interpretation of these absorption dips as being due to 4f-4f up-transitions within doped-in RE<sup>3+</sup> ions [6, 7]. Using excitation wavelength not in resonance with 4f levels of RE<sup>3+</sup> ions enabled us simultaneous observation of the broad-band luminescence of the host glass with superimposed narrow 4f-4f features in a number of HMO and chalcogenide glass systems doped with various RE<sup>3+</sup> ions [6–11]. Recently we interconnected [6, 7] our observations with the transfer of energy [5] between the host glass and the 4f electrons of doped-in RE<sup>3+</sup> ions.

A good example to illustrate this phenomenon is our recent study of Tm<sup>3+</sup> doped tellurite glasses [12]. The 4f-4f emission bands (at 800 nm, 1450 nm and 1850 nm) of Tm<sup>3+</sup> ions could be easily observed using the FTIR spectrometer Nicolet 5700, in case of Tm doped TeO<sub>2</sub>-ZnO-TiO<sub>2</sub> samples, when using the 532 nm line for PL excitation. A typical low-temperature PL spectrum of Tm doped TeO<sub>2</sub>-ZnO-TiO<sub>2</sub> glass excited by 532 nm line is shown in Fig. 4 by curve (a).

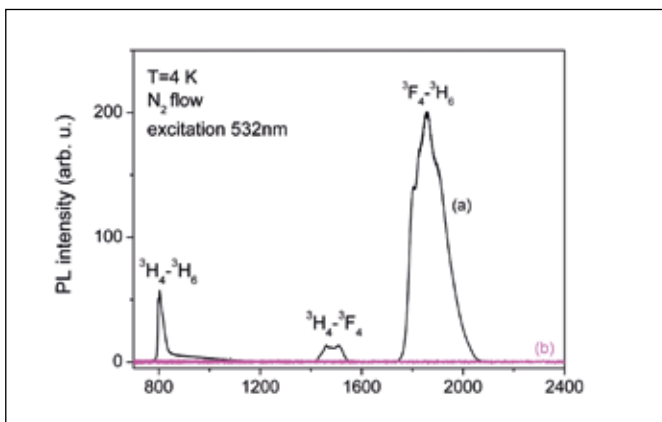


Fig. 4 Low-temperature PL spectra of 75TeO<sub>2</sub>-20ZnO-5TiO<sub>2</sub>:yTm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (y = 1.0 mol%) and Tm doped silica glass excited by 532 nm line are shown by curves (a) and (b), respectively. Three 4f-4f emission bands due to radiative transitions in Tm<sup>3+</sup> ions are seen on curve (a)

Strong emission bands of Tm<sup>3+</sup> ions at about 800, 1450 and 1850 nm are clearly seen. This is interesting since no PL signal was observed from Tm<sup>3+</sup> doped silica glass when using the same 532 nm line for PL excitation – see the curve (b) in Fig. 4. It should be noted that the emission band at 800 nm is actually superimposed on relatively weak broad-band luminescence (BBL) of the host glass. In order to suppress the strong emission band at 800 nm, the PL spectrum shown in Fig. 5 was measured only in the vicinity of 800 nm (by using grating monochromator) so that relatively weak BBL could be seen properly.

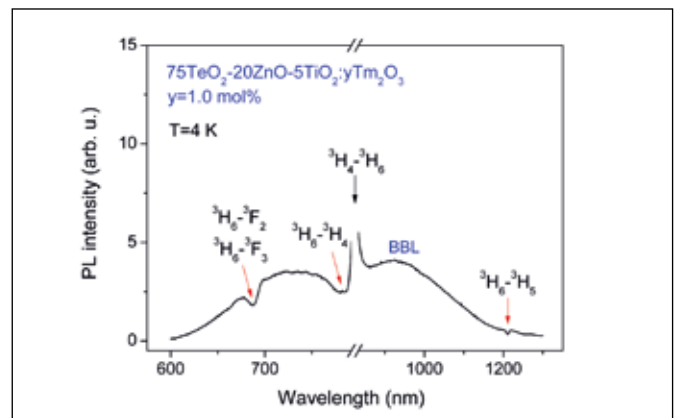


Fig. 5 Low-temperature PL spectrum of 75TeO<sub>2</sub>-20ZnO-5TiO<sub>2</sub>:yTm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (y = 1.0 mol%) glass excited by 514.5 nm line and measured in the vicinity of 800 nm emission band is shown. Three absorption bands due to 4f-4f up-transitions in Tm<sup>3+</sup> ions are indicated by red arrows

It follows from the inspection of Fig. 5 that in case of TeO<sub>2</sub>-ZnO-TiO<sub>2</sub>:Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses excited by the 532 nm line, narrow absorption dips superimposed on the BBL of the host were observed and assigned to <sup>3</sup>H<sub>6</sub>→<sup>3</sup>F<sub>3</sub>, <sup>3</sup>F<sub>2</sub>, <sup>3</sup>H<sub>6</sub>→<sup>3</sup>H<sub>4</sub> and <sup>3</sup>H<sub>6</sub>→<sup>3</sup>H<sub>5</sub> electronic up-transitions within Tm<sup>3+</sup> ions. These absorption dips are marked by red arrows in Fig. 5. It can be concluded that the observed emission bands of Tm<sup>3+</sup> embedded in TeO<sub>2</sub>-ZnO-TiO<sub>2</sub> glasses (shown in Fig. 4) are excited solely via the energy transfer between the electronic structure of the glass host and that of doped-in Tm<sup>3+</sup> ions. The energy transfer is manifested by narrow dips at about 690 nm, 780 nm and 1210 nm superposed on the BBL of the host glass as it can be seen on the low-temperature PL spectrum shown in Fig. 5. The host glass is excited by the 532 nm line since it has a reasonable overlap with the fundamental absorption edge of TeO<sub>2</sub>-ZnO-TiO<sub>2</sub> host. In view of the fact that the used excitation wavelength of 532 nm is not in resonance with 4f states of Tm<sup>3+</sup> ions and at the same time it does not overlap with the fundamental absorption edge of the silica glass, it is not surprising that no PL signal was observed for Tm<sup>3+</sup> doped silica glass – see curve (b) in Fig. 4.

Low-temperature PL has further been used for detailed measurements of the fine structure of 4f-4f radiative transitions at low (4 K) and room (300 K) temperature. The obtained results enabled to propose energy diagrams of Stark level splitting for three (Er<sup>3+</sup>) or two (Tm<sup>3+</sup>) lowest manifolds of respective RE<sup>3+</sup> ions doped-in various glass hosts [12, 13]. These studies also enabled to understand and to quantify the temperature broadening of 4f-4f related PL bands.

#### 4. CONCLUSION

The PL spectrometer assembled in IPE enables to study samples of various materials and size in a very broad spectral and temperature range. This gives our laboratory a unique capability to make both the PL characterization and to investigate electronic properties of various materials in a more detailed way.

The contactless optical procedure has been proposed for the evaluation of iron concentration in Fe-doped GaN crystals. The doping concentration must be monitored to assure the compensation of inherent shallow donors, i.e. to assure the SI nature of GaN.

Investigation of special glass materials doped with various RE<sup>3+</sup> ions by low-temperature PL enabled simultaneous observation of the broad-band luminescence of the host glass with superimposed narrow features due to 4f-4f electronic transitions in RE<sup>3+</sup> ions embedded in the host glass. The energy diagram of Stark levels splitting for the two (Tm<sup>3+</sup>) or three (Er<sup>3+</sup>) lowest manifolds of doped-in RE<sup>3+</sup> ions was deduced from PL spectra measured at 300 and 4 K.

*This study was supported by the US Missile Defense Agency, Contract HQ 0147-09-C-0005 and by the Czech Science Foundation, project No. P106/12/2384.*

## References

- [1] E. Malguth, A. Hoffmann, W. Gehlhoff, O. Gelhausen M. R. Phillips, and X. Xu: **Structural and electronic properties of Fe<sup>3+</sup> and Fe<sup>2+</sup> centers in GaN from optical and EPR experiments.** Phys. Rev. B **74** (2006)165202. Phys. Rev. **B74** (2006) 165202.
- [2] P. Gladkov, J. Humlíček, E. Hulicius, T. Šimeček, T. Paskova, K. Evans: **Effect of Fe doping on optical properties of free standing semi-insulating HVPE GaN:Fe.** J. Cryst. Growth **312** (2010) 1205–9.
- [3] E. Malguth, A. Hoffmann, and M. Philips: **Fe in III–V and II–VI semiconductors.** Phys. stat. sol. (b) **245** (2008) 455–80.
- [4] P. Gladkov, E. Hulicius, T. Paskova, E. Preble, K. R. Evans: **Below band-gap optical absorption and photoluminescence excitation spectroscopy at room temperature in low-defect-density bulk GaN:Fe.** Appl. Phys. Lett. **100** (2012) 031908.
- [5] S.G. Bishop, D.A. Turnbull, B.G. Aitken: **Excitation of rare earth emission in chalcogenide glasses by broadband Urbach edge absorption.** J. Non-Cryst. Solids **266-269** (2000) 876–83.
- [6] J. Zavadil, M. Kubliha, P. Kostka, M. Iovu, V. Labas, Z. G. Ivanova: **Investigation of electrical and optical properties of Ge-Ga-As-S glasses doped with rare-earth ions.** J. Non-Cryst. Solids **377** (2013) 85–9.
- [7] P. Kostka, J. Zavadil, M.S. Iovu, Z.G. Ivanova, D. Furniss, A.B. Seddon: **Low-temperature photoluminescence in chalcogenide glasses doped with rare-earth ions.** accepted for publication in Journal of Alloys and Compounds.
- [8] J. Zavadil, P. Kostka, J. Pedlikova, K. Zdansky, M. Kubliha, V. Labas, J. Kaluzny: **Electro-optical characterization of Ge-Se-Te glasses.** Journal of Non-Crystalline Solids **355** (2009) 2083-7.
- [9] J. Zavadil, P. Kostka, J. Pedlikova, Z.G. Ivanova, K. Zdansky: **Investigation of Ge based chalcogenide glasses doped with Er, Pr and Ho.** Journal of Non-Crystalline Solids **356** (2010) 2355–9.
- [10] P. Kostka, J. Zavadil, J. Pedlikova, M. Poulain: **Preparation and optical characterization of PbCl<sub>2</sub>-Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TeO<sub>2</sub> glasses doped with rare earth elements.** Phys. Status Solidi (a) **208/8** (2011) 1821–6.
- [11] M. Nouadji, Z.G. Ivanova, M. Poulain, J. Zavadil, A. Attaf: **Glass formation, physicochemical characterization and photoluminescence properties of new Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PbO-ZnO and Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-PbO-ZnS systems.** Journal of Alloys and Compounds **549** (2013) 158–62.
- [12] J. Zavadil, P. Gladkov, I. Kabalci, P. Kostka: **Investigation of TeO<sub>2</sub>-ZnO-TiO<sub>2</sub>:Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses by low-temperature photoluminescence spectroscopy.** Submitted to Journal of Luminescence.
- [13] J. Zavadil, Z.G. Ivanova, P. Kostka, M. Hamzaoui, M.T. Soltani: **Photoluminescence study of Er-doped zinc-sodium-antimonite glasses.** J. of Alloys and Compounds **611** (2014) 111–16.

doc. Petar Gladkov, Ph.D., e-mail: gladkov@ufe.cz

RNDr. Jiří Zavadil, CSc., e-mail: zavadil@ufe.cz.

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

*Jedná se o vědecký článek*

---

Jan GRYM, Roman YATSKIV, Jan VANIŠ, Ondřej ČERNOHORSKÝ, Jan LORINČÍK  
Institute of Photonics and Electronics CAS, Praha

## One-dimensional ZnO nanostructures

*An overview of recent activities of the group Synthesis and Characterization of Nanomaterials in the field of one-dimensional ZnO nanostructures is given. We briefly summarize general properties of ZnO and explain why one-dimensional semiconductors are useful. We describe the preparation, characterization, and application of graphite Schottky contacts on ZnO nanorod arrays and propose technological concepts to explain fundamental phenomena occurring in nanoscale contacts on ZnO nanorods.*

**Keywords:** ZnO, nanorods, Schottky barrier, charge transport, selective area epitaxy

### 1. ZINC OXIDE

Zinc oxide (ZnO) is a direct wide bandgap semiconductor ( $E_g = 3.3$  eV at 300 K) crystallizing in the wurtzite structure with a series of unique properties: a large exciton binding energy (60 meV), which inhibits thermal activation and enhances light emission at room temperature; good optical transmittance in the visible region; high optical gain; piezoelectricity; room temperature ferromagnetism; mechanical stability given by the high melting point and large cohesive energy; radiation hardness; or biological compatibility [1, 2].

ZnO is often compared with GaN, another wide bandgap semiconductor with the wurtzite crystal structure and similar lattice constant (1.8 % difference). Both material systems (group-III-nitrides and group-II-oxides) have been thoroughly investigated with the aim to design novel optoelectronic devices. The higher exciton binding energy in ZnO is a big advantage regarding high-power light-emitting devices operating at or above room temperature. Nevertheless, the lack of stable and reproducible p-type doping in ZnO was decisive that GaN is a material of choice for optoelectronic

device fabrication nowadays [3]. The Nobel Prize in Physics 2014 was awarded to three Japanese scientists for the invention of an energy-efficient and environment-friendly light source – the blue light-emitting diode based on the GaN material system [4].

Applications of ZnO stay confined to unipolar devices or bipolar heterojunction devices, where a combination with a suitable p-type material has to be found. From this perspective, the preparation of a Schottky contact on ZnO is of primary importance. Crystal defects, residual impurities, surface asperities, and chemical reactions forming oxides and eutectics all have a large impact on the formation of a Schottky contact and induce several charge transport mechanisms; preparation of a high quality Schottky barrier is not a simple task.

Since we have had extensive experience with the study of Schottky barriers on other compound semiconductors, we started to explore contacts to ZnO in more detail. We have recently demonstrated that highly-rectifying Schottky contacts on ZnO substrates can be fabricated by the deposition of colloidal graphite [5]. Fig. 1 shows current-voltage (I-V) characteristics of a Schottky diode with the graphite contact on the O-face of a bulk ZnO substrate. The current transport was dominated by thermionic emission between 300 K and 420 K with the ideality factor close to one (1.08 at 300 K). We also explained a significant variation of Schottky contact properties on different faces of ZnO by differences in the defect nature of both the Zn-face and O-face surface of ZnO. Moreover, we showed that when the interface between the graphite and the ZnO substrate was functionalized with Pt nanoparticles, highly selective and sensitive hydrogen sensing elements were fabricated [6].

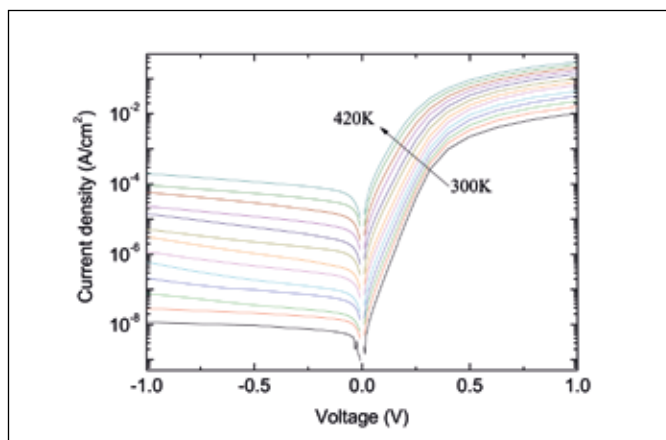


Fig. 1 Semi-logarithmic I-V characteristics for the graphite/ZnO (O-face) Schottky diode over the temperature range of 300 K – 420 K

## 2. EPITAXY OF LOW-DIMENSIONAL SEMICONDUCTORS

Semiconductor structures based on epitaxial layers with atomic-scale-abrupt interfaces have gained a crucial position in the design of modern electronic and photonic applications, such as ultrafast transistors, semiconductor lasers, or photodetectors. Epitaxial growth has always been a marriage of convenience between the deposited layer and substrate. In the simplest case, both the layer and substrate are of the same material, providing a perfect homoepitaxial match. However, due to the existence of a limited number of substrates with acceptable quality and cost, restriction to homoepitaxial systems would greatly limit the number of applications. This limitation was the main driving force behind the progress of semiconductor epitaxial growth towards pseudomorphic, lattice mismatched heteroepitaxial systems, where small amount of strain is accommodated in very thin layers and multilayers.

It was the development of vapor-phase epitaxial techniques (molecular beam epitaxy and metalorganic vapor phase epitaxy) that allowed for the deposition of these systems with precise control and uniformity. Still, when the critical layer thickness is exceeded, misfit dislocation segments form at the interface, gradually relieving

the misfit strain as the growth proceeds. The misfit dislocations are accompanied by threading dislocations extending to the surface. The threading dislocations propagating into the active region of the devices greatly affect their performance, reliability and lifetime [7]. This is critical in applications requiring thick layers, such as high-brightness light-emitting diodes, power transistors, or tandem solar cells. Even more fundamental to device performance is the difference in thermal expansion coefficients, which leads to the layer cracking and wafer bowing [8].

## 3. ONE-DIMENSIONAL SEMICONDUCTORS

A great deal of interest has been recently directed towards the design of new devices using one-dimensional semiconductor nanostructures. This is motivated by their unique electrical and optical properties [9], but also by the fact that their high aspect ratio allows for a full elastic strain relaxation without formation of extended defects. This opens door for the integration of different material platforms onto a given substrate, which is one of the critical points in the development of novel semiconductor devices.

One of the key issues in semiconductor devices is to understand and control charge transport at the metal-semiconductor nanostructure interfaces [10]. Not only the scientific community, but also the semiconductor industry has devoted a great deal of their efforts to develop contacts to bulk semiconductors. On the other hand, charge transport at metal/semiconductor nanostructure interface has received much less attention and its investigation is still in infancy. Nanostructured semiconductors possess unique properties, which significantly differ from their bulk counterparts; existing models of electrical transport are not directly applicable at the nanoscale. If the size of the metal-semiconductor interface is smaller than a characteristic length associated with the Debye screening length, the characteristics of the contact are governed by its size and shape [11]. A crucial task is to identify the charge transport phenomena which dominate in a given one dimensional (1D) system. This is important not only to take advantage of the transport physics for device engineering, but also to correlate electronic transport with basic material properties. When a metal is deposited on a semiconductor, the alignment between the conduction and valence bands in the semiconductor and the Fermi level in the metal are decisive for the contact to be of the ohmic or Schottky type.

## 4. SCHOTTKY CONTACTS ON ONE-DIMENSIONAL ZnO NANOSTRUCTURES

Our long term focus is on the preparation and characterization of Schottky barriers on different semiconductors. Schottky barriers to 1D ZnO structures have been shown to have great potential in several applications. Single nanowire UV photodetectors with Au/ZnO Schottky contact were demonstrated to have better sensitivity, lower dark current and much faster switching under pulsed UV illumination than the nanowires with ohmic contacts [12]. Hydrogen sensors with Pt/ZnO Schottky contacts were shown to have a high degree of sensitivity and low response time [13]. Piezoelectric nanogenerators were obtained on an array of aligned ZnO nanowires, which were deflected with a Pt AFM tip in contact mode. The coupling of piezoelectric and semiconducting properties in ZnO creates a strain field and charge separation across the nanowire as a result of its bending. The rectifying characteristic of the Schottky barrier formed between the metal tip and the nanowire leads to electrical current generation [14]. A single ZnO nanowire with a Pt Schottky contact had largely enhanced response to biomolecules in comparison with ohmic contacts. The operation of the sensor was determined to a high degree by the behaviour at the Schottky junction. That sensor was capable of clear differentiation between positively and negatively charged molecules [15]. Schottky diodes based on hydrothermally grown ZnO nanorods (NRs) were recently fabricated on textile fabrics with the aim of integrating electrical and optical sensors to the textile architecture [16]. Even though a significant progress has been made in the preparation of Schottky

diodes on low dimensional ZnO structures, many questions remain about the nature of the electrical transport. The realization of high quality Schottky contacts on 1D ZnO structures remains a challenge mainly because of the existence of the interface states, surface contamination and subsurface defects [17]. Reported Schottky barrier heights, their ideality factors and transport mechanisms on particular 1D ZnO structures differ substantially. A wide range of preparation methods, doping species, sizes and geometries, surface treatments, post-growth annealing temperatures and ambient atmospheres, and routes to the contact preparation, all these strongly affect transport properties of 1D ZnO nanostructures.

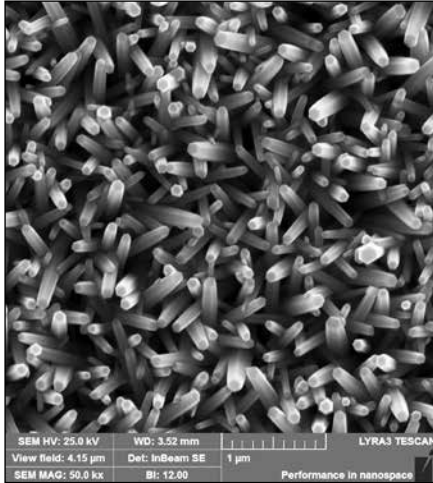


Fig. 2 SEM image of an array of hydrothermally grown ZnO NRs

There is a wide variety of methods available for the preparation of 1D ZnO nanostructures, which are generally divided into two main groups: vapour phase methods (such as metal-organic chemical vapor deposition, molecular beam epitaxy, pulsed laser deposition) and chemical or solution-based methods (such as sol-gel, electrodeposition or hydrothermal growth). Hydrothermal growth allows for the large scale production of nanostructures at low temperatures in a simple, cost effective way, with a full control of the morphology and nanostructure size [18]. Fig. 2 shows an array of ZnO NRs grown hydrothermally in our laboratory on Si substrate with ZnO nanoparticle seed layer.

We investigated charge transport in such ZnO arrays deposited on different seed layers with a graphite Schottky contact. The dominating charge transport mechanisms were determined from the analysis of C-V and temperature dependent I-V measurements (Fig. 3). The forward I-V characteristic was described by the tunnel-recombination current transport mechanism via interface states. The reverse current data were corrected for the temperature dependent shunt resistance and the transport mechanism under reverse bias was ascribed to tunneling via a shallow level 0.1 eV below the conduction band, which was attributed to the interface states of the graphite/ZnO NRs interface [19]. We further showed that the ZnO arrays with the graphite contact can be employed in highly sensitive UV photodetectors and hydrogen sensors with fast response [19, 20]. In conventional nanodevices, Schottky contacts are usually avoided in order to enhance the contribution made by the nanowires or NRs to the detected signal. In Schottky devices the current passing through the metal-semiconductor contact is mainly controlled by the parameters of the barrier. When the barrier height is highly sensitive to the environment around the Schottky contact area, such as light irradiation or gas adsorption, a large change in current is measured. This change in current is often orders of magnitude higher than in conventional devices with ohmic contacts. Moreover, when the contact area is small, the adsorption and desorption processes, which are essential in the sensing process, are fast and the response time of the device is thus short.

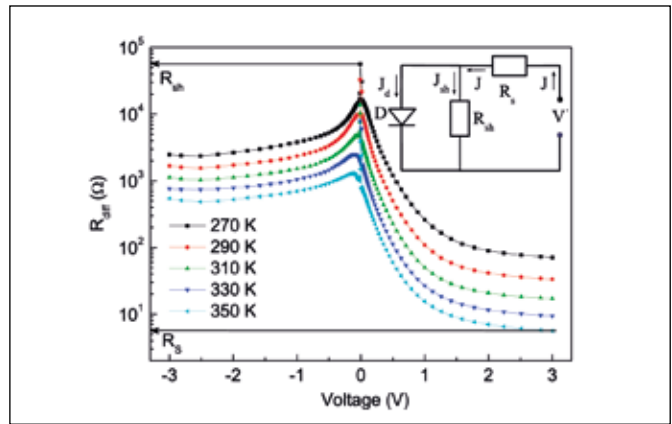


Fig. 3 Differential resistance  $R_{diff}$  of the graphite/ZnO NRs hetero-junction vs. voltage. The inset shows the equivalent DC circuit

Fig. 4 shows the photocurrent response of the graphite/ZnO NRs junction at a nominal zero set bias. The junction can be reversibly switched between low and high conduction states with a good stability and reproducibility (Fig. 4a). The high sensitivity of this photodetector can be observed in Fig. 4b, which shows the power-dependent photoresponse. The photoresponse of the graphite/ZnO NRs junction is governed by oxygen adsorption and desorption at the ZnO surface. Oxygen molecules adsorbed on the surface extract electrons from the conduction band of ZnO to form  $O^-$  and  $O^{2-}$  anions. This process leads to the formation of a depletion region with reduced carrier concentration near the sample surface. When electron-hole pairs are generated upon UV illumination, the photogenerated holes migrate to the surface and discharge the adsorbed oxygen ions through surface electron-hole recombination. At the same time, the photogenerated electrons increase the total current of the device.

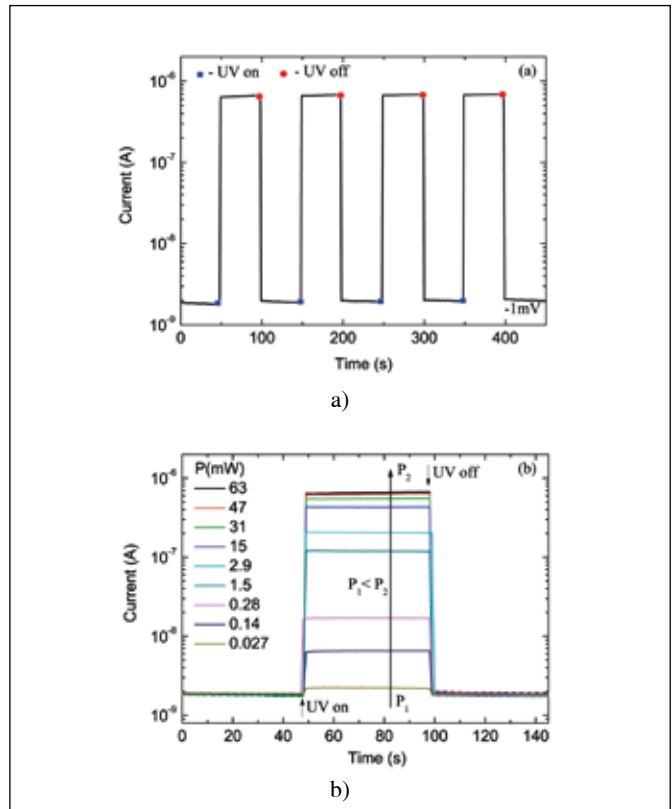


Fig. 4 (a) Time dependent photoresponse of the graphite-ZnO NRs at a reverse bias 1 mV under UV illumination with 395 nm light for 4 cycles. (b) Photoresponse under various UV illumination intensities at a reverse bias of 1 mV

Similar phenomena are taking place when the graphite/ZnO NRs junction is exposed to hydrogen. The hydrogen molecules react with adsorbed oxygen species at the graphite/ZnO NRs interface and produce H<sub>2</sub>O molecules, while the released electrons contribute to the current increase (Fig. 5a). Catalytic metal nanoparticles inserted between the graphite contact and the ZnO NRs further enhance sensitivity and decrease the response and recovery times of the device (Fig. 5b).

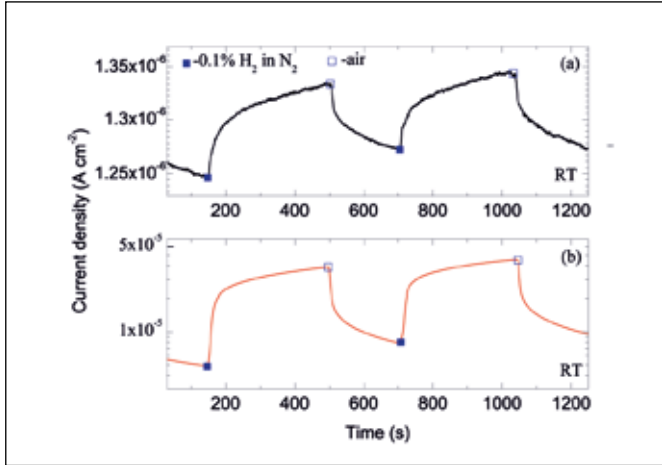


Fig. 5 Current transient characteristics of (a) the graphite/ZnO NRs junction, and (b) the graphite Pt NPs/ZnO NRs junction measured at -0.1 V. Note different y-axis scales of (a) and (b)

## 5. CHALLENGES AHEAD

We are developing a set of techniques to investigate charge transport in individual NRs and their arrays.

- Measurement of charge transport properties of the arrays of ZnO NRs, where the contact can be prepared by the metal evaporation, by the deposition of colloidal graphite, or by the transfer of graphene (Fig. 6a).

- Measurements of charge transport properties of individual as grown upright-standing ZnO NRs by conductive atomic force

microscopy (Fig. 6b) or with the nanomanipulator probe in the scanning electron microscope (Fig. 6c).

- Measurements of charge transport properties of individual ZnO NRs transferred on lithographically prepared micropad electrodes. Electrical connection between the NRs and the micropads are realized by e-beam lithography and lift-off or by focused electron/ion beam induced deposition of Pt (Fig. 6d).

Each of the methods has intrinsic advantages and disadvantages. We are not aware of any systematic study of transport properties in 1D ZnO nanostructures, where contacts would be prepared by such a wide range of techniques. The important point is that each technique creates a fundamentally different contact to ZnO NRs with different transport properties. All these techniques allow us to fully exploit capabilities of our unique FIB-SEM system: high vacuum; in situ secondary ion mass spectroscopy analysis; gas injection system allowing us to deposit metals locally by the interaction with the electron or ion beam, to perform local etching, and to introduce oxidizing or reducing gases, which strongly affect the surface properties of ZnO.

Full understanding and control of structural, electrical, and optical properties ZnO NR arrays and their application in devices requires precise control of their position, vertical alignment, length, and diameter. To achieve selective area growth of truly upright-standing NRs with a full control of their position, the substrate has to be patterned instead of the deposition of a continuous seed layer.

*This work has been supported by the Czech Science Foundation project 15-17044S and by the EU COST Action TD1105 – project LD14111.*

## References

- [1] *M. Ahmad, J. Zhu: ZnO based advanced functional nanostructures: synthesis, properties and applications.* Journal of Materials Chemistry **21/3** (2011) 599–614.
- [2] *D. Panda, T.Y. Tseng: One-dimensional ZnO nanostructures: fabrication, optoelectronic properties, and device applications.* Journal of Materials Science **48/20** (2013) 6849–77.
- [3] *F. Schuster, B. Laumer, R.R. Zamani, C. Magén, J.R. Morante, J. Arbiol, M. Stutzmann: p-GaN/n-ZnO Heterojunction Nanowires: Optoelectronic Properties and the Role of Interface Polarity.* ACS Nano **8/5** (2014) 4376–84.

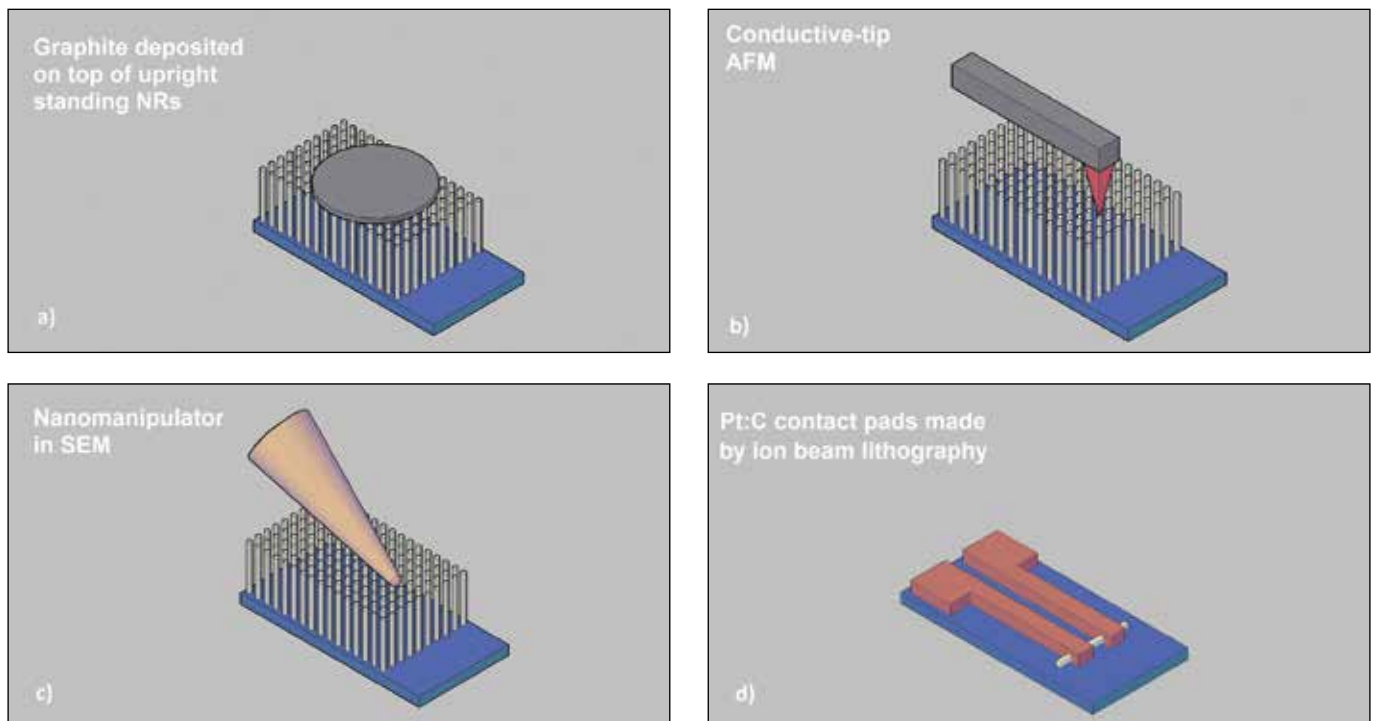


Fig. 6 Schematics of different techniques to characterize the ZnO NRs

- [4] [www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/)
- [5] R. Yatskiv, J. Grym: **Temperature-dependent properties of semimetal graphite-ZnO Schottky diodes**. Applied Physics Letters **101**/16 (2012) 162106–3.
- [6] R. Yatskiv, J. Grym, K. Zdansky, K. Píksova: **Semimetal graphite/ZnO Schottky diodes and their use for hydrogen sensing**. Carbon **50**/10 (2012) 3928–33.
- [7] H.J. Queisser, E.E. Haller: **Defects in semiconductors: Some fatal, some vital**. Science **281**/5379 (1998) 945–50.
- [8] C.V. Falub, H. von Kanel, F. Isa, R. Bergamaschini, A. Marzegalli, D. Christina, G. Isella, E. Muller, P. Niedermann, L. Miglio: **Scaling Hetero-Epitaxy from Layers to Three-Dimensional Crystals**. Science **335**/6074 (2012) 1330–34.
- [9] M. Law, J. Goldberger, P.D. Yang: **Semiconductor nanowires and nanotubes**. Annual Review of Materials Research **34** (2004) 83–122.
- [10] F. Leonard, A.A. Talin: **Electrical contacts to one- and two-dimensional nanomaterials**. Nature Nanotechnology **6**/12 (2011) 773–83.
- [11] G.D.J. Smit, S. Rogge, T.M. Klapwijk: **Scaling of nano-Schottky-diodes**. Applied Physics Letters **81**/20 (2002) 3852–4.
- [12] K. Hasan, N.H. Alvi, J. Lu, O. Nur, M. Willander: **Single nanowire-based UV photodetectors for fast switching**. Nanoscale Research Letters **6** (2011) 1–6.
- [13] S.N. Das, J.P. Kar, J.H. Choi, T. Il Lee, K.J. Moon, J.M. Myoung: **Fabrication and Characterization of ZnO Single Nanowire-Based Hydrogen Sensor**. Journal of Physical Chemistry C **114**/3 (2010) 1689–93.
- [14] Z.L. Wang, J.H. Song: **Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays**. Science **312**/5771 (2006) 242–6.
- [15] P.H. Yeh, Z. Li, Z.L. Wang: **Schottky-Gated Probe-Free ZnO Nanowire Biosensor**. Advanced Materials **21**/48 (2009) 4975–8.
- [16] A. Khan, M. Hussain, M.A. Abbasi, Z.H. Ibupoto, O. Nur, M. Willander: **Study of transport properties of copper/zinc-oxide-nanorods-based Schottky diode fabricated on textile fabric**. Semiconductor Science and Technology **28**/12 (2013) 125006–13.
- [17] I. Hussain, M.Y. Soomro, N. Bano, O. Nur, M. Willander: **Systematic study of interface trap and barrier inhomogeneities using I-V-T characteristics of Au/ZnO nanorods Schottky diode**. Journal of Applied Physics **113**/23 (2013) 234509–15.
- [18] S. Xu, Z.L. Wang: **One-dimensional ZnO nanostructures: Solution growth and functional properties**. Nano Research **4**/11 (2011) 1013–98.
- [19] R. Yatskiv, V.V. Brus, M. Verde, J. Grym, P. Gladkov: **Electrical and optical properties of graphite/ZnO nanorods heterojunctions**. Carbon **77**/- (2014) 1011–19.
- [20] R. Yatskiv, J. Grym, M. Verde: **Graphite/ZnO nanorods junction for ultraviolet photodetectors**. Solid-State Electronics **105**/- (2015) 70–3.

Ing. Jan Grym, Ph.D., e-mail: grym@ufe.cz

Mgr. Roman Yatskiv, Ph.D., e-mail: yatskiv@ufe.cz

Ing. Jan Vaniš, Ph.D., e-mail: vanis@ufe.cz

Ing. Ondřej Černohorský, e-mail: cernohorsky@ufe.cz

RNDr. Jan Lorinčík, CSc., e-mail: lorincik@ufe.cz

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

*Jedná se o vědecký článek*

Ondřej KUČERA, Daniel HAVELKA, Michal CIFRA  
Institute of Photonics and Electronics CAS, Praha

## Bioelectrodynamics: High-frequency electromagnetic processes in biological systems

*State-of-the-art in bioelectrodynamics is presented. The brief review starts with introduction to the topic and definition of field followed by a short historical overview of bioelectrodynamics. Special attention is then paid to specific hot topics in this branch of biophysics, namely the ultra-weak photon emission from biological systems and radio-frequency electromagnetic field coupled to normal modes of microtubules.*

**Keywords:** bioelectrodynamics, microtubules, ultra-weak photon emission

### 1. INTRODUCTION

Bioelectrodynamics is a branch of biophysics and bioelectromagnetism which deals with rapidly changing electric and magnetic fields in biological systems, i.e., high frequency endogenous electromagnetic phenomena in living cells. Here we summarize current state of research in the field of bioelectrodynamics.

Spanning from electromagnetic fields produced by low frequency ionic currents to photonic phenomena in visible part of electromagnetic spectrum, electromagnetic fields can be generated on a broad range of frequencies in living systems [1]. Some of these phenomena are being extensively studied and have deve-

loped into rather separated scientific disciplines. An example of such discipline can be represented by electrophysiology, which study currents of ions which are responsible, for instance, for so called action potentials in electroexcitable cells. Another example is bioluminescence, i.e., emission of light caused by activity of specialized photoactive proteins and enzymes. These phenomena are well documented and understood and therefore covered in textbooks. By contrast, here we focus on phenomena, which are less understood and the mechanism of which is still subject of the basic research [2].

## 2. HISTORY

Despite the fact that the term “Bioelectrodynamics” appeared in literature for the first time only in the late 1980s, the history of the discipline is much longer and can be traced back to the times of *Luigi Galvani*. Since electrophysiological and bioluminescent phenomena are considered rather separated disciplines, the dawn of bioelectrodynamics dates to 1920s to the work of *Alexander Gurwitsch* [2]. Even though his interpretation of experimental results was strikingly incorrect, he is considered the first who observed the ultra-weak photon emission from cells. The research in radio-frequency range was inspired by the work of *Herbert Fröhlich* from late 1960s, who predicted existence of coherent electromagnetic emission from cells as a result of non-linear long-range correlation on a macroscopic scale [3]. His work was later adapted by *Jiří Pokorný* who proposed the biological relevance of endogenous radio-frequency electromagnetic fields in cancer [4].

## 3. ULTRA-WEAK PHOTON EMISSION

Optical ultra-weak photon emission (autoluminescence) is a universal phenomenon in metabolically active biological systems [5]. Unlike specialized bioluminescence, which serves for communication purposes and is based on the activity of specific enzymes, autoluminescence is probably a side effect to cellular respiration and it is related to the reactions of free radicals and reactive oxygen species. Its biological significance hasn't been sufficiently described yet.

Emission intensity is several orders of magnitude weaker than bioluminescence. Sensitive photomultipliers and light-tight chambers are used for the detection of ultra-weak photon emission. The goal is to understand the mechanisms by which this emission is controlled and by which it may be affected. Since autoluminescence carries information about the metabolic processes in cells, it is needed to examine its relationship to the results of biochemical analysis of cellular processes [5, 6]. Together with the development of robust methods of its measurement, the possibilities of using this issue in medical diagnostics and other biochemical measurements, e.g., in the food industry is being examined [7].

## 4. RADIO-FREQUENCY RANGE

Unlike the events studied by the electrophysiology, the generating mechanism of radio-frequency electromagnetic phenomena in living systems is not connected with currents of ions and its frequency is, by definition, much higher. The most extensively studied examples include vibrations of electrically polar intracellular structures.

The vast majority of proteins bind an electrical charge in their structure which is necessary for their proper functioning. Mechanical vibrations of proteins and structures therefore form an oscillating electric field in their close vicinity. Scientists from the Institute of Photonics and Electronics developed methods for measuring very weak electromagnetic fields from biological systems under physiological conditions. Moreover, they examined their role in biological processes. Microtubules, polymer fibers from cell skeleton, whose vibrations occur within radio frequency waves, were used as a model structure.

Knowledge of these fundamental biophysical phenomena is important for assessing the effects of electromagnetic fields, such as those of mobile phones, on living organisms. The results of such research can be also applied in medicine.

The division cycle of eukaryote cells includes the separation of duplicated genetic information between two daughter cells, the so-called mitosis. Errors in this process usually lead to programmed cell death but undetected errors may cause cancer or hasten aging. Understanding how mitosis is governed and how it could be influenced is, therefore, important for (i) the evaluation of the role of external factors in disease formation and (ii) the development of novel therapeutic strategies. In their research [8], scientists from the Institute have computationally predicted that ultra-short electrical or mechanical pulses may cause vibrations of the mitotic spindle, the main functional machinery involved in mitosis. Its constituent electrically polar cytoskeletal polymers called microtubules then

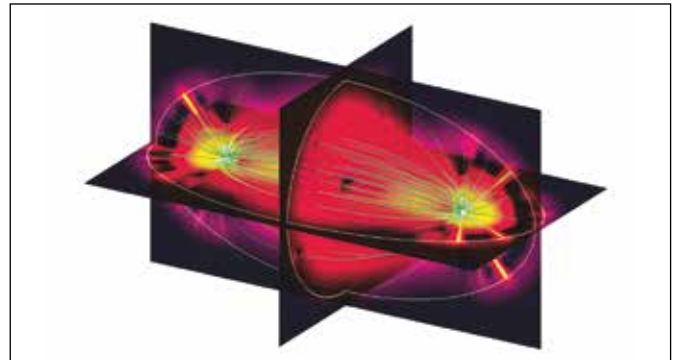


Fig. 1 An example of high-frequency electric field generated by vibrations of mitotic spindle constituted by 120 microtubules. The field was calculated for ellipsoidal model cell of equivalent radius of  $3.3 \mu\text{m}$  (the boundary of the cell is indicated by white line)

induce a strong rapidly changing electric field in the region where the mitosis takes place (see *Fig. 1* and *2* for an example).

Such high intensity of the generated field may in consequence disrupt the mitosis in progress. These results provide computational foundations for future analysis of possible mechanisms describing the effects of ultra-short electrical and mechanical pulses on dividing cells. The application of such pulses is prospective for future therapy against cancer.

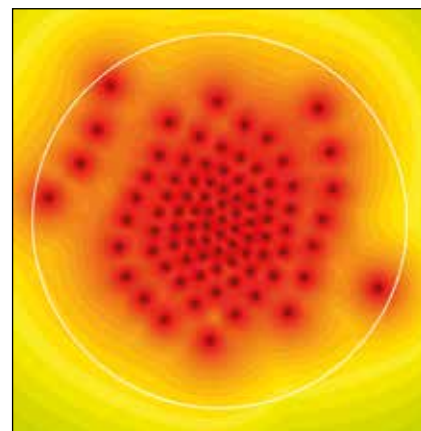


Fig. 2 An example of high-frequency electric field of vibrating mitotic spindle. The field is depicted in the mitotic midzone, where separation of duplicated genetic information takes place. The boundary of model cell is indicated by white line

Microtubules, polymer tubes of cellular skeleton, are involved in many more processes serving for various functions. Besides their role in cell mechanics and cell division, they also provide enormous substrate for cellular signaling. Scientists from the Institute combined the normal mode analysis of microtubules with the electric charge density distribution model of a microtubule. They showed *in silico* [9] that each normal mode of a microtubule is accompanied with the high-frequency electromagnetic field which is generated by vibrational movement of the charge. Combination of normal modes gives rise to transient phenomenon which can manifest itself as a pulsed excitation propagating along a microtubule (see *Fig. 3* for an example). It was speculated that such pulses can play role in cell signaling because they are of different nature than pure electrostatic interaction which is screened out on frequencies of normal modes of microtubules.

## 5. CONCLUSION

Brief review of hot topics in the field of bioelectrodynamics was presented. Future directions of research in the optical part of electromagnetic spectrum include detailed characterization of metabolic processes responsible for the emission with special attention



for applications in diagnostics of oxidative stress in cells. Future directions in radio-frequency range should be in experimental verification of predicted parameters of electromagnetic field generated by polar vibrations of biomacromolecules.

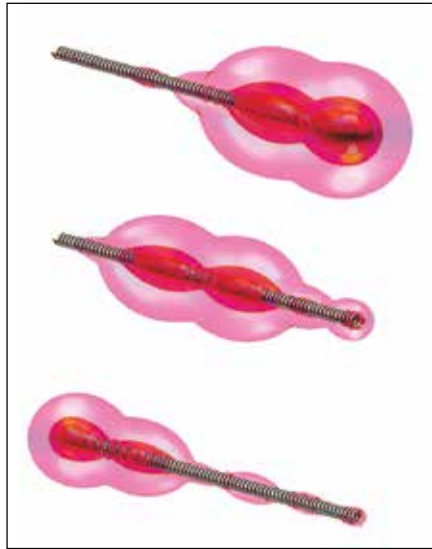


Fig. 3 An example of high-frequency electric pulse propagating along a microtubule. The pulse is propagating from the right side of 1.2  $\mu\text{m}$  long microtubule to the left. It is depicted as isoshapes of intensity of electric field in three different moments of time

Bioelectrodynamics Research Team,

Ing. Ondřej Kučera, Ph.D., e-mail: [kucera@ufe.cz](mailto:kucera@ufe.cz)

Ing. Daniel Havelka, Ph.D., e-mail: [havelka@ufe.cz](mailto:havelka@ufe.cz)

Ing. Michal Cifra, Ph.D., e-mail: [cifra@ufe.cz](mailto:cifra@ufe.cz)

Ústav fotoniky a elektroniky AVČR, Chaberská 57, 182 51 Praha 8 – Kobylisy. e-mail: [bioed@ufe.cz](mailto:bioed@ufe.cz)

*Jedná se o vědecký článek*

## References

- [1] O. Kučera, K. Červinková, M. Nerudová, M. Cifra: **Spectral Perspective on the Electromagnetic Activity of Cells**. *Current Topics in Medicinal Chemistry* **15/6** (2015) 513–22.
- [2] M. Cifra, J.Z. Fields, A. Farhadi: **Electromagnetic cellular interactions**. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* **105/3** (2011) 223–46.
- [3] H. Fröhlich: **Long-range coherence and energy storage in biological systems**. *International Journal of Quantum Chemistry* **2** (1968) 641–9.
- [4] J. Pokorný, T.-M. Wu: **Biophysical Aspects of Coherence and Biological Order**. Academia, Prague; Springer, Berlin-Heidelberg-New York. (1998).
- [5] M. Cifra, J. Pospíšil: **Ultra-weak photon emission from biological samples: Definition, mechanisms, properties, detection and applications**. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* **139** (2014) 2–10.
- [6] O. Kučera, M. Cifra: **Cell-to-Cell Signaling Through Light: Just a Ghost of Chance?** *Cell Communication and Signaling* **11/87** (2013) 1–8.
- [7] C.M. Gallep, T.A. Moraes, K. Červinková, M. Cifra, M. Katsumata, P.W. Barlow: **Lunisolar tidal synchronism with biophoton emission during intercontinental wheat-seedling germination tests**. *Plant Signaling & Behavior* **9/3** (2014) e28671, 1–5.
- [8] D. Havelka, O. Kučera, M.A. Deriu, M. Cifra: **Electro-acoustic behavior of the mitotic spindle: a semi-classical coarse-grained model**. *PLoS ONE* **9/1** (2014) e86501, 1–13.
- [9] D. Havelka, M. Cifra, O. Kučera: **Multi-mode electro-mechanical vibrations of a microtubule: In silico demonstration of electric pulse moving along a microtubule**. *Applied Physics Letters* **104/24** (2014) 243702, 1–4.

Alexander KUNA<sup>a</sup>, Vladimír SMOTLACHA<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Institute of Photonics and Electronics of the Czech Academy of Sciences, Praha

<sup>b</sup>CESNET z.s.p.o., Praha

## Time transfer using optical fiber links

*This paper describes our experience with time transfer using optical fibers and fully optical networks. We developed a technique and instrumentation for the comparison of distant time scales. These were first verified using a 740km optical loop within the Czech NREN backbone network and later a long term two-way optical time transfer between Czech and Austrian national time and frequency laboratories where the maintaining of their national time and frequency standards was evaluated. The optical link utilizes either dedicated optical fibers or Dense Wavelength Division Multiplex (DWDM) channels in all-optical production telecommunication networks. Results from the optical transfer, i.e. clock comparison and link delay including diurnal and seasonal effects are shown and also compared with a traditional time transfer using signals from the satellite navigation systems.*

**Keywords:** time, frequency, time transfer, optical fiber, optical network

### 1. INTRODUCTION

Accurate time transfer, i.e. time scale comparisons between two geographically distant sites is currently dominated by GNSS (Global Navigation Satellite Systems) based systems such as GPS, GLONASS, GALILEO or BEIDOU, however, the accuracy of GNSS-based time transfer depends on the distance between the

two sites and it degrades at distances over 1000 km. An alternative technology is required and it appears that optical fibers and optical networks are predetermined for such applications. They allow signal transfers up to a distance of  $\approx 100$  km without amplification and more than 2000 km (depending on the modulation) with optical

amplification. Fiber links are affordable in the recent years and backbone networks are being converted to DWDM (Dense Wavelength-Division Multiplexing) technology offering a lot of the so called “lambda channels”, which can be used for time transfer as well.

In cooperation with CESNET, the Czech NREN (National Research and Educational Network) provider, we established several optical links to our partner laboratories in the country and abroad and developed necessary instrumentation for the optical time transfer. Our system is an instance of a two-way transfer method that relies on the known and stable asymmetry of transport delay in both directions.

## 2. THEORETICAL BACKGROUND

We described the measurement method in detail in [1–2]. The basic idea is as follows: two adapters (A and B) at two remote sites are interconnected by a bidirectional optical link. Each adapter is provided with a 1PPS (Pulse Per Second) signal from a local clock and has an output representing the 1PPS signal received from the opposite site. The time interval counter (TIC) measures the interval  $x_A$  (resp.  $x_B$ ) between local and remote 1PPS.

On a symmetric link, the delay in both directions equals to  $\delta = \delta_{AB} = \delta_{BA}$ . In a real network, the fiber length in both directions slightly differs (e.g. due to patch cords in switching boards, fibers compensating the chromatic dispersion), and thus introducing the delay asymmetry  $\Delta$ :

$$\Delta = \delta_{AB} - \delta_{BA}$$

The clock offset  $\Theta_{AB}$  may then be calculated as

$$\Theta_{AB} = \frac{x_A - x_B - \Delta}{2}$$

## 3. EXPERIMENTAL MEASUREMENT

In 2009 we performed an experiment in order to verify the time transfer method and to assess the developed adapters on a long optical loop, see Fig. 1.

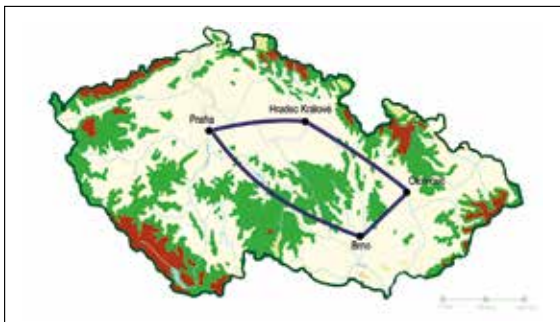


Fig. 1 Optical loop for experimental measurements and evaluation of time transfer using optical fibers

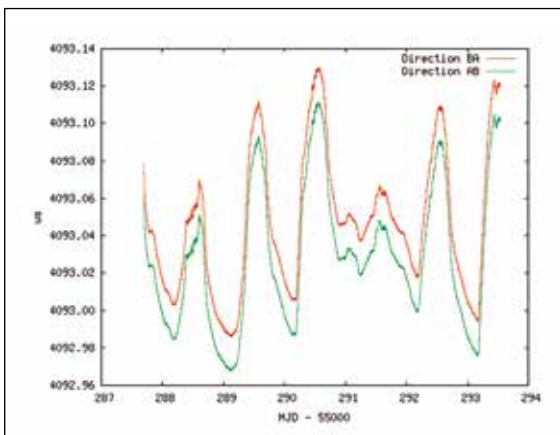


Fig. 2 Measured delay in both directions of the optical loop

Two unidirectional dedicated wavelength channels in the Cesnet2 network and the Praha metropolitan network PASNET were used in this experiment, for which a 744km optical loop between cities Praha – Brno – Olomouc – Hradec Králové – Praha was arranged. 1PPS signal from a GPS-disciplined Rb clock was transmitted in both directions and the loop delays were measured and analyzed. Diurnal variations of  $\approx 130$  ns in the link delays were observed. These were apparently caused by thermal effects on the fiber, however, the calculated time offset does not depend on particular delays  $\delta_{AB}$  and  $\delta_{BA}$ , but on their difference  $\Delta$ . Ideally,  $\Delta$  should be constant and its variations represent the accuracy of the time transfer.

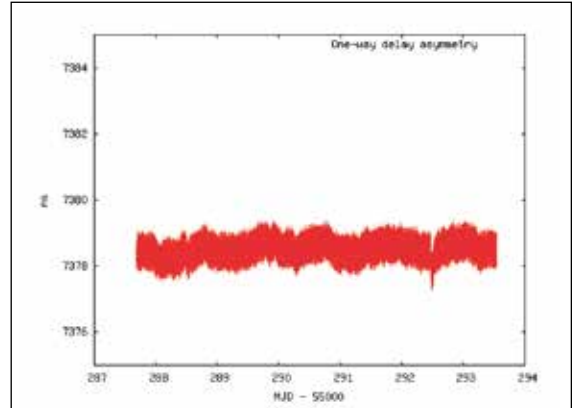


Fig. 3 Optical loop for experimental measurements and evaluation of time transfer using optical fibers

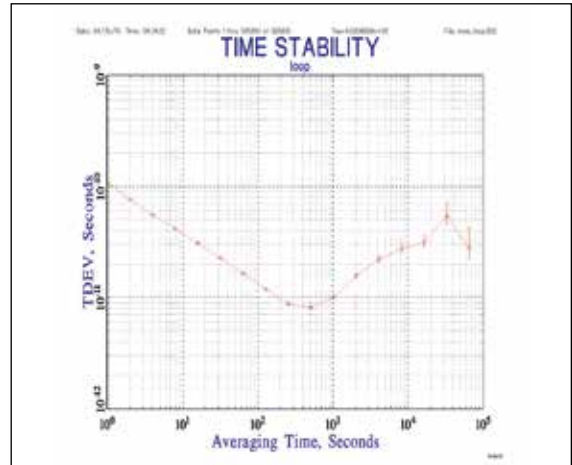


Fig. 4 Time stability of the optical time transfer through the experimental optical loop

Fig. 2 and Fig. 3 show the measured one way delays and the calculated clock offset, or background noise, respectively. Stability of the time transfer in terms of Time deviation denoted as TDEV or  $\sigma_x(\tau)$  was derived and the lowest value of  $\approx 8.1$  ps for the averaging interval  $\tau = 500$  s was achieved, see Fig. 4.

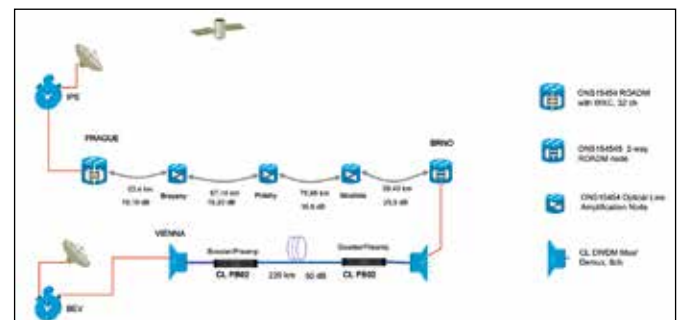


Fig. 5 Schema of the optical link between UFE and BEV

### 3. TIME TRANSFER BETWEEN PRAHA AND VIENNA

Since 2009, CESNET in collaboration with ACONET (Austrian NREN) arranged a fully optical link between UFE and BEV – Austrian national time and frequency laboratory in Vienna operating an atomic clock from which the Austrian national time scale UTC(BEV) is generated in a similar way as the Czech time scale UTC(TP) is generated in Praha.

Since then the atomic clocks in UFE and BEV are continuously compared and the results from the optical time transfer are checked with the results from the time transfer using GPS signals [3–5]. In addition, the measured clock difference is compared with the time differences published by the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) resulting from the calculation of UTC (Coordinated Universal Time) to which both the UTC(TP) as well as the UTC(BEV) contribute.

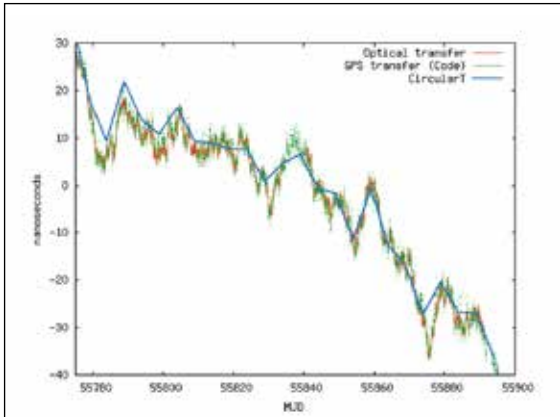


Fig. 6 Clock difference UTC(TP) – UTC(BEV) evaluated from the optical transfer, GPS transfer and BIPM data (Circular-T)

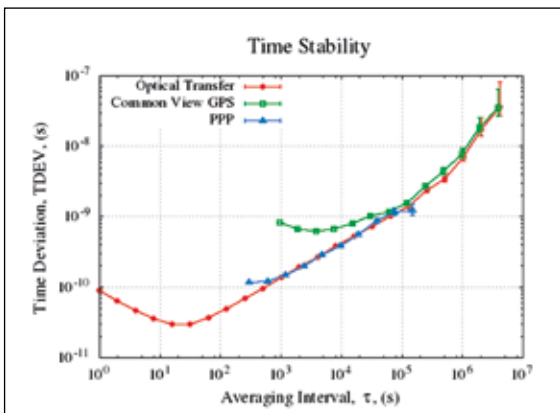


Fig. 7 Time stability of the clock difference UTC(TP) – UTC(BEV) obtained from the optical transfer, GPS transfer and BIPM data (Circular-T)

A schema of the link between UFE and BEV is depicted in Fig. 5. The link has 560 km in total. Fig. 6 displays the clock difference evaluated from the optical transfer together with the GPS transfer and the data as published by BIPM in their document denoted as Circular-T. The time stability of the clock difference UTC(TP) – UTC(BEV) in terms of Time Deviation TDEV is plotted in Fig. 7. It appears that the optical transfers can be used as a more accurate alternative to the traditional time transfers via signals of satellite navigation systems.

### 4. CONCLUSION

The functionality of the method and its adapters on a time transfer in a 740 km fiber in a real production network was verified and it was proved that the system is compatible with DWDM technology and does not interfere with other data channels.

The time stability of the time transfer with a minimum value of 8.1 ps in terms of TDEV at averaging time of 500 s was achieved. This value includes all the sources of inaccuracy, i.e. the noise in transmission channel, SFP transceivers, signal modulator/demodulator etc.

The optical time transfer system allowing a long-term time transfer between UFE and BEV was developed and implemented. The stability of the clock difference UTC(TP) – UTC(BEV) in terms of Time Deviation is better compared to the stability of the traditional transfer using signals of satellite navigation systems.

### References

- [1] V. Smotlacha, A. Kuna, W. Mache: **Time Transfer Using Fiber Links**. Proc. European Frequency and Time Forum (2010) 1–8.
- [2] V. Smotlacha, A. Kuna, W. Mache: **Time Transfer in Optical Network**. Proc. 42<sup>nd</sup> Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Reston, Virginia, USA, (U.S. Naval Observatory, Washington D.C.), (2010) 427–36.
- [3] V. Smotlacha, A. Kuna: **Time and Frequency Transfer in All-Optical Network**, Proc. Terena Networking Conference (2011).
- [4] V. Smotlacha, A. Kuna, W. Mache: **Optical Link Time Transfer between IPE and BEV**. Proc. 43<sup>rd</sup> Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting (2011) 27–34.
- [5] V. Smotlacha, A. Kuna: **Two-way optical time and frequency transfer between IPE and BEV**. Proc. European Frequency and Time Forum, Gothenburg, Sweden (2012) 375–8.

Ing. Alexander Kuna, Ph.D., Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd České republiky, v. v. i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8 – Kobylisy, e-mail: kuna@ufe.cz

RNDr. Ing. Vladimír Smotlacha, Ph.D., CESNET, z. s. p. o., Zikova 4, 160 00 Praha 6, e-mail: vs@cesnet.cz

*Jedná se o vědecký článek*

## Doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc. jubluje

Člen redakční rady tohoto časopisu oslavil dne 11. dubna 2015 své kulaté osmdesáté narozeniny. Dnešní emeritní pracovník Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd v Praze pochází z Olomouce, kde absolvoval všechna svá studia. Při studiu fyziky a matematiky na Přírodovědecké fakultě se zaměřil u *prof. Bedřicha Havelky* na optiku.

Prof. Havelka ho pak v r. 1959 přijal do Laboratoře optiky ČSAV v Praze jako inženýra asistenta. Pracoval v oddělení pro infračervenou optiku u *RNDr. Ing. Antonína Vaško, CSc.* (později obhájil vědeckou hodnost *DrSc.*) ve **spektroskopii a defektoskopii infračervených optických materiálů**. V r. 1963 byla Laboratoř zrušena a on přešel v rámci celého oddělení do Ústavu radiotechniky a elektroniky ČSAV. Po roce začal pracovat v nově zřízeném **oddělení laserového sdělování**, kde mezi prací pro oddělení dokončil samostatnou vědeckou přípravu a po některých průtazích obhájil v r. 1966 vědeckou hodnost *CSc.* na téma **Infračervené vlastnosti amorfních a sklovitých optických materiálů**. V té době ovšem končilo nadšení pro laserové sdělování vzduchem a bylo třeba najít si jiný nosný program.

Ten jubilant nalezl v **holografii**, která tehdy jako nový obor laserové optiky dobývala laboratoře. Postupně se přidali ostatní pracovníci oddělení optického sdělování zejména *Ing. Miroslav Chomát, CSc.* a *Ing. Jiří Janta, CSc.* Po získání počátečních zkušeností s technikou holografie se pracoviště zaměřilo především na **holografickou interferometrii**. Byly vyšetřovány kmitové vidy zejména elektroakustických převaděčů, mechanické a tepelné deformace strojních součástí apod. Po deseti letech se zdála být témata o interferometrii vyčerpána. Ředitel ústavu *prof. Ing. Václav Zima, DrSc.* tehdy převáděl část aktivity ústavu na **vláknové sdělování**. Jubilant dostal za úkol postavit přístroj na laserovou vizuální inspekci geometrických vlastností křemenných trubic pro vláknové reformaty, kterého se s úspěchem zhostil. Následoval úkol postavit **laserové měřidlo pro průběžné bezdotykové měření průměru vytahovaného optického křemenného vlákna**, které bylo realizováno v základním provedení s rozmítáním laserového paprsku pomocí kmitajícího zrcadélka a postupně zdokonalováno. V poslední, nejsložitější verzi byl k rozmítání použit **holografický rozmítač** s osmi výsečemi, v nichž byly holografické difrakční mřížky s 1800 čarami na milimetr. Rozmítač jubilant mezitím vyvinul v souvislosti s přenesením aktivit v holografii na difrakční mřížky. Kolega *Janta* navrhl jednoduchou kolimační optiku typu *f-theta*. K vyhodnocování měření byl využit digitální přístup a o přístroj se v tomto směru zasloužil další pracovník ústavu *Ing. Miroslav Ježek*. Přístroj byl dodán ve dvou provedeních např. firmě Sklo Union Teplice a o větší počet vyjádřil zájem Výzkumný ústav sklářský v Hradci Králové.

**Holografické difrakční mřížky** začal jubilant zkoumat v r. 1979 na podnět Vývojových dílen ČSAV, které prosadily dovybavení pracoviště argonovým iontovým laserem k holografickému osvětlení fotorezistu. Na tomto materiálu se vytvářely mřížky interferencí jako povrchová hloubková modulace sinusového průběhu. Vývojovým dílnám byly pak dodávány mřížky s 1200 čarami na milimetr do kapalinových chromatografů. Ke stejnému účelu byly dodávány mřížky i podniku Laboratorní přístroje až ve stovkových množstvích ročně. S jubilantem na této problematice spolupracovali *Ing. Miroslav Skalský, CSc.* a zejména *Ing. Marta Trísková*, která svým systematickým přístupem umožnila produkci větších sérií mřížek. Jubilant a jeho spolupracovníci též vyvíjeli mřížky na sférických podložkách, mřížky s blejzovaným profilem, galvanoplastickou produkci kopií „tvrdých“ mřížek aj.



Skupina také vyvíjela **holografickou velkoplošnou mřížku se zkříženými liniemi** a s 1250 čarami na milimetr pro měření souřadnic polohy stolku litografické kamery k výrobě integrovaných elektronických obvodů. Takovou kameru vyvíjel podnik Tesla Elstroj a skupina se dostala až na velikost mřížky potřebnou k expozici křemíkových salámků o průměru 4". Postupně mělo jít o mnohem větší průměry.

K mřížkovým aktivitám a zejména k bezdotykovému průběžnému měření příčného rozměru předmětu rozmítáním laserového paprsku se pojí jedenáct **ochranných dokumentů** (vynálezů a patentů), které jubilant inicioval a předložil se svými spolupracovníky.

Jubilant ovšem v souvislosti s rutinní „výrobou“ mřížek nezanedbával ani základní výzkum. Soustředil se na výzkum **mřížkových struktur v planární vlnodné optice** a tak se přizpůsobil novému zaměření oddělení, jehož vedoucím se stal *Ing. Jiří Čtyrkoký, CSc.* (později obhájil hodnost *DrSc.* a byl jmenován *profesorem*). Takové struktury byly vhodné např. pro formování vedených svazků a zejména pro navazování světla do planárních vlnodů a vyvazování z nich. Světově originální se stala pro tento účel mřížka se zakřivenými a neekvidistantními liniemi, která umožnila současně s navazováním nebo vyvazováním též formovat svazek.

Po sametové revoluci se však všechny produkční aktivity na jednu propadly, protože tuzemské podniky nestačily po otevření trhu konkurovat světovým výrobcům. Tehdy byly také odhlášeny uvedené vynálezy a patenty. Jubilant se stal **vedoucím oddělení** a převzal odpovědnost za vědeckou orientaci ústavu přijetím funkce **zástupce ředitele pro vědecké otázky**. V tu dobu také dokončil a v r. 1990 obhájil svou doktorskou *DrSc.* disertační práci na téma **Prostorové a časové charakteristiky holografického zobrazení**, kde zúročil své dlouholeté aktivity v oboru. Začal studovat holografické a obecně difrakční optické prvky a zejména problematiku kolimace optických svazků vystupujících z diodových laserů pomocí těchto prvků a jejich soustav. Na tuto a obdobnou problematiku získal postupně jako hlavní řešitel devět grantů jednak od GA AV a jednak od GA ČR a na dvou grantech se podílel jako vedlejší řešitel.

Tehdy byl také povolán k přednášení semestrálního kurzu o **základech difrakční optiky** na katedře optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého. K přednáškám vydal **skriptum** o základech difrakční optiky a posléze se i habilitoval. Přednáškovou aktivitu ukončil ve svých pětasedmdesáti letech, tj. v r. 2010, kdy se Přírodovědecká fakulta přestěhovala do nové budovy.

Odpřednášel i několik semestrálních kurzů o **optické holografii** na katedře chemické fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Karlovy univerzity a několikrát i konzultační formou pro jednotlivé zájemce. Pro tutéž katedru pořádal téměř celé desetiletí **speciální praktikum z optoelektroniky** o holografických difrakčních mřížkách zahrnující optimalizaci záznamu a měření spektrální difrakční účinnosti. Na katedře byl také veden jako externí pracovník.

Od r. 1988 jubilant vedl pět diplomových prací a čtyři doktoraty dovedl k úspěšné obhajobě (jeden další nepředložil práci a nedokončil tak doktorské studium). Byl krátce členem oborové rady doktorského studia oboru fyzikální elektronika na FJFI ČVUT, působil dlouhou dobu jako obdobný člen oboru kvantová optika a optoelektronika na MFF KU a dosud je členem oboru **Procesní inženýrství** (předtím Přesná mechanika a optika) na SJF ČVUT. Na katedře přesné mechaniky a optiky působil po r. 1989 řadu let jako člen státní závěrečné zkušební komise.

Bohatá je jubilatova činnost publikační. Publikoval několik desítek vědeckých prací v mezinárodních časopisech, z nichž série několika nejdůležitějších se zabývala již shora uvedenými **fokusujícími vazebními mřížkami** v rozmezí roků 1979-81. Nezanedbával ani publikování v českých odborných časopisech, zejména v Jemné mechanice a optice, protože si uvědomoval, že holografie v sobě obsahovala velký aplikační průmyslový potenciál. Protože více než desítku let se věnoval vývoji mřížek a s nimi souvisejících komponentů a přístrojů, není jeho vědecká a odborná publikační činnost ještě rozsáhlejší.

Kromě časopiseckých publikací vydal také řadu knižních publikací. První etapa jeho činnosti vymezená vědeckou přípravou CSc. byla završena knížkou **Vibrační spektroskopie** (SNTL Praha 1966), kterou sepsal se spoluautorem *V. Malíškem*. Knižka byla vydána v anglickém překladu nakladatelstvím Iliffe Books London 1970. Pro holografickou etapu je příznačná knížka **Holografie (teoretické a experimentální základy a její použití)** (SNTL Praha v r. 1974). Knižka byla přeložena do němčiny (Verlag Karl Thiemig München 1978) a rok na to vyšla i v ruském překladu upraveného českého vydání (Mašinostrojenije Leningrad 1979) s úvodním slovem jednoho z průkopníků holografie *Jurije Nikolajeviče Děnisjuka*. V r. 1980 přispěl statí **Holografická interferometrie fázových objektů** (str.105-125) do Studie ČSAV č.15/1980 Technika zobrazení fyzikálních polí autora *J. Sequense*. Jako editor a spoluautor všech kapitol vystupuje v publikaci **Fyzika a holografické difrakční struktury**, kterou vydala JČSMF v r. 1988. Tato publikace shrnuje všechny aktivity spojené s teorií a technologií holografických difrakčních mřížek.

Jubilantovým zvláštním zájmem bylo učivo fyziky na střední škole, zejména optiky. Ještě před r. 1989 byl vyzván, aby přispěl v tomto směru do rozvíjející učebnice **Doplňk k učivu fyziky pro IV. ročník tříd gymnázií se zaměřením na matematiku** (SPN Praha 1988) odpovědného autora *V. Freie* za kol. čtyř autorů. Jubilant přispěl kapitolou Světlo a záření s odstavci o základních pojmech, o optických soustavách a zobrazení a o vlnových vlastnostech světla. Později pak letoroval učebnici **Fyzika pro gymnázia Optika** (SPN Praha 1993) autorů *O. Lepila* a *Z. Kupky*.

Kromě těchto publikací vyznačujících se poměrně úzkým okruhem autorů se jubilant zúčastnil také dvou projektů širších. Prvním byla **Oborová encyklopedie Lasery a moderní optika** (Prometheus Praha 1994) odpovědné autorky *M. Vrbové* za kol. 11 spoluautorů, kde jubilant zpracoval hesla o holografii a přispěl také k heslům o využití laserů. Kniha byla připravena do tisku ještě před r. 1989 a hrozilo jí, že nebude vydána. Nakonec k vydání přispěla Akademie věd ze svého publikačního fondu. Druhým projektem byl **Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz** (Prometheus Praha 1999) odpovědných autorů *E. Mechlové* a *K. Košťála* za kol. 29 spoluautorů. Jubilant zpracoval jako garant optiku s pěti

kapitolami (vlnová optika, kvantová optika, technická zobrazovací optika, oční optika a metrologická optika) a na ní spolupracoval se sedmi členy katedry optiky Přírodovědecké fakulty UP.

Jubilantovi nebyla cizí ani společenská aktivita jak v tuzemských, tak mezinárodních profesních sdruženích a organizacích. Působil od konce sedmdesátých let řadu volebních období v Jednotě československých matematiků a fyziků (JČSMF) - a posléze i českých - jako funkcionář na různých úrovních až po ústřední čili hlavní výbor, a to zejména na pozicích hospodáře až do poloviny devadesátých let. Stal se zasloužilým a později i čestným členem Jednoty. Téměř od samého začátku v polovině devadesátých let až do současnosti byl ve výkonném výboru České a Slovenské společnosti fotoniky (ČSSF) a zúčastnil se činnosti při organizování několika pravidelně konaných konferencí Photonics Prague. Skrze tuto společnost byl členem Evropské optické společnosti (EOS - European Optical Society) a stal se v r. 2007 jejím čestným členem EOS (Fellow of the Society) jako projev obdivu a uznání za výjimečné úspěchy a službu optické a fotonické obci. V polovině devadesátých let se stal členem SPIE (The International Society for Optics and Photonics). Když se evropská odnož SPIE rozhodla od r. 2007 pořádat každý lichý rok v Praze kongres Optics and Optoelectronics zúčastnil se jubilant jejich organizování. Nejprve jednou jako spolupředseda konference Optické senzory, později dvakrát jako spolupředseda konference Holografie: pokroky a moderní trendy a posléze po dvakrát se stal čestným předsedou kongresu. Za práci pro tyto kongresy byl pak vyzván, aby se ucházel o zvolení stát se *starším členem SPIE* (Senior Member of the SPIE). V r. 2012 se tak stalo s odůvodněním, že se tím hodnotí jeho významné úspěchy pro optickou a fotonickou obec. Nelze nepřipomenout zásluhy jubilanta o znovuoústavení Českého komitétu Mezinárodní komise **pro optiku** (Czech Committee of International Committion for Optics) po rozdělení Československa. Byl po dvě volební období jeho předsedou a posléze až dosud zastává funkci místopředsedy.

Ze subjektivního hlediska popsal jubilant svou životní pouť v rozhovoru s redakcí Jemné mechaniky a optiky v souvislosti se svými pětasedmdesátinami v čísle 4 roku 2010 (str. 129-30, viz: [jmo.fzu.cz](http://jmo.fzu.cz)), které bylo věnováno výzkumu optických vláken v ÚFE v souvislosti s udělením Nobelovy ceny rok předtím *Ch.K. Kaovi*.

Přejeme jubilantovi další dlouhá aktivní léta v jeho profesní činnosti, která pro něj byla vždy nejen zaměstnáním, ale především posláním. Kromě toho se odjakživa vyžíval v technickém zaměření jak v oblasti navrhování mechanických a stavebních součástí a celků, tak v jejich zhotovování, protože je neobyčejně manuálně zručný. A to, aby mu vyplňovalo jeho život co nejdéle.

Za kolektiv jemu blízkých **Pavel Peterka**

# Začátky výzkumu optické holografie

V r. 1966 bylo oddělení zabývající se **Optickým sdělováním** laserovým svazkem vzhledem ke svému zaměření na rozcestí. Tehdy se nabízelo studovat staronovou oblast, kterou byla **holografie**. Ta totiž od svých prvopočátků v r. 1948, kdy ji založil *Denis Gabor*, prošla jen malou část svého vývoje. Po vzniku laseru se jí však začala zabývat dvojice vědců *prof. Emmett Leith* a jeho doktorand *Juris Upatnieks* z University of Michigan z hlediska uplatnění kvalitního laserového světla pro tento záznam. Ti začali od r. 1962 postupně publikovat práce o tzv. **rekonstrukci vlnoplochy**. Na stejné univerzitě však působil odborník na optické difrakční mřížky *prof. Georg Stroke*, který se snažil na sebe v této oblasti strhnout pozornost a publikoval řadu krátkých článků o holografii, kterou on právě tak podle *Gabora* nazýval. Tyto publikace se dostaly do rukou autora tohoto článku a ten se začal touto problematikou zabývat. V jednom článku *Stroke* otiskl fotografii fotografické desky s textem, že jde o hologram. Tato fotografie byla plná difrakčních kroužků, o kterých se autor domníval, že jsou podstatou tohoto záznamu. Ofotografoval si ji a prosvítil laserovým svazkem. Žádnou rekonstrukci nedostal, ale objevila se difrakce na bodové struktuře tištěného obrázku, totiž difrakce na dvourozměrné mřížce. Postupně se autor dopracoval k představě, že je třeba dosáhnout interference mezi dvěma větvemi laserového svazku, v jedné z nichž se nachází informace o předmětu.

Práce o rekonstrukci vlnoplochy byly trochu odtažitě a autor jim nevěnoval pozornost, protože mu zpočátku ani nedošlo, že jde o jiné pojmenování téže věci. Tehdy se rozmohlo žádání o reprinty článků a kopie článků byly rozesílány i na různá pracoviště bez požádání. Tak autorovi došel článek publikovaný v barevném časopisu zabývající se také popularizací vědy, který se nazýval **The train that wasn't** a jehož autorem byl redaktor s českým jménem, které si autor už nevybavuje. V článku byla pěkná fotografie modelu vláčku umístěného za mírně rozptylující skleněnou deskou. Text uváděl, že jde o holografickou rekonstrukci. Byla to zřejmě předváděcí akce z michiganské univerzity pro tisk. Autorovi je záhadou, jak se zmíněný redaktor dostal k tomu, že poslal článek právě jemu, protože autor ještě nic o začátcích svého výzkumu holografie nezveřejnil.

Posléze autor sestavil jednoduchý interferometr, kterým bylo možno zaznamenat interference mezi dvěma svazky vzniklými rozdělením jednoho svazku na základě dělení amplitudy, tedy na rozhraní mezi sklem a vzduchem. Do jedné větve vložil diapozitiv a tak získal holografický interferometrický záznam obrázku na diapozitivu. Protože měl k dispozici fotografickou desku *ORWO Mikrat* s ne příliš vyšším rozlišením, než měla běžná fotografická deska, musel být úhel mezi interferujícími svazky poměrně malý. K rozdělení svazku bez interferenčního efektu na dělicí desce použil střeškový hranol. První úspěšný pokus představil české vědecké veřejnosti článkem v Čs. časopise pro fyziku. Faksimile tohoto článku je na *obr. 1*.

V témž měsíci – prosinci 1966, kdy byl tento článek doručen redakci, opublikovalo tehdejší Rudé právo rozhovor s *Ing. Miroslavem Hythou, CSc.*, vědeckým pracovníkem a vedoucím skupiny Výzkumného ústavu pro sdělovací techniku A.S. Popova (VÚST) v Praze, ve kterém prezentoval holografickou rekonstrukci autíčka. Záznam byl proveden toutéž metodou rozdělení vlnoplochy, kterou pracovali *Leith* a *Upatnieks*, totiž osvětlením holografované scény a zrcadla umístěného vedle scény, které odráželo část svazku na záznamovou desku jako referenční svazek. Autorovi bylo už známo, že tento pracovník předtím pobýval ve Spojených státech, aby se

## ČESKOSLOVENSKÝ ČASOPIS PRO FYSIKU

Ročník A 17 (1967)

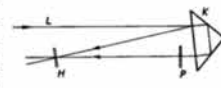


Obr. 2 Rekonstruovaný obraz testu.

### DOPISY REDAKCI

#### HOLOGRAFIE ROZDĚLENÍM AMPLITUDY HOLOGRAPHY BY DIVISION OF AMPLITUDE

Interferenci světelných vln je možno získat buď skládáním kmitů různých částí vlnoplochy (rozdělení vlnoplochy), nebo skládáním kmitů amplitudově rozdělené vlnoplochy (rozdělení amplitudy) [1]. Prvního způsobu interference užíli *LEITH* a *UPATNIEKS* [2] a po nich celá řada autorů k novému způsobu dvoufázového zobrazení koherentními optickými vlnami – holografii. Při holografii se na fotografickou desku fixuje nejen amplitudové rozdělení v obraze, ale i fázové poměry. *LEITH* a *UPATNIEKS* zdokonalili původní *GABOROVU* [3] holografickou metodu v tom, že od svazku nulového řádu prostorově oddělili skutečný a zdánlivý obraz, které vznikají v druhé fázi holografického procesu při rekonstrukci vlnoplochy.



Obr. 1. Schéma uspořádání. L – laserový svazek, K – optický hranol, P – plošný předmět, H – rovina hologramu.

Obr. 2., viz str. 442a

Holografická interference rozdělením amplitudy je obtížnější, protože se v první fázi holografického procesu musí odstranit rušivá interference mezi vlnoplochy, které se postupně amplitudově rozděluje na rozhraní desky mnohonásobným odrazem. Tuto nesnáž odstraníme tlustou deskou nebo optickým hranolem.

Použití optického hranolu pro transparentní amplitudový nebo fázový předmět je uvedeno na *obr. 1*. Z dopadajícího svazku se na rozhraní mezi sklem a vzduchem odrazí referenční svazek. Větší část intenzity původního svazku prochází do hranolu a po úplných odrazech na zadních stěnách vystupuje z hranolu, prochází zobrazovaným předmětem a dopadá na fotografickou desku v místě dopadu referenčního svazku. Protnutí obou svazků na fotografické desce se dosáhne vhodným natočením hranolu. Přitom toto natočení a dlouhá dráha svazku v hranolu vyloučí interference mezi vícenásobně odraženými svazky, protože se tím tyto svazky od sebe dostatečně oddělí.

Na *obr. 2* je rekonstruovaný obraz rozlišovacího figurálního testu, získaný uvedenou metodou. Jako zdroje bylo užito laseru He-Ne ( $\lambda = 632,8$  nm), který dával v monomodálním režimu *TEM<sub>00</sub>* výkon 3 mW. Svazek laseru byl rozlišen teleskopickou soustavou. Za optický hranol sloužila kostka Porrovy převraccí soustavy dalekohledu. Hologram byl snímán na fotografickou desku *ORWO Mikrat*.

Došlo 27. 12. 1966

MIROSLAV MILER  
Ústav radiotechniky a elektroniky ČSAV,  
Praha

#### Literatura

- [1] BORN M., WOLF E.: Principles of Optics. Pergamon Press, New York 1959.
- [2] LEITH E., UPATNIEKS J.: J. Opt. Soc. Am. 52 (1962), 1123.
- [3] GABOR D.: Nature 161 (1948) 777.

Čs. Čas. Fys. 17 (1967)

379

Obr. 1 Faksimile prvního článku autora o holografii.

zřejmě na pracovišti michiganské univerzity seznámil s holografií. Jak se autor o tom dozvěděl? Jako obvykle jednou poslouchal relaci českého vysílání Hlasu Ameriky, kde *Ing. Hytha* dával rozhovor tamnímu redaktorovi. V těžkých dobách totalitního režimu bylo těžké si jen představit, že by se takový občan mohl bez problémů vrátit do vlasti. Naopak v tomto případě dokonce Rudé právo věnovalo jeho experimentálním výsledkům značnou pozornost!

Autor se pak nadále věnoval zdokonalování metody rozdělení amplitudy, což mu bylo později velice k užitku, protože byla výhodná k záznamu holografických difrakčních mřížek, kterému pak věnoval dlouhé období svého profesního zaměření.

M. Miler

# První laserová operace oční sítnice v Československu

„V polovině roku 1964 přivedl MUDr. John do naší laboratoře děvče, které mělo zcela roztrhanou sítnici. Pro lékařský zákrok nebylo možné použít klasický postup operace, ani operaci pomocí nekoherentního Lichtkoagulátoru. Pacientka měla jedinou šanci, a tou byla aplikace laserového záření ...“  
vzpomínají nestoři české laserové fyziky a kvantové elektroniky Jan Blabla a Viktor Trkal.

V roce 1960 *Theodor H. Maimann* z Hughes Research Laboratories publikoval nový zdroj světla - laser [1, 2]. V rubínové tyčince s relativně nízkou koncentrací chromu (0,05%) dosáhl zesílení stimulované emise a následně generace červeného světla o vlnové délce 694,3 nm. Tento proces umožnily mimo jiné dokonale opticky opracované planparalelní čelní plochy tyčinky (planparalelita několik úhlových vteřin) pokryté vakuově napařeným stříbrem. Čerpacím zdrojem světla byla spirálová výbojka, která dodala potřebnou světelnou čerpací energii (asi 2,5 kJ) v žlutozeleném spektru světla. Maimannův experiment tak potvrdil teoretickou předpověď publikovanou v roce 1958 *A.L. Schawlowem* a *C.H. Townsem* [3].

„V ÚŘE-ČSAV jsem zachytil tuto zprávu s většimi podrobnostmi v r. 1961. Díky porozumění vedoucího oddělení kvantové elektroniky *RNDr. Viktora Trkala, CSc.* jsem problematiku laserů nastudoval a spolu s dvěma dalšími pracovníky oddělení připravoval realizaci podobného experimentu<sup>1)</sup>. Kontaktoval jsem *Ing. V. Kmentu*, který se zabýval v Chemickém komplexu v Ústí nad Labem pěstováním rubínových krystalů Verneuilovou metodou“ (*J. B.*). V roce 1962 bylo možné z tohoto pracoviště získat již opticky velmi dokonalou surovinu a následně i první rubínové válečky. Optickou dokonalost válečku jsme dořešili díky naší přátelské spolupráci s *RNDr. Ivanem Šolcem, CSc.* z Monokrystalů Turnov. Díky dlouhodobé tradici v oboru přesných optických metod a zkušenostem v broušení krystalů na řadě pracovišť v Turnově jsme měli ještě téhož roku k dispozici několik kusů laserových válečků. Pro odrazné plochy jsme použili jednak vakuové postříbení, jednak v kontaktu s *RNDr. Zdeňkem Knittlem, CSc.* z Meopty Přerov dielektrické tenké vrstvy.

Problémy nastaly s výbojkou. Získali jsme pouze jednu spirálovou výbojku, která se nešťastnou náhodou rozbila. Díky osobním kontaktům, které oddělení kvantové elektroniky mělo s pracovníky Akademie věd SSSR v Moskvě v programu čpavkového maseru, jsme dostali několik výbojek tvaru „U“. To vedlo ke změně technického řešení laseru.

Se zkouškami našeho laseru jsme začali v druhé polovině r. 1962. Měli jsme k dispozici asi deset rubínových výbrusů, postupně jsme je vystřídali a vyřazovaly ty, které neměly šanci na úspěch. Vylepšovali jsme i optickou kvalitu dielektrických vrstev, což vedlo obvykle k dosti značným časovým průtahům. Vedle zvýšení účinnosti přenosu optické energie výbojky do krystalu jsme zavedli i chlazení krystalu laseru pomocí par z tekutého dusíku. **Zesílení stimulované emise jsme pozorovali již u prvních experimentů v r. 1962, generace nastala až v r. 1963 (obr. 1). V květnu téhož roku jsme dokumentovali generaci laseru předvedením veřejnosti ve zcela zaplněném Planetáriu v pražské Stromovce.**

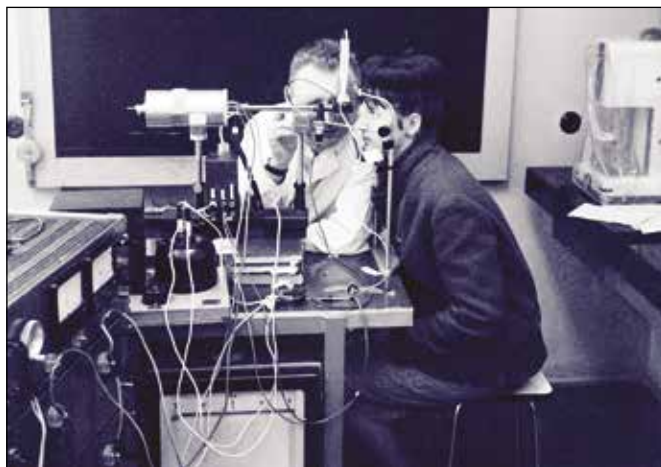
Záhy po úspěšném spuštění laseru nás navštívil *MUDr. Jan John* z Institutu pro další vzdělávání lékařů a farmaceutů z nemocnice na Bulovce. Zabýval se mimo jiné fotokoagulací bílkovin v sítnici oka s použitím nekoherentního zdroje optického záření pro operační postupy u pacientů. (Lichtkoagulátor 5000, Zeiss). Odchlípená sítnice pacientů není vyživována, postupně odumírá a ztrácí se vidění. Světelný impuls, fokusovaný oční optikou přitlačí sítnici k fundu, dojde k zánětlivému procesu a následnému spojení s výživnou tkání. Léze po zásahu od nekoherentních optických zdrojů jsou značně velké. Vyžaduje se tu rovněž výrazně větší

energie koagulačního zdroje světla. Laserové koherentní záření je mnohem účinnější, léze jsou podstatně menší a efektivnější. S MUDr. Johnem jsme proto domluvili použití laseru při experimentech na očním pozadí u králíků, kteří mají strukturu oka velmi blízkou oku člověka. Výsledky těchto experimentů byly pozitivní a velmi užitečné pro další aplikaci na lidském oku.



Obr. 1 Rubínový laser v ÚŘE ČSAV, zleva Alena Jelínková, Jan Blabla a Miroslav Vendl (1963).

V polovině roku 1964 přivedl MUDr. John do naší laboratoře děvče, které mělo zcela roztrhanou sítnici. Pro lékařský zákrok nebylo možné použít klasický postup operace, ani operaci pomocí nekoherentního Lichtkoagulátoru. Pacientka měla jedinou šanci, a tou byla aplikace laserového záření. Technické uspořádání operačního postupu vyžadovalo vedle spolehlivé operace ochranu operujícího před zpětným odrazem laserového svazku. Ještě též den provedl MUDr. John první laserovou operaci sítnice (obr. 2). Odchlípnutá sítnice byla přitlačena k fundu několika laserovými záblesky a vzniklé léze potvrdily, že došlo ke koagulačnímu účinku a vyvolání potřebného zánětlivého procesu. Po několika dnech nám MUDr. John sdělil, že výsledek operace je nadmíru uspokojivý a oko je zachráněno. To vyvážilo řadu našich nočních experimentů a pracovníci nesnázi při uvádění rubínového laseru do života. Vytvořilo to dobrou platformu i pro to, abychom se zabývali po odborné stránce pracemi souvisejícími s fotokoagulací bílkovin



Obr. 2 První laserová operace sítnice v laboratoři odd. kvantové elektroniky ÚŘE ČSAV (1964)

v odborné stránce pracemi souvisejícími s fotokoagulací bílkovin v oku, s převodem tepla do fundu oka a okolní tkáně a s řadou technických problémů souvisejících s návrhem spolehlivého zařízení pro další možné operace.

Z pracovních výsledků vzniklo zařízení - **Kvantový fotokoagulator** - vhodné pro operaci sítnice rubínovým laserem (obr. 3). V laserové hlavici spojené s oftalmoskopem pro vyšetření očního pozadí byla použita asi 10 cm dlouhá výbojka o průměru obdobném průměru rubínové tyčinky (asi 6 mm). Účinnost laseru byla zvýšena uložení rubínové tyčinky a čerpací výbojky do ohnisek eliptického optického odražeče a doplněna ochlazováním laseru vzduchem. Laser byl navržen spolu s oftalmoskopem jako krátká hlavice, kterou operující může držet v ruce obdobným způsobem jako při práci s oftalmoskopem. Laserová hlavice s oftalmoskopem vážila asi 650 g [4, 5].



Obr. 3 Kvantový koagulator pro laserovou operaci sítnice. Byl realizován v ÚŘE ČSAV a úspěšně otestován v kooperaci s MUDr. J. Johnem v nemocnici na Bulovce

Zařízení bylo předáno **Institutu pro další vzdělávání lékařů a farmaceutů** do nemocnice na Bulovce v Praze, kde jenom v prvním roce využívání s ním bylo operováno přes 1000 pacientů. Další čtyři vyrobené přístroje našly své místo na oční klinice Všeobecné fakultní nemocnice v Praze na Karlově náměstí, v nemocnici v Mostu a v Bratislavě.

Laserová operace sítnice byla jistě pozitivním krokem v našem laserovém programu. I když rubínový laser byl pro tyto účely nahrazen později jinými typy laserů (např. argonovým) znamenalo jeho použití v očním lékařství rychlý bezbolestný zásah bez klasických operačních postupů. „Tuto situaci dokážu dnes plně ocenit, když jsem před třemi léty podstoupil »paradoxně« klasickou tříhodinovou operaci sítnice, s jejímiž důsledky se potýkám dodnes.“ (J.B.). Osobní zkušenost s operací oční sítnice měl i druhý z autorů (V.T.), který vzpomíná: „Ve svém volném čase jsem se od gym-



Obr. 4 Rubínový laser v rozloženém stavu: mezi výbojky se uchytuje rubínový krystal (tyčinka v popředí), čtyřeliptická dutina se použila k dosažení vyšší účinnosti čerpacího záření (květen 1963)

naziálních studií věnoval atletice, nejprve jako závodník, později jako trenér, rozhodčí a činovník. Na jaře 1972 jsem při procházce s rodinou v Dáblickém háji na výzvu své jedenáctileté dcery »Aronne skoč« skočil na nezajištěnou závoru přes cestu, která spadla i se mnou a já se rozbitým sklem brýlí poranil pod levým okem. V červnu téhož roku, při návratu ze závodů v Domažlicích jsem zjistil, že přestávám na toto oko vidět. Na Bulovce hned zjistili poškození sítnice a krvácení do oka a tak jsem následující den byl asi jako 2000 pacient operován našim fotokoagulatorem. Lze odhadovat, že na čtyřech našich zařízeních bylo v té době úspěšně operováno nejméně 6000 pacientů. Po dvou na Bulovce strávených nocích jsem byl zdravý a propuštěn domů. Od té doby jsem na toto oko viděl lépe než na druhé, nezraněné. V témž roce jsem v srpnu mohl bez potíží absolvovat jako »šéftrenér« naší atletické výpravy OH v Mnichově a prožil jsem tam i hrůzné napadení izraelské výpravy islámskými teroristy. Snad i to stojí dnes za připomenutí.“

Další podrobnosti o počátcích laserové fyziky a kvantové elektroniky v ÚŘE může čtenář najít v článku o historii ÚŘE v tomto čísle a ve speciálním dvojčísle Československého časopisu pro fyziku z roku 2010, které bylo celé věnováno 50. výročí vynálezu laseru [6].

<sup>1)</sup> Ing. Alena Jelínková, Miroslav Vendl a později Ing. Václav Soukup.

#### Literatura

- [1] T. H.Maimann, Nature 187, 493 (1960)
- [2] T. H.Maimann, Phys. Rev.123, 1145 (1961)
- [3] A. L. Schawlow, C.H.Townes, Phys.Rev. 112, 1940 (1958)
- [4] J. Blabla, J. John, A.Jelínková, M.Vendl, Čs. Oftalmol. 21, 281 (1965)
- [5] J. Blabla, V. Soukup, Slaboproudý Obzor, 31 263 (1970)
- [6] J. Blabla, V. Trkal, Československý časopis pro fyziku, 60 221 (2010)

Jan Blabla, Hudební vydavatelství a nakladatelství Spectrum, bývalý pracovník Ústavu radiotechniky a elektroniky ČSAV (nyní Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR) a Českého metrologického institutu, spectrum@bla.cz  
Viktor Trkal, bývalý pracovník Ústavu radiotechniky a elektroniky ČSAV (nyní Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR) viktor.trkal@seznam.cz



# Komunikace pomocí laserového svazku v atmosféře – jedno z prvních uplatnění laseru

Brzo po úspěšném sestavení rubínového laseru v našem ústavu na přelomu let 1962/63 bylo ustaveno nové oddělení **Optické sdělování**, jehož posláním bylo provádět výzkum optického přenosu informací atmosférou pomocí laserového svazku. Toto nasměrování výzkumu odráželo velká očekávání, která se ve světě vkládala do optického sdělování krátce po vynalezení laseru. Do oddělení byli přiděleni i autoři tohoto sdělení.

Prvním úkolem bylo postavit helium-neonový (He-Ne) laser vysílající červené světlo na vlnové délce 633 nm, který by byl vhodný pro zamýšlené experimenty, protože jeho získání ze zahraničí nepřicházelo z řady důvodů v úvahu. To se podařilo i díky spolupráci s řadou pracovníků z jiných oddělení ústavu a z jiných čs. výzkumných pracovišť (např. zrcadla byla dodána *doc. RNDr. Zdeňkem Knittlem, CSc.* z Ústavu pro výzkum optiky a jemné mechaniky (ÚVOJM) v Přerově a výrobová trubice *Ing. Milanem Kutíkem, CSc.* z Výzkumného ústavu vakuové elektroniky (VÚVET). Zvláště cenné byly přítom zkušeností a pomoc *Ing. Jana Blably, CSc.*, vedoucího pracovníka oddělení kvantové elektroniky ústavu. Byl sestaven rezonátor se základnou z plechu s malým teplotním koeficientem roztažnosti ve tvaru nízkého U a délky kolem 1 m, na jehož koncích byly umístěny držáky zrcadel s jemným úhlovým i délkovým nastavováním. Napájecí zdroj byl postaven v ústavu. Optický výkon laseru byl měřen měřidlem od VÚVET a činil několik málo mW. *Ing. Kutík* byl také nápomocen s justáží laseru.

Současně byla postavena nosná konstrukce laseru s možností jemného vodorovného a výškového natáčení. Pro rozšíření a kolimaci laserového svazku navrhl druhý z autorů sestavu s mikroskopovým a dalekohledovým objektivem s možností jemného posuvu dalekohledového objektivu. Ke kolimátoru byl vhodně upevněn puškový dalekohled, aby bylo možno provést rektifikaci laserového svazku na objekt v dalekohledu. Rektifikace byla postupně zpřes-

ňována na větší vzdálenosti. Nejprve se „svítilo“ na patu komínu staré cihelny v blízkosti ústavu, potom na petřínskou rozhlednu, později na svah pod Ohradou v Praze – Žižkově vzdáleném asi 4,5 km a nakonec na Výzkumný ústav sdělovací techniky (VÚST) A.S. Popova vzdálený přes 10 km. Všechny tyto objekty byly viditelné z věžičky ústavu, protože tehdy ještě nexistovala později vybudovaná rozsáhlá bytová výstavba. Byly prováděny experimenty pro získání poznatků o šíření vysoce směřovaného laserového svazku atmosférou nad různými oblastmi městské zástavby Prahy.

Velké pozornosti médií se zejména těšila rektifikace na svah pod Ohradou. V tehdejší *Rudém právu* ze 13. 5. 1966 byl pod iniciálami –ik– uveřejněn článek, který vyzdvihoval dosažené úspěchy a ke kterému byla přiložena fotografie s titulkem *Rudá záře nad Prahou (obr. 1)* jako reminiscence k románu A. Zápotockého *Rudá záře nad Kladnem*. V důsledku vzduchových turbulencí a také nepřesné kolimace byl průměr stopy laserového svazku pod Ohradou asi kolem 3 m.

Zatímco první tři terče byly pouze orientační, teprve až světlo směřované na VÚST mělo sloužit k přenosu informace. Byl přenášán amplitudově modulovaný akustický signál. Podle dostupných informací to byl první úspěšný pokus o přenos informace volným prostorem (FSO - Free Space Optical Communication) pomocí laseru v Československu. Laserový svazek byl modulován elektrooptickým modulátorem vyvinutým *Ing. Bohumilem Stádníkem, CSc.* (později *DrSc.*). V modulátoru se používaly elektrooptické krystaly ADP a KDP vypěstované ve výzkumném ústavu monokrystalů (VÚM) v Turnově, nyní CRYTUR, s. r.o. Ukázalo se však, že pro značné turbulence nad městem a častý výskyt méně propustné až téměř nepropustné atmosféry v důsledku kouřma či mlžných kapiček byl značný únik signálu a nebyl zajištěn dostatečně věrný přenos po celou dobu. Nadšení pro tento způsob přenosu signálu začalo ochabovat.

Tehdy se také vyskytl zájemce, který měl zadání pro další výzkum tohoto druhu. Šlo o automatické navigování říčních bagrů pomocí laseru. Pro tento účel byly sledovány fluktuace signálu nad vodní hladinou říčních toků a přehradních nádrží. Ukázaly se však ještě větší potíže než nad městem. Zejména ranní mlhy zcela zabraňovaly přenosu signálu na dlouhou dobu.

Později byly ještě zahájeny práce na pulzně-kódové modulaci laserového svazku a na optickém přenosu s galium-arsenidovými (GaAs) elektroluminiscenčními diodami (LED), vysílajícími světlo v blízké infračervené oblasti kolem 850 nm, které byly vyvíjeny v ústavu. Cílem těchto prací bylo alespoň částečně zlepšit optický přenos atmosférou.

Výzkum optického sdělování volným laserovým svazkem se postupně opouštěl a v druhé polovině šedesátých let pak byl z rozhodnutí ředitele výzkum optického sdělování v ústavu ukončen. Jen několik málo let poté byla v USA vyvinuta optická vlákna z křemenného skla a ve světě nastal bouřlivý rozvoj optických komunikací s těmito vlákny.

*M. Chomát, M. Miler*



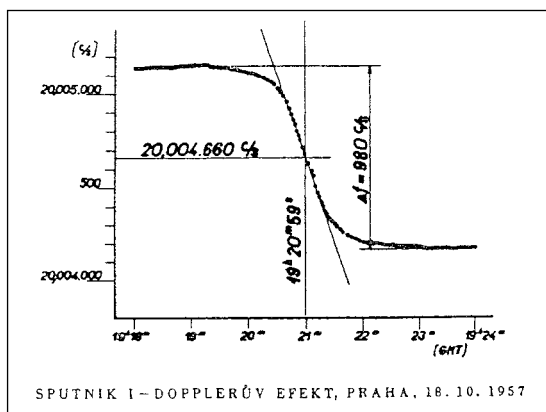
Obr. 1 „Rudá záře“ nad Prahou r. 1966  
(kolorované foto z dobového tisku)

# 60 let světla v Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i.

*V roce 1955 zahájil svou činnost Ústav teoretické radiotechniky Československé akademie věd, předchůdce dnešního Ústavu fotoniky a elektroniky Akademie věd České republiky. V roce 2015, vyhlášeným UNESCO za Mezinárodní rok světla, si připomeňme výběr z některých milníků už 60 leté historie vědeckého bádání v našem ústavu, zejména těch se vztahem k fotonice a světlu.*

Založení **Ústavu fotoniky a elektroniky** Akademie věd České republiky (ÚFE AV ČR) je spjato s rozšiřováním Československé akademie věd (ČSAV), přímé pokračovatelky České akademie věd a umění, jejíž 125. výročí založení si letos připomínáme. Přípravné kroky k založení ústavu, tehdy s názvem **Ústav teoretické radiotechniky** (ÚTR), vedl v roce 1953 Sergej Djad'kov, přední osobnost československého elektronického výzkumu.

Oficiálním datem vzniku ústavu je 1. říjen 1954, kdy prezidium ČSAV přijalo rozhodnutí o zřízení Ústavu teoretické radiotechniky. Vlastní činnost byla zahájena 1. 1. 1955 a záhy došlo i k přejmenování na **Ústav radiotechniky a elektroniky** (ÚRE). Pod tímto názvem ústav působil v dlouhém období let 1955–2006. Prvním ředitelem ústavu byl jmenován **Sergej Djad'kov**. Spolu s ním přišla do ústavu skupinka odborníků z průmyslového výzkumu stabilních oscilátorů a statistických metod v radiotechnice. Dále se k ústavu připojila řada významných osobností z oblastí teorie obvodů, přesného měření času a šíření elektromagnetických vln. Již na počátku své činnosti, v roce 1957, ústav zaujal světovou pozornost úspěšným měřením Dopplerova jevu u první umělé družice Země, sovětského Sputniku. Tento úspěch však s největší pravděpodobností předznamenal i větší zájem a dohled bezpečnostních služeb.



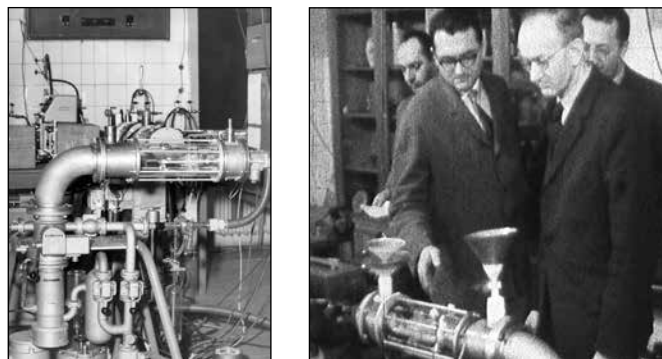
Obr. 1 Dopplerův efekt změřený na první umělé družici Země, Sputniku I

Velký úspěch slavil ústav na světové výstavě EXPO 1958 v Bruselu se samočinným počítačem na principu pravděpodobnosti a přístrojem pro rezonanční transformaci signálů. Oba exponáty byly oceněny zlatými medailemi. Na konci roku 1955 měl ústav 36 pracovníků (z toho 16 vědeckých), rok poté byly příslušné počty 71 (19) a v roce 1960 dokonce 180 (30). V roce 1959 odchod skupiny 11 pracovníků přispěl ke vzniku nového samostatného pracoviště, které vytvořilo základ **Ústavu teorie informace a automatizace (ÚTIA) ČSAV**.

## Laserová fyzika a první kvantové generátory záření

Na začátku své činnosti neměl ústav vlastní budovu a jeho pracoviště byla na 14 různých místech v Praze, z nichž největší bylo v nové budově Geofyzikálního ústavu ČSAV na Spořilově. Záhy začala výstavba nové budovy v Kobyliších, kam se jednotlivá pracoviště soustředila v roce 1961.

Přesun do nové budovy bylo významným krokem pro rozvoj experimentálních výzkumných vybavení. Tak například mohlo dojít k umístění prvního etalonu pro přesná měření času a frekvence se stabilním krystalovým oscilátorem do teplotně stabilizované, 14 metrů hluboké šachty, vystavěné v nové budově. **Jiří Tolman**, vůdčí osobnost ve výzkumu generace a měření přesného času a kmitočtu, povzbudil několik spolupracovníků k zahájení výzkumu kvantové elektroniky s cílem vyvinout kvantový generátor mikrovlnného záření - maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). **Spuštění maseru na molekulách čpavku 26. března 1963 (první kvantový generátor záření v Československu) skupinou vedenou Viktorem Trkalem bylo přelomovou událostí v oboru kvantové elektroniky a laserové fyziky u nás.**



Obr. 2 Přelomovou událostí v oboru laserové fyziky a kvantové elektroniky u nás bylo spuštění maseru v březnu 1963 skupinou vedenou Viktorem Trkalem. Obrázek vpravo je z dobové televizní reportáže o prvním čs. kvantovém generátoru záření, zleva: Václav Tysl, Viktor Trkal, Jiří Tolman a Václav Zima

Brzy poté, začátkem května 1963, následovalo spuštění rubínového laseru **Janem Blablou**, pouhé tři roky po proslulém vynálezu laseru Theodora Maimana. Jan Blabla a jeho kolegové později sestavili několik plynových laserů: He-Ne (červen 1964), výkonový CO<sub>2</sub> (1966), N<sub>2</sub> (1966) a He-Cd (1970) laser. V roce 1964 byla v kobylišské budově ústavu provedena ve spolupráci s Fakultní nemocnicí na Bulovce **první laserová operace oční sítnice u nás**, podrobněji o tom pojednává zvláštní článek Jana Blably a Viktora Trkala v tomto čísle. V období od 30. 11. 1963 do 30. 5. 1964 uspořádaly společně Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská (tehdy s názvem Fakulta technické a jaderné fyziky) ČVUT v Praze a náš ústav přednáškový kurz s názvem „Kvantová radiotechnika“. Tento **kurz lze považovat za první výukový program oboru laserové fyziky v tehdejších Československu. K jednotlivým přednáškám byla vydána obsáhlá skripta (celkem 744 stran), což byla vlastně první rozsáhlejší publikace o laserech v češtině.** Skripta a samotný kurz byly významným impulzem pro rozvoj zcela nové a revoluční technologie laserů v naší zemi.

V rámci oddělení kvantové elektroniky se etablovala skupina elektronové paramagnetické rezonance (EPR) soustředěná kolem tandemu **Zdeněk Šroubek a Karel Žďánský**. Skupina velmi rychle získala mezinárodní reputaci v oboru a oba hlavní představitelé postupně dostali pozvání na zahraniční univerzity. Z. Šroubek

odjel v roce 1967 na University of California at Los Angeles, UCLA (5letý pobyt), a K. Žďánský v roce 1969 na University of Canterbury (4letý pobyt).

Začátkem roku 1963 byl jmenován novým ředitelem ústavu **Václav Zima**. Provedl zásadní změny ve struktuře a vědeckém zaměření ústavu. Oddělení šíření elektromagnetických vln bylo převedeno do Geofyzikálního ústavu ČSAV a na druhou stranu do ústavu byla zahrnuta část bývalé laboratoře optiky ČSAV, zabývající se výzkumem materiálů pro infračervenou optiku. Jejím vedoucím byl vynikající odborník na infračervenou optiku **Antonín Vaško**. Později, v roce 1965, byla do ústavu převedena z Fyzikálního ústavu ČSAV skupina pro výzkum ferroelektrických monokrystalů a jejich aplikace v elektronice pod vedením **Zdeňka Málka**. V souladu se světovým pokrokem na poli mikroelektroniky, optoelektroniky a kvantové elektroniky se značná část kapacity ústavu soustředila na výzkum orientovaný na technologii polovodičů, optické komunikace a fyziku.

### Analýza a syntéza řeči

Teorie obvodů byla součástí výzkumného zaměření ústavu od dob jeho založení. Na počátku se jednalo o výzkum teorie kaskády dvoubranů, teorie elektrických filtrů a teorie nelineárních obvodů a oscilátorů. Později byl výzkum koncentrován na diskrétní a digitální zpracování signálu, zvláště na digitální filtry, diskrétní Fourierovu transformaci a spektrální a keprální analýzu. Od roku 1981 zde rozvíjeli výzkum analýzy řeči, jejího kódování a syntézy. Významnou osobností tohoto výzkumného programu byl **Robert Vich**. Spolupracovala s ústavem jazyka českého filozofické fakulty Univerzity Karlovy, s Ústavem teorie informace a automatizace ČSAV a řadou průmyslových pracovišť. V roce 1987 byla těmto výzkumným týmům udělena cena Československé akademie věd za jejich příspěvek k výzkumu kódování řeči.

### Měření přesného času a frekvence

Úsilí věnované přesnému času a frekvenci přineslo světové uznávání a využívání výsledky. Především **metoda časového transferu s pomocí synchronizačních impulzů televizního vysílání, kterou navrhnul Jiří Tolman, byla celosvětově používána až do relativně nedávné doby. V devadesátých letech postupně přebíraly její funkci systémy GPS (Global Positioning System).**

**Věnceslav František Kroupa**, který z počátku spolupracoval s Jiřím Tolmanem při výstavbě československého centra přesného času a frekvence, se později orientoval na frekvenční syntézu a dosáhl mezinárodního věhlasu. Jeho kniha „Frequency Synthesis: Fundamentals and Measurements“, vydaná v roce 1973, byla první knihou vydanou na toto téma ve světě. Za svůj vědecký přínos byl v roce 2003 oceněn medailí Ernsta Macha udílenou Akademií věd za mimořádné zásluhy ve fyzikálních vědách.



Obr. 3 CO<sub>2</sub> laser o výkonu 200 W pojmenovaný Barnabáš (60. léta XX. století)



Obr. 4 Kadmiový laser generující modré koherentní záření na vlnové délce 441,6 nm (1970)

### Optoelektronika a SIMS

Od poloviny šedesátých let se v ústavu rozvíjel obor optoelektroniky. Oddělení, které se věnovalo přípravě a studiu polovodičových vrstev typu A3B5 bylo vytvořeno v roce 1967 oddělením skupiny EPR z oddělení kvantové elektroniky a v jeho čele stanul Karel Žďánský. Oddělení bylo doplněno laboratoří epitaxní technologie polovodičových vrstev, kterou vedl **Dušan Nohavica**.

Výzkum fyzikálních vlastností polovodičových vrstev, struktur a různých typů elektroluminiscenčních prvků byl prováděn od roku 1967 do konce osmdesátých let. Současně s rozmachem epitaxních technologií byly rozvíjeny také diagnostické metody pro studium elektrických, transportních a optických vlastností polovodičových vrstev a struktur. Mezi nejdůležitější patří fotoluminiscenční (FL) a elektroluminiscenční (EL) spektroskopie, transienční kapacitní spektroskopie hlubokých hladin (DLTS) a teplotně závislá Hallova měření.

Na bázi GaP byly záhy připraveny EL diody emitující v červené a zelené části spektra s nejlepšími parametry v rámci tehdejšího východního bloku. GaP byl připravován pomocí epitaxního růstu z plynné fáze a současně byla vyvíjena epitaxní aparatura pro přípravu heterostruktur z kapalné fáze. Za zmínku stojí fakt, že se D. Nohavicovi podařilo na začátku 80. let připravit kvalitní vrstvy GaN. Z rozhodnutí vedení ústavu však nebylo možné v přípravě GaN vrstev pokračovat. V roce 1979 byla pozornost přesunuta na polovodičové zdroje záření pro optické komunikace. Aktivita byly soustředěny do dvou směrů: v prvním šlo o AlGaAs/GaAs systém pro 0,8 μm telekomunikační okno a ve druhém o InGaAsP/InP systém pro provoz v okně 1,3- a 1,55 μm. Příchodem **Jana Novotného** došlo k posílení technologie a jeho skupina se věnovala přípravě AlGaAs/GaAs struktur. V roce 1981 bylo dosaženo kontinuální emise záření na vlnové délce 0,8 μm při pokojové teplotě v AlGaAs/GaAs laseru s dvojitou heterostrukturou. Na vlnové délce v pásmu 1,3 μm se tak stalo v roce 1988 a rok poté v pásmu 1,55 μm. Ústav byl v té době jedním z nemnoha pracovišť ve světě, kde se prováděl výzkum, návrh a příprava polovodičových EL prvků a numerických displejů. Původní návrh GaAs displeje, navíc v kontextu s nastupující digitální technikou, vzbudil značný mezinárodní ohlas.

Velmi významnou metodikou rozvíjenou v ústavu od roku 1974 je hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů (SIMS - Secondary Ions Mass Spectroscopy). Zvláštního mezinárodního uznání dosáhl Zdeněk Šroubek svým příspěvkem k porozumění procesů přenosu elektrického náboje při dynamické interakci iontů s povrchem pevné látky.

### Holografie

V oblasti koherentní optiky bylo vyvinuto několik specifických metod pro výzkum deformací a mechanických vibrací různých objektů, příp. popis jejich tvarů s použitím holografické topografie. Holografické difrakční mřížky, jako výhodná alternativa mechanicky rytých mřížek, byly vyráběny a dodávány pro speciální optická zařízení v průmyslu. Byla učiněna řada originálních příspěvků

k teorii holografického zobrazování, světové prvenství má např. myšlenka fokusujících vázaných mřížek. Více o holografii pojednává článek **Miroslava Milera** v tomto čísle.

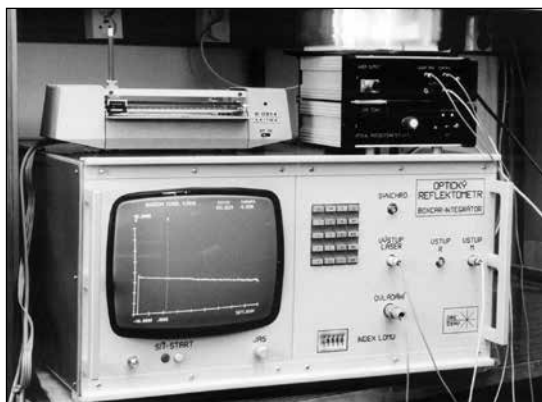
### Optické komunikace

Na konci 70. let byla v souladu se světovými trendy pozornost ústavu zaměřena na teoretický a experimentální výzkum v optických komunikacích. V roce 1979 byla oblast materiálového výzkumu svěřena Společné laboratoři silikátů ČSAV a VŠCHT (od r. 1987 Ústav skelných a keramických materiálů ČSAV) a spojené úsilí obou ústavů vyústilo v ucelenou metodickou a technologickou základnu pro optické komunikace v Československu. To zahrnovalo např. fyzikální modely pro řízení přípravy gradientních optických vláken, vývoj a výrobu prototypů unikátních zařízení pro měření průměru vlákna při tažení a pro automatickou kontrolu procesu tažení vlákna. Tyto výsledky byly podloženy rozsáhlým teoretickým a experimentálním výzkumem šíření světla ve vláknech (jak pro komunikace, tak pro sensorové aplikace), výzkumem technologie vláknových komponent a metod pro charakterizaci optických vláken. Do průmyslu, tehdejší VÚSU Teplice, byla zavedena technologie přípravy vláken typu PCS (Polymer-Clad-Silica) a gradientních vláken. Zvláštní pozornost byla věnována výzkumu polarizací zachovávajících vláken s napěťovými prvky.

V roce 1977 byl zahájen vývoj integrované optiky, tj. výzkum nejrůznějších vlnovodných prvků pro dělení, slučování, řízení a zpracování optických signálů. Pod vedením **Jiřího Čtyrokého** byla systematicky rozvíjena teoretická analýza šíření světla v izotropních i anizotropních planárních a kanálových vlnovodech a elektrooptické a akustooptické interakce v těchto vlnovodech. Na přípravě experimentálních vzorků ústav úzce spolupracoval s technologickou skupinou v tehdejší Výměrném ústavu pro sdělovací techniku A.S. Popova vedenou Josefem Schröfelem a skupinami Jarmily Špirkové-Hradilové a Ivana Hüttela na VŠCHT.

### Návrat demokracie (období 1989 – 2012)

Pád totalitního režimu a návrat demokracie do naší země v roce 1989 nastartoval řadu pozitivních změn v Akademii věd a jejích ústavech. Již v roce 1990, na samém začátku nové éry, byla zvolena vědecká rada ústavu, orgán, který se aktivně podílí na řízení ústavu. Ředitelem byl zvolen a poté jmenován **Viktor Trkal**. Otevření se světu s sebou přineslo rozšíření mezinárodní vědecké spolupráce s technologicky nejrozvinutějšími státy a z toho plynoucí obohacení vlastní vědecké práce. Svobodné badatelské prostředí podpořila nově zaváděná cílená podpora výzkumu formou vědeckých grantů. Na druhou stranu náš ústav byl silně orientován na spolupráci s průmyslem a transfer výsledků výzkumu do praxe, a proto ho více než jiné ústavy Akademie věd postihl útlum průmyslové výroby v některých odvětvích. V průběhu let 1990 – 1992 bylo třeba přehodnotit práci všech ústavů ČSAV a zabezpečit jejich činnost po rozdělení republiky přijetím zákona o Akademii věd ČR.



Obr. 5 Optický reflektometr pro měření útlumu optických vláken vyvinutý v 80. letech XX. století pro telekomunikace

Transformace Akademie věd zahrnovala i redukci pracovišť a počtu zaměstnanců. Náš ústav prošel v roce 1992 hodnocením úspěšně, ale, podobně jako ostatní ústavy, musel snížit počet zaměstnanců, a to o jednu třetinu na 128 pracovníků. Od té doby prochází ústav náročným mezinárodním hodnocením pravidelně. V té době se k ústavu připojila i skupina technologií optických vláken, vyčleněná v roce 1979 do samostatného pracoviště. V roce 1994 se stal ředitelem **Jan Šimša** a po jeho dvou funkčních obdobích byl v roce 2002 ředitelem jmenován **Vlastimil Matějec** a od roku 2012 je ředitelem **Jiří Homola**. Význam výzkumu v oblastech fotoniky a optoelektroniky v našem ústavu se promítl i do změny jeho názvu. Současně se změnou právní formy pracoviště na veřejnou výzkumnou instituci se s platností od 1. ledna 2007 změnil jeho název na Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR, v.v.i. Aktuální výzkumný program týmů ÚFE stručně uvedl ředitel ústavu v úvodním slově. Vybrané výsledky výzkumu z poslední doby tvoří další obsah tohoto čísla JMO. Na závěr zmíníme aktivity ústavu, které se nově objevily nebo se zvláště výrazně rozvinuly v období 1989-2012.

### Optické biosenzory založené na rezonanci povrchových plazmonů

Začátkem devadesátých let byl zahájen výzkum senzorů na principu rezonanční excitace povrchových plazmonů (SPR - surface plasmon resonance). První SPR senzor vyvinutý v ústavu v roce 1992 byl založen na měření útlumu úplného odrazu a úhlovém skenování. Brzy poté byl navržen optický vláknový SPR senzor, jehož další zlepšování vyústilo v nejmenší dosud na světě vyvinutý SPR vláknový senzor. Dále byly zkoumány SPR senzory založené na integrované optických vlnovodech. Byly demonstrovány integrované optické SPR senzory založené na vlnovodech připravených iontovou výměnou a spektrálním vyhodnocování. Na konci devadesátých let byl studován jev rezonance povrchového plazmonu na difrakčních mřížkách. Tyto studie inicializovaly nový výzkumný program zacílený na vícekanálové SPR senzory s použitím difrakčních mřížek. V roce 2002 tento program vyústil v unikátní vícekanálový SPR senzor založený na spektroskopii povrchových plazmonů na matici difrakčních mřížek, první SPR senzorová platforma schopná provádět přes 100 měření současně. Ve spolupráci s vědci z Ústavu makromolekulární chemie AV ČR v Praze a z University of Washington v Seattlu (USA), byla výzkumníky v našem ústavu tato unikátní SPR senzorová platforma využita k detekci a identifikaci chemických a biologických látek důležitých pro ochranu životního prostředí (pesticidy), lékařskou diagnostiku (hormony, protilátky), potravinářství (kontrola jakosti potravin, detekce škodlivin) a vojenství (detekce otravných látek).

### Charakterizace a příprava nanomateriálů

Pro moderní charakterizaci polovodičových vrstev, povrchů a struktur, jakož i skelných materiálů bylo rozvíjeno několik diagnostických metod. Mezi nejvýznamnější lze uvést úpravy v laboratoři elektrických měření K. Žďánského umožňující komplexní charakterizaci transportních vlastností polovodičových struktur pomocí DLTS a admitanční spektroskopie spolu s měřením I-V a C-V charakteristik v teplotním rozsahu 77-430 K a hallovská měření v teplotním rozsahu 10-430 K. Skupině vedené **Jarmilou Walachovou** se podařilo vybudovat, jako jediné v ČR, laboratoř Ballistic electron emission spectroscopy and microscopy BEEM/BEES, vhodnou pro studium polovodičových nanostruktur. S příchodem **Petara Gladkova** v roce 1995 byla přestavěna a doplněna laboratoř nízkoteplotní FL spektroskopie, která tak získala světové parametry. FL spektrometr nyní umožňuje provádět citlivá měření s vysokým rozlišením v širokém teplotním (4-300 K) a spektrálním (300-9000 nm) rozsahu. Podrobněji o využití nízkoteplotní FL pro studium polovodičů pojednává článek **Petara Gladkova a Jiřího Zavadila** v tomto čísle. Možnosti charakterizace byly dále vylepšeny instalací skenovacího elektronového mikroskopu s EDX systémem, který byl nedávno doplněn v ústavu navrženou a sestavenou katodovou luminiscencí. Za účelem rozšíření diagnostických

možností aparatury SIMS byl vyvinut hmotový průletový spektrometr. Studium nanostruktur a velmi tenkých vrstev vybraných polovodičů bylo prováděno s pomocí balistické, emisní elektronové mikroskopie a spektroskopie, včetně v ústavu vyvinutého skenovacího tunelovacího mikroskopu. Byla vyvinuta metodika přípravy vysoce kvalitních Schottkyho kontaktů na různých polovodičových materiálech (InP, GaN, ZnO, struktura se ZnO nanotyčkami) pomocí elektroforetické depozice kovových nanočástic z koloidních roztoků nebo s využitím depozice koloidního grafitu. Bylo ukázáno, že Schottkyho kontakty, připravené s využitím koloidního grafitu a dekorované nanočásticemi Pd nebo Pt, lze využít jako vysoce citlivé senzory vodíku s rychlou odezvou. Vynikající experimentální fyzik **Petar Gladkov** využil svých znalostí rovněž pro aplikovaný výzkum. V rámci evropského projektu Brightlight (2007-9) vyvinul originální metodu pólování nelineárních krystalů pro generaci druhé harmonické frekvence, využívané ve výkonných zdrojích záření v zelené oblasti viditelného spektra.

### Vláknová optika pro senzory a vláknové zesilovače a lasery

V roce 1993 byla k ústavu připojena laboratoř technologie optických vláken, která byla dříve součástí Ústavu chemie skelných a keramických materiálů. Toto rozhodnutí posílilo výzkum ústavu na poli optických vláken, neboť program laboratoře je soustředěn na materiálový výzkum speciálních optických vláken pro vláknové lasery a zesilovače a pro optické vláknové senzory. Tým **Miroslava Chomáta** vyvinul optický vláknový gyroskop včetně potřebných optických vláknových komponent. Po ukončení vývoje gyroskopu se výzkum orientoval na chemické senzory s evanescentní vlnou. Pro tyto senzory byly připravovány nové typy optických vláken, jako jsou sektorová vlákna a mikrostrukturální vlákna, ve kterých se nachází jádro optického vlákna blízko detekované látky. Na výzkumu speciálních optických vláken pro chemické senzory se významně a dlouhodobě podíleli **Vlastimil Matějka** a **Ivan Kašík**.

První funkční erbiem dopované vlákno pro zesilovače EDFA (erbium-doped fiber amplifier) bylo v laboratoři technologie optických vláken připraveno již v roce 1990 a záhy jej **Jiří Kaňka** úspěšně otestoval v pulzních vláknových laserech. Sestavili jsme zařízení pro zápis vláknových mřížek s dlouhou periodou. Ve výzkumu využití těchto vláknových mřížek v oblasti senzorů, telekomunikací a vláknových laserů jsme dosáhli řady unikátních výsledků. Projektový tým vedený **Radanem Slavíkem** získal za výzkum vláknových mřížek s dlouhou periodou zvláštní čestné uznání předsedy GAČR v roce 2010. Byly navrženy nové metody přípravy dvoujádrových vláken a dvouplášťových vláken dopovaných prvky vzácných zemin pro vláknové lasery a zesilovače. V roce 2007 **Ivan Kašík** s kolegy jako první publikoval experimentální práci o metodě dopování jádra optického vlákna keramickými nanočásticemi. Významných výsledků jsme dosáhli v oblasti základního výzkumu nestabilit vláknových laserů a módově synchronizovaných pulzních režimů. Pod vedením **Miroslava Karáska** byly vyvíjeny softwarové nástroje pro teoretickou analýzu a návrh vláknových zesilovačů dopovaných prvky vzácných zemin (erbiem, erbiem-terbiem, praseodymem) a ramanovských vláknových zesilovačů. Tyto programy byly rovněž integrovány do komerčního návrhového software kanadskou firmou Optiwave Inc. Od začátku milénia se rozvíjela intenzivní spolupráce se sdružením CESNET, poskytovatelem internetu českým vysokým školám a akademickým pracovištím, při které jsme měli možnost aplikovat nejnovější poznatky výzkumu vláknových zesilovačů v praxi. Tým **Miroslava Karáska** byl za tuto práci oceněn v roce 2007 cenou ministra školství za výzkum. Vyvinutý EDFA byl průmyslově vyráběn ve firmě Optokon a řada dalších technických řešení a vynálezů je patentově chráněna, včetně amerického patentu.

### Numerické modelování optických vlnodů

Teoretické ani experimentální studium vlnodů struktur integrované optiky se neobejde bez kvalitních nástrojů pro jejich numerické modelování. Proto byla této problematice od počátku



Obr. 6 Miroslav Karásek na konferenci Optical Fiber Communications v Anaheimu, USA v roce 2007. Tentýž rok převzal spolu s kolegy ze sdružení CESNET cenu Ministra školství za výzkum vláknových zesilovačů



Obr. 7 RNDr. Hana Lísalová Vaisocherová, Ph.D., získala prestižní stipendium firmy L'Oréal pro ženy ve vědě za rok 2011 za projekt "Trap Shuts in a Few Minutes"

věnována velká pozornost. Kromě relativně jednoduchých nástrojů pro výpočet konstant šíření a rozložení optických polí vedených vidů v různých typech vlnodů struktur byly postupně vyvíjeny metody a jim odpovídající softwarové nástroje pro výpočet rozložení optického záření ve složitějších vlnodů strukturách – pasivních děličích výkonu, elektrooptických modulátorů a prepínačů, ale i ve vlnodů polarizačních filtrech využívajících povrchové plazmony. **Jiří Čtyroký** se intenzivně zapojil do výzkumu této problematiky v mezinárodním měřítku zejména v rámci akcí COST 240, COST 268 a později i v rámci evropských projektů PCIC a NAIS. Není bez zajímavosti, že původně exotická vlnodů struktura tvořená dvojicí vzájemně vázaných vlnodů, z nichž jeden je ztrátový a druhý vykazuje zesílení, která byla navržena jako náročný test stability a přesnosti numerických metod, se o několik let později dočkala značné pozornosti teoretických fyziků jako modelová struktura pro kvantově mechanické systémy, na níž je možno optickými metodami studovat procesy vedoucí k narušení symetrie čas/parita. Systematický vývoj modelovacích metod vyústil v nástroj pro efektivní plně vektorové modelování chování i poměrně rozlehlych trojrozměrných vlnodů struktur, které umožňují efektivně analyzovat i subvlnově segmentované vlnodů struktury. Pro další podrobnosti odkazujeme čtenáře na samostatný článek o integrované optice v tomto čísle.

Uvedený přehled výzkumných aktivit dokládá, že ÚFE bylo a je schopné dosahovat špičkových vědeckých výsledků v mezinárodním srovnání. Mnoho důležitých aktivit nebylo zmíněno, zejména bohatá pedagogická činnost a výchova nových výzkumných pracovníků: doktorské práce v ÚFE vypracovávají postgraduální studenti řady fakult vysokých škol včetně Univerzity Karlovy, Univerzity Palackého v Olomouci, ČVUT a VŠCHT v Praze. Důležitou činností je pravidelné organizování a spoluorganizování významných odborných konferencí a kongresů, dva příklady z dubna 2015 jsou uvedeny v tomto čísle. V národním měřítku je oceňována role ÚFE v komunikaci vědy veřejnosti a průmyslu. Jedná se o popularizaci vědy odborné i široké veřejnosti a transfer výsledků výzkumu do praxe. V Mezinárodním roce světla 2015 přejeme ústavu ještě hodně „světelných let“ úspěšného výzkumu!

*Pavel Peterka a Jiří Zavadil*

*Poděkování: V článku byly použity obrázky a údaje ze speciálního dvojčísla Československého časopisu pro fyziku (č. 4-5, svazek 60, rok 2010, články Jana Blably, Viktora Trkala, Miroslava Milera, Pavla Peterky, Pavla Honzátky a Miroslava Karáska) věnovaného 50. výročí prvního laseru a dále z časopisu Jemná mechanika a optika, čísla 4 z roku 2010, které bylo věnované výzkumu vláknové optiky v ÚFE u příležitosti udělení Nobelovy ceny Ch. K. Kaovi za výzkum optických vláken.*

# Symposium SPIE Optics + Optoelectronics zaznamenalo rekordní zájem

*Letošní sympozium a výstava Optics + Optoelectronics mezinárodní společnosti pro optiku a fotoniku SPIE bylo největší za dobu 10 let svého trvání a přilákalo více než 700 účastníků z celého světa. Šíře představených technologií a množství výrazných osobností poskytly účastníkům vynikající zážitek a napomohly jejich vzájemné interakci a propojování i napříč obory. Setkání v pražských Vysočanech 13.-16. dubna bylo jednou z nejvýznamnějších událostí v optice a fotonice v České republice v Mezinárodním roce světla 2015.*

## Podpora České republiky fotonickým technologiím

Při zahájení setkání uvítal účastníky místopředseda Akademie věd České republiky Dr. Jan Šafanda, který řekl: „Rád bych vyjádřil svou vděčnost organizátorům, že tak velké a reprezentativní vědecké shromáždění svolali do Prahy a že mezi jeho předsedajícími a členy řídicího výboru jsou také vynikající vědci ze dvou ústavů Akademie věd, a to z Ústavu fotoniky a elektroniky a Fyzikálního ústavu. Při pohledu na seznam témat diskutovaných v průběhu sympozia jsem si uvědomil, jak velký potenciál uplatnění tento vědní obor má. Akademie věd České republiky silně podporuje výzkum v této oblasti fyziky. Jak asi víte, dvě velká laserová výzkumná centra jsou postavena v blízkosti Prahy v Dolních Břežanech pod vedením Fyzikálního ústavu. Jedním z center je HiLASE, což je zkratka pro pulzní lasery s vysokým průměrným výkonem, a druhým je Extreme Light Infrastructure nebo-li ELI Beamlines. Všichni věříme, že obě zařízení budou patřit mezi přední evropská vědecká centra, která přilákají špičkové vědce a poskytnou jim vynikající podmínky pro špičkový výzkum.“

## Interdisciplinární přístup k výzkumu a aplikacím světla

Sympozium SPIE Optics + Optoelectronics se od roku 2007 koná tradičně každý druhý rok v Praze a střídá se tak s rovněž obročním sympoziem SPIE Photonics Europe v Bruselu. Pražské sympozium zahrnovalo na 16 technických konferencí a workshop Laser Energy, zaměřený na výzkum laserové inerciální fúze. Účastníci a přednášející přijeli ze zemí celé Evropy, z Ruska, Číny, USA, Japonska a Koreje. Vzájemně komplementární témata podporovala synergický efekt mezi jednotlivými konferencemi. Důležitější konference byly zaměřeny na laserové urychlovače částic a jejich medicínské aplikace, optické senzory, speciální optická vlákna, technologie laserů s vysokými energiemi a intenzitami pulzů, integrovanou optiku, holografii, optické metamateriály, kvantově optický přenos informací a další témata. Na setkání mělo zastoupení několik velkých mezinárodních projektů a sympozium se tak stalo důležitým místem, kde výzkumní pracovníci, zástupci vládních agentur pro financování výzkumu, či provozovatelé výzkumných infrastruktur mohli společně diskutovat současný stav, úspěchy a nové výzvy.

## Inspirace výjimečnými osobnostmi fotoniky

Velkým lákadlem pro účastníky byly plenární přednášky. Peter Moulton, vynálezce titan-safírového přeladitelného laseru, který přinesl v osmdesátých letech revoluční změny oboru laserů s ultrakrátkými pulzy, srovnával tři hlavní přístupy optických zesilovačů s ultravysokým špičkovým výkonem pulzů: zesilovačů založených na objemových elementech, na parametrickém zesílení čerpaného impulsu a vláknových zesilovačích. Cenný byl jeho pohled praktického experimentátora, který si uvědomuje závažnost fyzikálních a inženýrských problémů, které s sebou přináší realizace zařízení s extrémním špičkovým výkonem pulzů. Zaplněný sál vyslechl i přednášky Ference Krausz z Institutu kvantové optiky

Maxe Plancka z Mnichova o možnostech pozorování procesů v atomech a molekulách pomocí attosekundových laserů a Andrea Melloniho z Milánské Polytechniky o integrovaných fotonických obvodech. Sang-Hyun Oh z Univerzity v Minnesotě přednesl plenární přednášku o kovových nanostrukturách pro plazmoniku a optoelektroniku.



Předseda sympozia, prof. Jiří Homola (ÚFE), Peter Moulton (Q-Peak) a výkonný ředitel SPIE Eugene Arthurs.  
© SPIE, the international society for optics and photonics



Robert Lieberman, nově zvolený prezident SPIE, shlédl přípravu speciálních optických vláken na exkurzi v týmu Vláknových laserů a nelineární optiky ÚFE

Živé diskuze probíhaly během posterové sekce a na dvoudenní výstavě, kde téměř 30 výrobců a dodavatelů předvádělo optické přístroje, zařízení a komponenty pro průmyslové a výzkumné aplikace. Zajímavostí ze sympozia by bylo možné napsat mnohem více, než kolik poskytuje zde vymezený prostor. Podrobnější zprávu přinese v blízké budoucnosti Československý časopis pro fyziku a podrobné a čtivé reportáže lze rovněž nalézt přímo na stránkách společnosti SPIE [www.spie.org/oo](http://www.spie.org/oo).



Zaplněný konferenční sál při plenárních přednáškách.  
© SPIE, the international society for optics and photonics



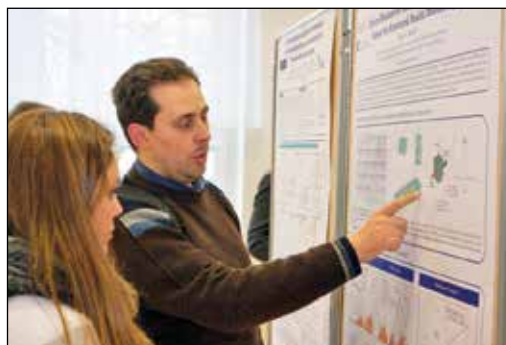
Návštěva čistých laboratoří laserového centra HiLASE.  
© SPIE, the international society for optics and photonics

## Elita v oboru polovodičových materiálů a optiky pro střední infračervenou spektrální oblast se sešla v Praze

Ústav fotoniky a elektroniky (ÚFE) pořádal ve spolupráci s evropskou akcí COST MP1204 dvě mezinárodní konference: 6<sup>th</sup> International Conference on Semiconductor Mid-IR Materials and Optics (SMMO2015) a 3<sup>rd</sup> Annual Conference of COST Action MP1204. Události byly součástí akce Mezinárodního roku světla 2015 a konaly se v budově ÚFE ve dnech 8.-11. dubna 2015.

Účastníci přijeli především z Evropy, ale i Severní Ameriky a Blízkého východu, celkem z 28 zemí. Součástí obou konferencí bylo celkem 41 přednášek, z toho 12 zvaných. Mezi zvanými přednášejícími byli: Prof. Roberto Morandotti (INRS, Kanada), Dr. Anna Sitek (University of Iceland, Island), Dr. Hynek Němec a Dr. Christelle Kadlec (FZÚ AV ČR), Prof. Gaetano Scamarcio (Università Degli Studi Di Bari, Itálie) a další.

Vedle přednášek proběhla první den posterová sekce, kde bylo prezentováno celkem 21 prací. Zájem odborné veřejnosti o pořádané konference byl značný – průměrná denní účast dosahovala



Konference zahájil Dr. Pavel Honzátka, spolupředsedající obou konferencí a člen řídicího výboru evropské akce COST MP1204 Tera-MIR

70 posluchačů. Zaměření konferencí bylo na témata spojená s realizací zdrojů či detektorů záření ve střední infračervené spektrální oblasti a jejich použití pro environmentální monitoring, medicínskou diagnostiku nebo bezpečnostní aplikace.

Sborník abstraktů je kromě knižní podoby (ISBN: 978-80-86269-23-8) dostupný také online na konferenčním webu ([www.ufe.cz/smmo2015](http://www.ufe.cz/smmo2015)). Vybrané příspěvky budou publikovány ve zvláštním čísle časopisu **Optical and Quantum Electronics**.

*Filip Todorov a Petra Nováčková*

Přidejte se k nám  
[facebook.com/ufe.avcr](https://facebook.com/ufe.avcr)

**NAHLÉDNĚTE**

**DO NANOSVĚTA**

**FOTONŮ A ELEKTRONŮ**

**5. - 7. LISTOPADU**  
**DNY OTEVŘENÝCH DVEŘÍ**  
**ÚSTAV FOTONIKY A ELEKTRONIKY**

Registrace nutná! Kontakt: [antoninova@ufe.cz](mailto:antoninova@ufe.cz), 266 773 446  
[www.ufe.cz](http://www.ufe.cz)



**ÚFE**



## Úvodní slovo ředitele Ústavu fotoniky a elektroniky

AV ČR, v. v. i. (J. Homola).....155

## Detekce chemických a biologických látek pomocí biosenzorů s povrchovými plazmony

(H. Lísalová Vaisocherová, M. Vala, J. Homola).....158

V této práci jsou popsány a zhodnoceny vybrané vědecké poznatky dosažené v posledních letech v Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR, v. v. i. v oboru výzkumu optických biosenzorů s povrchovými plazmony. Uvedené poznatky konkrétně demonstrují dosažený pokrok jak v oblastech instrumentace biosenzorů, tak i imobilizačních technik a aplikací vyvíjených biosenzorů pro detekci vybraných chemických a biologických látek.

**Klíčová slova:** optický biosenzor, povrchový plasmon, SPR, functionalizace, biodetekce

## Vliv hustoty pokrytí kovových nanočástic na výkonnost SERS-aktivních optických vláken (J. Kaňka).....161

Numericko-analytický model byl vyvinut pro vyšetření vlivu hustoty pokrytí kovových nanočástic na souhrn Ramanova zesílení a útlumu vedeného vidu v SERS-aktivních optických vláknech. Tento model byl aplikován na dva odlišné typy SERS-aktivních vláken: na jednovidové fotonické krystalové vlákno typu „suspended-core“ se stříbrnými nanočásticemi immobilizovaných na stěnách pláštových kanálů a na mnohovidové bezplášťové safírové vlákno se stříbrnými nanočásticemi na jeho válcovém povrchu. Předpovězené křivky Ramanovy intenzity jako funkce hustoty pokrytí nanočástic, délky vlákna pokryté nanočásticemi a excitovaných vidů jsou v dobré shodě s publikovanými experimentálními výsledky pro uvedené kontrastní typy SERS-aktivních vláken.

**Klíčová slova:** optické vláknové senzory, povrchově zesílený Ramanův rozptyl, spektroskopie, Raman

## Generace záření ve střední infračervené oblasti v nelineárních krystalech s použitím vláknových laserů

(Y. Baravets, P. Honzátka, F. Todorov, P. Gladkov).....164

Vyvinuli jsme úzkopásmový kontinuální mid-IR generátor založený na generaci rozdílové frekvence (DFG) v periodicky pólovaných (PP) krystalech KTA a KTP. Krystaly jsou využity k směřování svazků od vysokovýkonných vláknových laserových systémů pracujících ve spektrálních pásmech 1060 nm a 1550 nm. Ve zdroji založeném na krystalu PPKTA bylo dosaženo přeladitelnosti v rozsahu 3100 nm – 3620 nm. V ústavu byl postaven prototyp zařízení.

## Teorie a modelování vlnovodných fotonických struktur

(J. Čtyrský) .....166

Numerické modelování je nepostradatelnou součástí teorie a návrhu jakékoli vlnovodné fotonické struktury a součástky. Pomáhá nejen ušetřit čas i peníze náhradou nákladné a časově náročné přípravy metodou pokusů a omylů numerickými simulacemi, ale také – a to zejména – významně přispívá k opravdovému porozumění fyzikálním jevům, na nichž je funkce těchto struktur či součástek založena. Tento obor je v Ústavu fotoniky a elektroniky AVČR systematicky rozvíjen již víc než tři desetiletí. Po několika příkladech nejvýznamnějších výsledků jsou v tomto příspěvku stručně popsány základy nedávno vyvinuté fourierovské modální metody pro modelování trojrozměrných fotonických struktur a jsou uvedeny některé výsledky její aplikace na křemíkové subvlnové mřížkové vlnovodné struktury.

**Klíčová slova:** integrovaná optika, optická vlnovodná teorie, plasmonika, nanofotonika

**Aktivní vlákna dopovaná nanočásticemi** (J. Mrázek, I. Kašík, O. Podrazký, J. Aubrecht, J. Cajzl, J. Probošková, P. Peterka) ...170

Článek popisuje vybrané činnosti Ústavu fotoniky a elektroniky, v. v. i. v oblasti přípravy aktivních vláken dopovaných nanočásticemi. Nanočásticemi dopovaná vlákna byla připravena metodou “in-situ”, která spočívá v řízené krystalizaci dopantů v průběhu tepelného zpracování vláken. Druhá metoda “off-line” spočívala v dopování vláken již připravenými nanokrystaly. Optická vlákna připravená metodou “off-line” vykazovala nižší základní útlum. V případě, kdy byly do vlákna naneseny “off-line” připravené nanokrystaly aluminu dopované thuliem bylo pozorováno prodloužení luminescence na hodnotu 674 ms, což je o 30 % více než u srovnatelného vlákna, u kterého byly nanokrystaly vytvořeny metodou “in-situ”, tedy řízenou krystalizací dopantů. Vybrané optické vlákno dopované erbiem bylo testováno jako aktivní prostředí v kruhovém vláknovém laseru.

**Klíčová slova:** nanočástice, optické vlákno, luminescence, vláknový laser

## Thuliem dopovaná vlákna a optické vláknové součástky pro vláknové lasery na vlnových délkách v okolí 2 μm (P. Peterka, P. Honzátka, I. Kašík, O. Podrazký, F. Todorov, J. Cajzl, P. Koška, Y. Baravets, J. Aubrecht, J. Mrázek).....174

Vláknové lasery patří mezi nejmladší a nejrychleji se rozvíjející typy laserů. Zlatá éra vláknových laserů začala teprve na začátku nového tisíciletí a navazuje na úspěch vláknových zesilovačů v telekomunikacích v devadesátých letech. Ytterbiem dopované vláknové lasery na vlnových délkách v okolí 1 μm jsou v současnosti vůbec nejvýkonnějšími dostupnými lasery, dosahují až 100kW průměrného výstupního výkonu. Vláknové lasery na 2 μm založené na thuliem dopovaných optických vláknech získávají nyní na významu díky menšímu riziku poškození zraku, menším omezením kvůli nelinearitám, vysoké účinnosti dosahující až 70 % a efektivnějšímu opracovávání některých materiálů, např. plastů. V příspěvku shrnujeme některé naše nedávné výsledky v oblasti výzkumu nových typů materiálů pro zlepšení fluorescenčních vlastností thuliem dopovaných vláken, nových typů vláknových optických součástek a jejich použití v monolitickém vláknovém laseru. Popisujeme rovněž výsledky výzkumu koherentního kombinování thuliem dopovaných vláknových laserů.

**Klíčová slova:** vláknové lasery, thulium, holmium, čerpání přes plášť (cladding pumping)

## Vláknově optický senzor pH pro in-vivo měření v mikroskopických biologických vzorcích

(O. Podrazký, J. Mrázek, T. Martan, S. Vytykáčová, J. Probošková, I. Kašík, D. Sedmera, K. Hoyerová).....178

Optické vláknové senzory mohou přinést řadu výhod při využití v oblastech biologie, medicíny či v ochraně životního prostředí. Vyznačují se malými rozměry a odolností vůči elektromagnetickému poli, přičemž nežádoucí ovlivnění měřených vzorků je u nich též velmi omezeno. Jedním z důležitých parametrů sledovaných u biologických systémů je kyselost prostředí, vyjádřená jako pH. Článek popisuje vývoj optického pH-senzoru využívajícího zúžené vláknové sondy. Princip měření je založen na sledování emise fluorescence sodné soli kyseliny hydroxypyren-1,3,6-pyrentrisulfonové (pyranin) při excitaci dvěma odlišnými vlnovými délkami (405 nm a 450 nm). Senzor vykazoval citlivost na pH v rozsahu od 5,5 do 7,5, přičemž dosažené rozlišení činilo ±0,15 pH jednotky. Použití zúžených vláknových sond pak umožnilo in-vivo měření v mikroskopických biologických vzorcích.

**Klíčová slova:** optické senzory, optická vlákna, pH

## Nízkoteplotní fotoluminiscenční spektroskopie krystalických a skelných polovodičů (P. Gladkov, J. Zavadil) .....182

Je představen nízkoteplotní fotoluminiscenční spektrometr navržený

# CONTENTS

a sestavený v Ústavu fotoniky a elektroniky. Spektrometr umožňuje měření s velkou citlivostí a rozlišovací schopností v širokém spektrálním (300 nm – 9000 nm) a teplotním (3,5 K – 300 K) rozsahu. Unikátní spektrální rozsah spektrometru dává naší laboratoři jedinečnou možnost studovat různé polovodičové materiály a jevy. V práci je demonstrováno využití spektrometru pro studium objemových krystalů semi-izolačního nitridu galia (GaN) a vybraných skelných systémů dotovaných ionty vzácných zemin.

**Klíčová slova:** fotoluminescence, polovodiče, GaN, chalkogenidová skla, ionty vzácných zemin

**Jednodimenzionální nanostruktury ZnO** (J. Grym, R. Yatskiv, J. Vaniš, O. Černohorský, J. Lorinčík) ..... 185  
Předkládáme přehled nedávných aktivit týmu Příprava a charakterizace nanomateriálů v oblasti jednodimenzionálních nanostruktur ZnO. Stručně shrnujeme obecné vlastnosti ZnO a vysvětlujeme, proč jsou jednodimenzionální polovodiče užitečné. Popisujeme přípravu, charakterizaci a aplikaci grafitových Schottkyho kontaktů na polích nanotyčinek ZnO a navrhuje technologické koncepty k vysvětlení základních dějů odehrávajících se v nanokontaktech na nanotyčinkách ZnO.

**Bioelektrodynamika: vysokofrekvenční elektromagnetické procesy v biologických systémech** (O. Kučera, D. Havelka, M. Cifra) ..... 189  
Je shrnut stav problematiky v oboru bioelektrodynamiky. Stručný přehledový článek začíná úvodem do tématu a definicí oboru a je následován historickým přehledem bioelektrodynamiky. Speciální pozornost je poté věnována aktuálním tématům v tomto oboru biofyziky, jmenovitě ultraslabé fotonové emisi z biologických systémů a radiofrekvenčním elektromagnetickým polím spojeným s vlastními módy mikrotubulů.

**Klíčová slova:** bioelektrodynamika, mikrotubuly, ultraslabá fotonová emise

**Přenos přesného času pomocí optických vláken** (A. Kuna) ..... 191  
Článek popisuje naše dlouhodobé zkušenosti s časovým transferem prostřednictvím optických vláken a plně optických sítí. Pro porovnávání časových stupnic na velkou vzdálenost jsme proto vytvořili techniku a vyvinuli potřebné přístrojové vybavení, které jsme nejprve ověřili pomocí optické smyčky v délce 744 km v rámci páteřní sítě CESNET a posléze také využili pro dvoucestný optický transfer mezi českou a rakouskou národní laboratoří, které jsou zodpovědné za vytváření národních časových stupnic v České republice a Rakousku. Optickou trasu tvoří temná vlákna nebo vyhrazené kanály ve vlnovém multiplexu DWDM. Článek uvádí dosažené výsledky časového transferu, včetně měření zpoždění signálu na trase, a tyto jsou rovněž srovnány s obecně používaným časovým transferem prostřednictvím satelitních navigačních systémů.

**Klíčová slova:** čas, frekvence, časový transfer, optické vlákno, optická síť

**Introduction from the director of the Institute of Photonics and Electronics of the CAS, v. v. i.** (J. Homola) ..... 155

**ÚFE at the fair trade AMPER 2015** (A. Michková) ..... 177

**The jubilee of Prof. Miroslav Miler** (P. Peterka) ..... 194

**Beginnings of optical holography research** (M. Miler) ..... 196

**The first laser surgery of eye's retina in Czechoslovakia** (J. Blabla, V. Trkal) ..... 197  
In the middle of 1964 brought Dr. John to our laboratory a girl with quite torn eye retina. Neither classical surgery operation nor the Lichtkoagulator device was applicable. She had the only chance and that was the application of laser radiation ... "remember nestors of Czech laser physics and quantum electronics Jan Blabla and Viktor Trkal.

**Free space optical communication using lasers - one of the first laser applications** (M. Chomát, M. Miler) ..... 199

**60 years of light in the Institute of Photonics and Electronics** (P. Peterka, J. Zavadil) ..... 200  
In 1955, the work started in the Institute for Theoretical Radio Engineering of the Czechoslovak Academy of Sciences, the predecessor of today's Institute of Photonics and Electronics of the Czech Academy of Sciences. In the year 2015, proclaimed as the International Year of Light by the UNESCO, let us recall selection of the milestones of the past 60 years of scientific research in our institution, particularly those related to photonics and light.

**Symposium SPIE Optics + Optoelectronics: record attendance** ..... 204  
This year's symposium and exhibition Optics + Optoelectronics International Society for Optics and Photonics SPIE was the largest in its 10-years-old-series, it attracted more than 700 participants from around the world. The extent of the introduced technologies and the number of personalities provided the participants with a superior experience and helped interactions and cross-disciplinary synergy. The meeting took place from 13 - 16 April, 2015 and it was one of the most important events in optics and photonics in the Czech Republic within the International Year of Light 2015.

**The Elite in the field of semiconductor materials and optics for the mid-infrared spectral region met in Prague** (F. Todorov, P. Nováčková) ..... 205

Obrázek na titulní straně: Vláknové lasery mohou dosáhnout lepší účinnosti absorpce čerpání při nestandardním navíjení aktivního vlákna. Více v článku P. Peterky a kol. na str. 174.  
Autoři fotografie: Adéla Michková, Adam Benda a Jakub Cajzl (ÚFE)

Cover photo: Fiber lasers can achieve better pump-absorption efficiency by unconventional coiling of the active fiber, see p. 174 (Peterka et al.).  
Credit: Adéla Michková, Adam Benda a Jakub Cajzl (ÚFE)

Společnost OptiXs, s.r.o. se zabývá komplexními dodávkami **přístrojové techniky pro vysoce přesnou metrologii a výzkum** od předních světových výrobců.

## SPOLUPRACUJEME S PŘEDNÍMI SVĚTOVÝMI VÝROBCI



- Diodové, DPSS a OPSL lasery
- Plynové CO<sub>2</sub>, argonové a ion lasery
- Excimerové lasery
- Ultrafast (femtosekundové) laserové systémy
- Měřáky výkonu a energie laserových svazků
- Systémy pro diagnostiku profilu svazku



- Analyzátoři velikosti částic
- Magnetometrické a kryogenní systémy
- Spektrální elipsometry
- Systémy pro nanotechnologie
- Světelné zdroje (lampy, solární simulátory)
- Monochromátory, spektrografy a kamery pro spektroskopii



- Antivibrační pneumatické optické stoly
- Antivibrační pneumatické laboratorní stoly
- Aktivní piezoelektronické tlumení vibrací
- Faradayovy klece
- Magnetické stínění
- Akustické stínění



- CCD a iCCD kamery (intenzifikované)
- SCMOS kamery s chlazenými a nechlazenými čipy
- EMCCD kamery s vysokou kvantovou účinností
- Speciální kamery pro RTG oblast (X-ray)
- Spektrografy s vysokým rozlišením
- Konfokální mikroskopické systémy na bázi spinning discu



- Optické prvky
- Optomechanika, držáky optiky, spojovací materiál
- Manuální a motorizované polohovací prvky
- Deformovatelná zrcadla, detektory vlnoplochy
- Detektory, fotodiody, kamery
- Kompletní systémy pro mikroskopii, OCT a další



- Bílé lasery (Supercontinuum whitelight laser)
- Laditelné laserové systémy na bázi superkontinua
- Jednofrekvenční vláknové lasery pro NIR a IR oblast
- Fotonická krystalická vlákna
- Vláknové moduly pro generaci superkontinua



- PIV systémy (2D, stereo, 3D, Time Resolved, Mikro)
- PLIF systémy pro měření proudění, teploty a koncentrací
- LDA systémy pro velmi přesné měření proudění tekutin
- PDPA systémy pro měření velikosti částic a proudění tekutin
- Systémy pro drátkovou anemometrii



- Vláknové spektrometry
- Systémy pro ramanovu spektroskopii
- Světelné zdroje s výstupem do vlákna
- Optická vlákna
- Příslušenství pro spektrometrická měření

# TECHNOLOGICKÉ SPECIALITY VLÁKNOVÉ OPTIKY



Tapery

Couplers

Čočky na vlákne

Decoating

Speciální vlákna (PM, LD, SD)

## Technologie

- Unikátní plasma technologie 3 elektrod
- Kontrola teploty od 100°C a přes 3 000°C

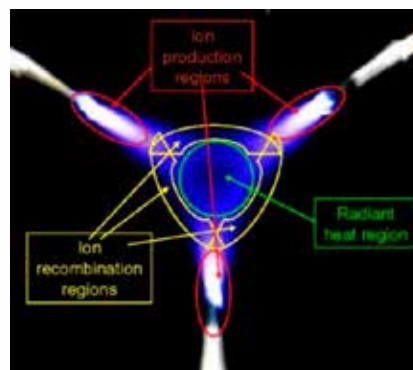
## Thermally Stabilized Plasma<sup>®</sup>

### Large Diameter Fiber Splicing System, LDS II

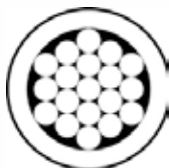
### Plasma Fusion Splicer-Small Diameter

### Taper Manufacturing Station

- Vláknové děliče, odbočnice
- Vidové adaptéry, kondicionéry
- Tapery včetně polarizačních vláken
- Terminace vláken do špičky
- Svařování vláken s průměrem až 2 500 μm



## Ring of Fire<sup>®</sup>

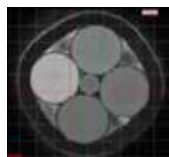


2000μm to 125μm

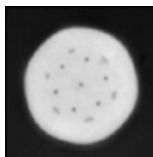
2000μm tapered to 125μm

2800μm PCF to 1500 fiber

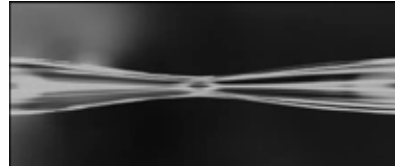
2600μm round to hex fiber



4:1 Pump COMBINER  
400μm Pump to 125μm Signal



7:1 Pump COMBINER  
7x 125μm fibers



Taper